



Rømning ved brann i litium-ion batteri i elsparkesykkel

RISE RAPPORT 2023:32

Janne Siren Fjærestad

Ragni Fjellgaard Mikalsen

Christoph Meraner

RISE Fire Research

Rømning ved brann i litium-ion batteri i elsparkesykkel

Janne Siren Fjærestad, Ragni Fjellgaard Mikalsen,
Christoph Meraner

Abstract

Fire evacuation during lithium-ion battery fires in electric scooters

This study deals with escape in the event of a lithium-ion battery fire. The study is funded by the Norwegian Directorate for Civil Protection (DSB) and the Norwegian Building Authority (DiBK).

The main objective is to evaluate the consequences of a *thermal runaway* in an electric scooter in an enclosed space in terms of the spread of gas and smoke from the battery and the potential to prevent escape via escape routes. The scenarios examined are representative of public buildings, schools, office buildings, and other buildings that require many people to escape via large open spaces (e.g., classrooms, open-plan offices) and corridors (escape routes). In addition to the experimental study, information about incidents involving fires in electric scooters in Bergen in recent years has been collected, and the Bergen Fire Service's experiences from these incidents are presented.

A total of 6 large-scale experiments were carried out with a fire in an electric scooter, 3 of the experiments were carried out in a 55 m² large room corresponding to a classroom, and 3 of the experiments were carried out in a 15 m long corridor (38 m²). The ceiling height in the building was around 3 m.

The concentrations of the gases CO₂, CO, O₂, HCl, HF, HCN, SO₂, CH₂O, NO and NO₂ were measured in the experiments. The measurements are used to establish an experimental basis for evaluating whether and when critical gas values (according to ISO 13571:2012 "Life-threatening components of fire") are achieved and thus lead to reduced ability to escape. The temperature change caused by the fire was measured at different heights in the room. In addition, video documentation is used to assess how the spread of smoke affects escape in a situation where there is a fire in an electric scooter in an escape route.

The study has shown that a thermal runaway in a lithium-ion battery leads to a rapid fire development where the battery essentially bursts into flames, with jet fires and potential ejections of burning battery cells far away from where the fire started. The duration of this fire behavior with jet fires and flying debris was between 3 and 7 minutes. In the fire experiments, the emitted energy was not high enough to raise the room temperature to a critical level. Near the fire, however, there is a hazard of fire spread to other combustible materials in the room due to the behavior of the fire and high temperature of the jet flame. Ejection of burning battery cells poses a hazard of fire spread even to areas far away from the start location.

Fires in an electric scooter battery or similar lithium-ion batteries can cause a rapid spread of smoke to the entire room. In the conducted experiments, the fire room was no longer smoke-free at the height of 1.9 m already after 1-2 minutes. Due to this rapid spread of smoke, visibility in the room will be affected after a short time and make escape more difficult. In the corridor, the smoke spread was relatively evenly distributed in height, while the smoke in the large room ("classroom") spread in a layer under the roof. Both forms of dispersion are thus possible, depending on the room and ventilation configuration.

The gas measurements in the fire experiments detected both asphyxiant and irritant gases. Due to the battery size, which affects how much gas is formed, in relation to room size and ventilation conditions, the calculated FEC, i.e., the critical concentration of irritant gases, was below the selected limit value of 0.1 in all experiments. Although the FEC value was below 0.1 in all the experiments, people in the fire room would have begun to feel an effect from some of the toxic gases. However, this effect would not have been disabling. The FED, that is, the critical dose for asphyxiant gases, was only obtained after 23 to 30 minutes. It is important to remember that the concentration of toxic gases in a room due to a fire in a lithium-ion battery depends on the ratio of battery size, room size, and ventilation conditions. This means the limit values could have been exceeded for a larger battery or in a smaller room.

The most important recommendation from this study is: Avoid storing and charging electric scooters and similar in living areas and escape routes. Chapter 7 also presents 8 tips and recommendations for the population, as well as 1 for the building owner and 1 for the fire service.

Videos from the experiments performed in this study are available following the QR codes or the link below.



<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-64169>

Key words: escape, battery fire, electric scooter, e-scooter, escape route, battery, smoke, toxicity, thermal runaway, jet fire, fire spread, ignition, failure mechanism, enclosed space, smoke spread, gass spread, school, open-plan offices, open room, corridor

Nøkkelord: rømning, batteribrann, elsparkesykkel, fluktvei, rømningsvei, batteri, røyk, giftighet, termisk hendelse, thermal runaway, jetflamme, utkast, brannspredning, antennelse, feilmekanisme, lukket rom, røykspredning, gasspredning, skole, kontorlandskap, åpent rom, korridor

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE-rapport 2023:32

ISBN: 978-91-89757-78-3

Prosjektnummer: 20612-2

Kvalitetssikring: Tian Li

Finansiert av: Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap og Direktoratet for byggkvalitet

Forsidebilde: Nærbilde av person på en elsparkesykkel. Designed by Fxquadro - Freepik.com, lisens "Free for commercial use WITH ATTRIBUTION license".

Trondheim 2023

Innhold

Abstract	1
Innhold	4
Forord	6
Sammendrag	7
1 Innledning	9
1.1 Bakgrunn.....	9
1.2 Målsetning.....	10
1.3 Omfang og begrensinger.....	11
1.4 Metode.....	11
1.5 Forkortelser og begreper.....	11
1.6 Finansiering.....	13
2 Batterier, brannrøyk og rømning	14
2.1 Litium-ion batterier.....	14
2.2 Brann i litium-ion batterier.....	14
2.3 Rømning og skadelig røyk.....	16
3 Statistikk, eksempler på hendelser og løsninger	18
3.1 Statistikk, relevante batterihendelser.....	18
3.2 Eksempler på branner i elsparkesykler i Bergen.....	18
3.3 Eksempler på problemstillinger og løsninger.....	21
4 Metode og forsøksbeskrivelse	23
4.1 Forsøksoppsett.....	23
4.2 Testobjekt.....	25
4.3 Instrumentering og målemetoder.....	25
4.4 Prosedyre for antennelse av elsparkesykkel.....	28
5 Resultater	30
5.1 Brannforløp i elsparkesykkelen.....	30
5.2 Temperaturutvikling i rommet.....	33
5.3 Røykutvikling i rommet.....	35
5.3.1 I klasserommet.....	35
5.3.2 I korridoren.....	38
5.4 Utslipp av kvelende gasser.....	41
5.4.1 Kvelende gasser i klasserommet.....	41
5.4.2 Kvelende gasser i korridoren.....	44
5.4.3 FED.....	46
5.5 Utslipp av irriterende gasser.....	47
5.5.1 Irriterende gasser i klasserommet.....	47
5.5.2 Irriterende gasser i korridoren.....	49

5.5.3	FEC	51
6	Diskusjon.....	52
6.1	Diskusjon av metode	52
6.2	Diskusjon av resultatenes betydning for rømning	53
6.3	Det større bildet - antennelse, romstørrelse og ventilasjon	56
7	Tips og anbefalinger.....	59
8	Konklusjoner	60
9	Referanser.....	62
Vedlegg A:	Videomateriale.....	64
Vedlegg B:	Måledata klasserom.....	65
Vedlegg C:	Måledata Korridor	71

Forord

Dette prosjektet er finansiert av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK) som en del av prosjektporteføljen under forskningsavtalen mellom DSB og RISE Fire Research.

Denne rapporten bygger på tidligere RISE rapporter om brannsikkerhet og batterier, inkludert «Avgassing fra litium-ion batterier i hjemmet» (RISE rapport 2021:17), og «Energieffektive bygg og brannsikkerhet» (RISE rapport 2019:22). Alle RISE rapporter kan lastes ned fra RISE sine nettsider: <https://risefr.no/publikasjoner> eller fra RISE sitt bibliotek: <https://www.diva-portal.org>.

Vi vil takke Bergen brannvesen for å ha delt av sine erfaringer og bidratt med informasjon om hendelser med brann i elsparkesykler i deres område.

Oppbygging av forsøksoppsett og gjennomføring av forsøkene i denne studien er gjort i samarbeid med prosjektserien BRAVENT (brann og røykspredning i ventilasjonskanaler), som er et innovasjonsprosjekt for offentlig sektor finansiert av Forskningsrådet (prosjektnummer 321099) og av partnerne. Vi ønsker å takke for samarbeidet.

Trondheim, juni 2023

Janne Siren Fjærestad

Forsker og prosjektleder

Sammendrag

Denne studien omhandler rømning ved en litium-ion batteribrann og er finansiert av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK).

Hovedmålet er å evaluere konsekvensene av en *thermal runaway* i en elsparkesykkel i et lukket rom med tanke på spredning av gass og røyk fra batteriet og potensiale for å hindre rømning via flukt- og rømningsveier. Scenariene som undersøkes er representative for publikumsbygg, skoler, kontorbygg, og andre bygg som krever at flere personer rømmer via fluktveier i større åpen rom (for eksempel klasserom, åpent kontorlandskap) og korridorer (rømningsvei). I tillegg til den eksperimentelle studien, er det innhentet informasjon om hendelser med branner i elsparkesykler i Bergen de siste årene og Bergen brannvesens erfaringer fra disse hendelsene presenteres.

Det ble totalt gjennomført 6 storskala forsøk med brann i en elektrisk sparkesykkel, 3 forsøk ble utført i et 55 m² stort rom tilsvarende et klasserom og 3 forsøk ble utført i et 15 m lang korridor (38 m²). Takhøyden i bygget var rundt 3 m.

I forsøkene ble konsentrasjonen av gassene CO₂, CO, O₂, HCl, HF, HCN, SO₂, CH₂O, NO og NO₂ målt. Målingene er brukt til å etablere eksperimentelt grunnlag for å evaluere om og eventuelt når kritiske gassverdier (i henhold til ISO 13571:2012 «Life-threatening components of fire») oppnås og dermed fører til nedsatt evne til å rømme. Temperaturutviklingen som følge av brannen ble målt i ulike høyder i rommet. I tillegg er videodokumentasjon brukt til å vurdere hvordan spredningen av røyk påvirker rømning i en situasjon der det brenner i en elsparkesykkel i en flukt- eller rømningsvei.

Studien har vist at en thermal runaway i et litium-ion batteri fører til en rask og eksplosjonsartet brannutvikling, med jetflammer og potensielt utkast av brennende battericeller langt vekk fra der brannen startet. Varigheten på den eksplosjonsartede brannen i brannforsøkene var mellom 3 og 7 minutter. I brannforsøkene var den avgitte energien ikke høy nok for å øke romtemperaturen til et kritisk nivå. Nært brannen er det likevel stor fare for spredning av brannen til andre brennbare materialer i rommet på grunn av den eksplosjonsartede brannutviklingen og høye temperaturen i jetflammen. Utkast av brennende battericeller gir fare for brannspredning også til områder langt vekk fra startbrannen.

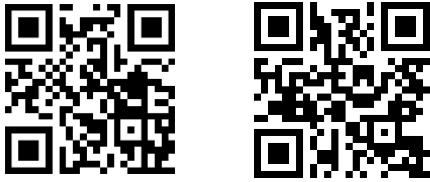
Brann i et elsparkesykkelbatteri eller lignende litium-ion batterier kan føre til rask røykspredning til hele rommet. I de gjennomførte forsøkene var brannrommet allerede etter 1-2 minutter ikke lenger røykfritt ved 1,9 meters høyde. På grunn av denne raske røykspredningen vil sikten i rommet påvirkes etter kort tid og gjøre rømningen vanskeligere. I korridoren skjedde røykspredningen relativt jevnt fordelt i høyden, mens røyken i det store rommet («klasserom») spredde seg i et sjikt under taket. Begge former for spredning er altså mulig, avhengig av rom- og ventilasjonskonfigurasjon.

Gassmålingene i brannforsøkene registrerte både kvelende og irriterende gasser. På grunn av batteristørrelsen, som påvirker hvor mye gass som dannes, i forhold til romstørrelse og ventilasjonsforhold var den beregnede FEC, altså den kritiske konsentrasjonen av irriterende gasser, i alle forsøkene under den valgte grenseverdi av 0,1. Selv om FEC verdien var under 0,1 i alle forsøkene ville folk i brannrommet ha begynt å kjenne en effekt fra noen av de giftige

gassene. Denne effekten hadde imidlertid ikke vært invalidiserende. FED, altså den kritiske dosen for kvelende gasser, ble først oppnådd etter 23 til 30 minutter. Det er viktig å huske at konsentrasjonen av giftige gasser i et rom på grunn av en brann i en litium-ion batteri er veldig avhengig av forholdet mellom batteristørrelse, romstørrelse og ventilasjonsforholdene. Det vil si at for et større batteri eller i et mindre rom hadde grenseverdiene kunne blitt oversteget.

Den viktigste anbefalingen fra denne studien er: Unngå lagring og lading av elsparkesykler og lignende i oppholdsrom og rømningsveier. I kapittel 7 presenteres det i tillegg 8 tips og anbefalinger til befolkningen, samt 1 til byggeier og 1 til brannvesen.

Videomateriale fra studien er tilgjengelig via QR kodene eller lenken under.



<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-64169>

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

De siste årene har antallet elsparkesykler i samfunnet økt betraktelig. Dette gjelder også elsparkesykler som brukes som transportmiddel for å komme seg til skole, arbeidsplasser, fritidsaktiviteter eller andre publikumsbygg. Folk tar med elsparkesyklene sine inn i bygget for å unngå at de blir ødelagt eller stjålet. DSB har uttrykt bekymring¹ for denne praksisen, og særlig for at elsparkesykler oppbevares eller lades i flukt- eller rømningsvei. Litium-ion batterier som brukes i elsparkesykler innebærer risiko for en såkalt *thermal runaway*. En thermal runaway i et litium-ion batteri kan føre til rask spredning av giftige gasser og brannrøyk. Det er derfor ønskelig å få på plass mer kunnskap, og evaluere konsekvensene av en thermal runaway i et elsparkesykkelbatteri i rom som også brukes som fluktvei/rømningsvei. Thermal runaway omtales noen ganger som *termisk hendelse* på norsk.

I nyhetsbildet kan man finne flere eksempler på saker med branner i elsparkesykler, et eksempel er vist i Figur 1-1.



Figur 1-1 Eksempel på nyhetssak om branner i elsparkesykler [1]. Skjermdump fra NRK.no, foto av Oslo brann- og redningsetat, brukt med tillatelse.

¹ Informasjon gitt til denne studien av kontaktperson hos DSB.

Nå skal det mye til før det begynner å brenne i en elsparkesykkel, men når det først skjer er det svært uheldig dersom denne befinner seg i oppholdsrom eller i fluktvei. Ifølge Norsk brannvernforening er det mange (37% av de spurte) som lader elsparkesyklene sine i fluktvei:

«Branner i elsparkesykler utvikler seg veldig raskt og er vanskelig å slokke. Når vår undersøkelse viser at 1 av 3 lader elsparkesykkelen i gangen, blir vi bekymret. Gangen er ofte den eneste fluktveien ved en brann» - Rolf Sørtorp, adm. dir. i Norsk brannvernforening [2]

Resultatene fra denne undersøkelsen gjennomført i 2022, utført av Kantar for Norsk brannvernforening, DSB og forsikringsselskapet If, viste også at mange av de spurte (51% av de spurte) lader elektrisk utstyr om natta. Dette er ikke i tråd med Ladevettreglene [3], som er 10 konkrete punkter som skal hjelpe med å forebygge brann i ladbare artikler i hjemmet, utviklet av DSB, Norsk brannvernforening og forsikringsselskapet If. Punkt nr 7 i Ladevettreglene er spesielt relevant for temaet i denne rapporten:

Ikke lad i korridor eller i trapperom. De må kunne brukes som fluktvei ved brann. [3]

Brannfaglig fellesorganisasjon (BFO) har utarbeidet en veileder for oppbevaring og lading av elsykler/-sparkesykler som sier blant annet:

Rom for oppbevaring og lading kan ikke være del av rømningsvei eller oppholdsrom. [4]

DSB har også laget egne råd for trygg lading av elektrisk sykkel, sparkesykkel og ståbrett [5]. De anbefaler bl.a. å alltid lese bruksanvisningen, bruke originale ladere og å behandle batteriet med forsiktighet så det ikke tar skade.

Til brann-nyhetssiden brennaktuelt.no skriver BFOs styreleder at det aller beste er å være våken og til stede når du lader, for da kan man oppdage og varsle om en brann, og få til å slokke eller rømme [6].

Ifølge Bokmålsordboka er en elsparkesykkel et «framkomstmiddel som ser ut som en sparkesykkel, men blir drevet av en elektrisk motor, jamfør elsykkel» [7]. Både elløpehjul og elmpoped er også foreslått brukt om det samme, men det er elsparkesykkel som brukes mest, ifølge Språkrådet [8]. I denne rapporten brukes derfor elsparkesykkel.

1.2 Målsetning

Hovedmålet med prosjektet er å evaluere konsekvensene av en thermal runaway i en elsparkesykkel i et lukket rom. Konsekvensene skal evalueres med tanke på spredning av gass og røyk fra batteriet og potensiale for å hindre rømning via flukt- og rømningsveier. Scenariene som undersøkes skal være representative for publikumsbygg, skoler, kontorbygg, og andre bygg som krever at flere personer rømmer via fluktveier i større åpen rom (for eksempel klasserom, åpent kontorlandskap) og korridorer (rømningsvei).

Prosjektet skal etablere eksperimentelt grunnlag for å evaluere om og eventuelt når kritiske gassverdier (i henhold til ISO 13571:2012 «Life-threatening components of fire» [9]) oppnås i en representativ høyde og dermed føre til nedsatt evne til å rømme. Det skal utføres måling av gasskonsentrasjoner i nærheten av elsparkesykkelen og et stykke unna den. Gassene som skal måles er CO₂, CO, O₂, HCl, HF, HCN, SO₂, CH₂O, NO og NO₂.

Et delmål med prosjektet er å skape videodokumentasjon fra forsøkene som kan brukes i f.eks. informasjonskampanjer.

1.3 Omfang og begrensinger

Fokus i denne studien er på små litium-ion batterier. Dette inkluderer ikke større energisystemer til bygg, eller litium-ion batterier i elektriske kjøretøy (elbiler).

Videre er fokus på private elsparkesykler og ikke elsparkesykler fra selskapene som driver med utleie av elsparkesykler. Det er ikke vanlig at sistnevnte elsparkesykler tas inn i publikumsbygg av privatpersoner. Resultatene vil også være relevante for andre fremkomstmidler med tilsvarende fysisk størrelse og batterikapasitet, for eksempel andre typer elektriske ståhjulinger, selvbalerende ståbrett (hoverboards) og små elsykler.

1.4 Metode

Et utvalg relevant faglitteratur er gjennomgått og brukt som underlag for rapporten. Det er også brukt noe informasjon fra relevante kilder på nett.

Informasjon fra Bergen brannvesen ble tilsendt til RISE Fire Research etter forespørsel om de har hatt hendelser med branner i elsparkesykler i deres område de siste årene. En utfyllende liste med ulike brannhendelser ble oversendt, denne var grovsortert fra Bergen brannvesen, og gjennomgått av prosjektgruppa. Det ble identifisert 22 relevante hendelser. I tillegg ble det gjennomført en samtale mellom prosjektgruppa ved RISE Fire Research og fagansvarlig for fornybare energikilder (herunder batterier) og forskningskoordinator ved Bergen brannvesen, én time digitalt møte, 24 januar 2023, med mål om å diskutere og få innspill på problemstillinger og løsninger/tiltak relevante for denne studien. Det ble tatt notater fra samtalen. Relevant informasjon for dette prosjektet er kvalitetssikret av prosjektgruppa og inkludert i rapporten. Bergen brannvesen fikk tilsendt de aktuelle avsnittene av rapporten for gjennomgang før publisering.

Det ble gjennomført seks brannforsøk i denne studien. Metode og forsøksbeskrivelse for disse er nærmere beskrevet i kapittel 4.

1.5 Forkortelser og begreper

Nedenfor forklares forkortelser og begreper som er berørt i denne rapporten.

Tabell 1-1: Forkortelser og begreper brukt i rapporten.

Begrep/forkostelse	Definisjon/forklaring
AEGL	«Access acute exposure guideline levels». Akutt eksponeringsnivå. [9]

Begrep/forkostelse	Definisjon/forklaring
Branncelle	Hel eller avgrenset del av byggverk hvor en brann fritt kan utvikle seg uten å spre seg til andre bygninger eller deler av byggverket i løpet av en fastsatt tid [10].
DiBK	Direktoratet for byggkvalitet.
DSB	Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap.
Elsparkesykkel	Framkomstmiddel som ser ut som en sparkesykkel, men blir drevet av en elektrisk motor, jamfør elsykkel. [7]
Escape route	Brukes på engelsk om begge de norske begrepene fluktvei og rømningsvei.
Evakuering	Prosess der mennesker og dyr ved egen hjelp eller assistert av andre forflytter seg eller forflyttes til et sikkert sted etter at varsling om evakuering er gitt [10]. I denne rapporten brukes kun begrepet «rømning».
FEC	«Fractional effective concentration». Konsentrasjonen relevant for utholdenhet eller evnen til å oppholde seg i et område som er eksponert til irriterende gasser [9].
FED	«Fractional effective dose». Dosen relevant for utholdenhet eller evnen til å oppholde seg i et område som er eksponert til kvelende gasser [9].
Fluktvei	Del av en branncelle, som brukes til rømning og evakuering fram til rømningsvei eller til sikkert sted [10].
Rømning	Prosess der mennesker ved egen hjelp eller assistert av andre forflytter seg eller forflyttes til et sikkert sted [10].
Rømningsvei	Én eller en rekke brannceller tilrettelagt for rømning mellom oppholdsrom/branncelle og sikkert sted [10].
Thermal runaway	En <i>thermal runaway</i> er en ukontrollerbar nedbryting av anoden, katoden og elektrolytten i en battericelle. <i>Thermal runaway</i> omtales noen ganger som <i>termisk hendelse</i> på norsk.
Utkast	Med <i>utkast</i> menes her at battericeller kastes ut fra elsparkesykkelen under en brann.

1.6 Finansiering

Prosjektet er finansiert av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK).

2 Batterier, brannrøyk og rømning

I dette kapitlet presenteres informasjon om batterier, batteribrann og rømning, som er relevant for brannsikkerhet og rømning ved brann i elsparkesykler.

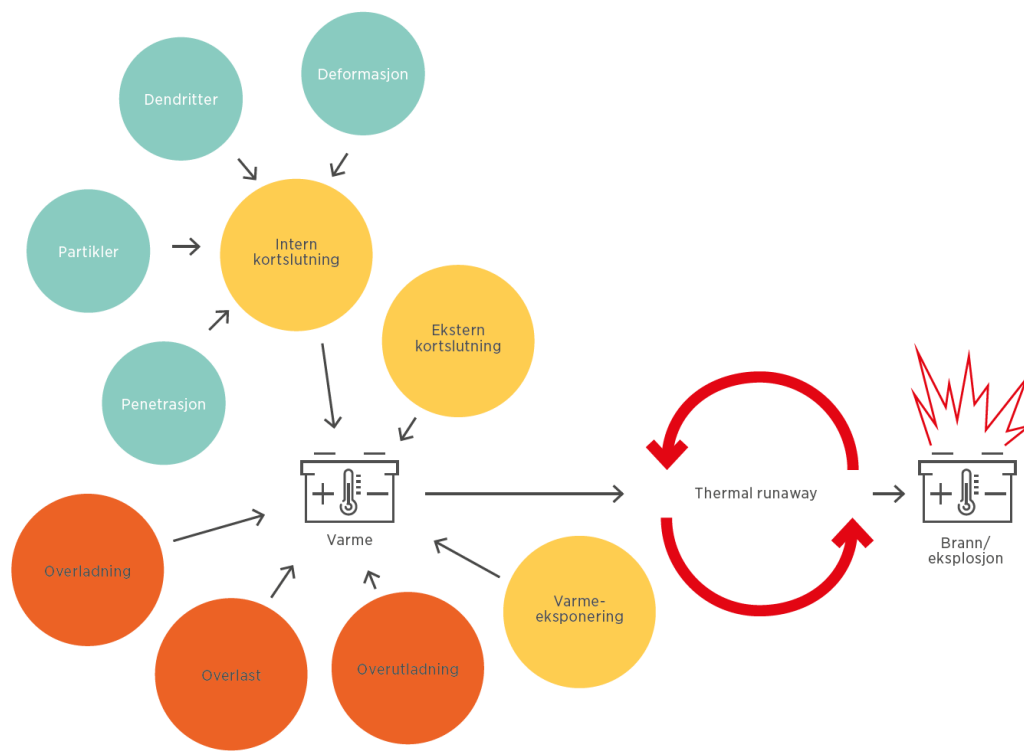
2.1 Litium-ion batterier

Et litium-ion batteri er et oppladbart batteri med bundet litium i katoden på batteriet. Litium-ion batterier har høy energitetthet og kan lades og utlades effektivt sammenlignet med andre batteriteknologier, slik som blybatterier. Slike batterier brukes i dag i mange ulike områder av samfunnet, fra små batterier inni PC-en, mobilen eller kameraet, til litt større batterier i elsparkesykler, ståbrett eller ståhjulinger, til store batteripakker i elbilen eller i energilagringssystemer i bygg.

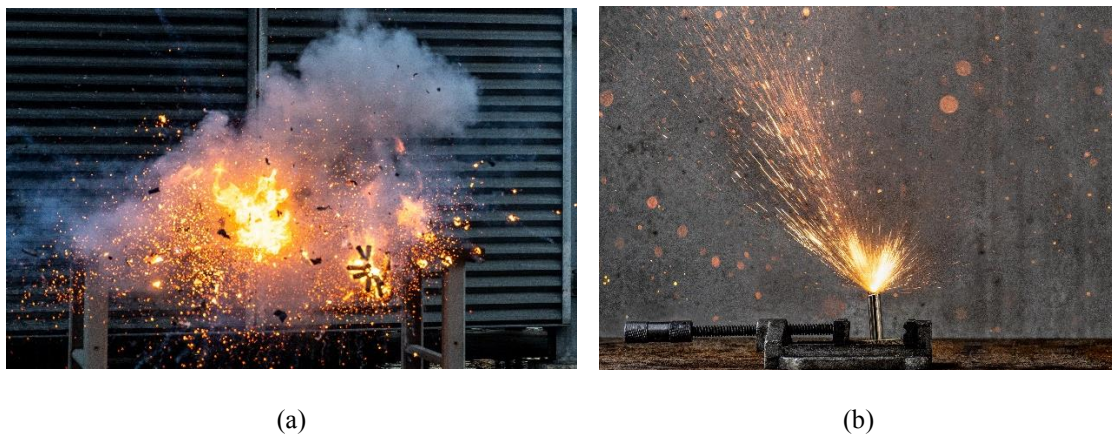
Kapasiteten på elsparkesykkel-batterier på markedet er typisk lignende som eller litt i underkant av elsykkelbatterier (typisk 400-700 Wh ifølge eBikesHQ.com [11]), noe som er en god del større enn et PC-batteri (typisk 30-90 Wh ifølge dell.com [12]), og mye mindre enn et elbilbatteri (alt mellom 35-95 000 Wh ifølge Elbilforum.no [13] og Teknisk Ukeblad [14]). I forbindelse med innkjøp av testobjekt til denne studien fant vi at kapasiteten på batteriet i elsparkesykkelen er nært knyttet til prisen på produktet: jo høyere kapasitet, jo høyere pris på elsparkesykkelen.

2.2 Brann i litium-ion batterier

Batterier har den egenskapen at de både kan være en antenneskilde og brennbar materiale. Feilmekanismer som kortslutning, overlading og overoppheting eller varmeeeksponering kan føre til såkalt thermal runaway i et litium-ion batteri. En oversikt over feilmekanismer som kan føre til thermal runaway er vist i Figur 2-1. En thermal runaway er en ukontrollerbar nedbryting av anoden, katoden og elektrolytten i en battericelle. Varmen og brennbar gass som utvikles under en thermal runaway kan føre til en brann som sprer seg fra batteriet til objekter i nærheten og omgivelsene rundt. En batteribrann kan være voldsom, det kan være jetflammer som kommer ut fra batteriet, brennende battericeller som kastes ut, brannen kan føre til utslipp av varme gnister, brennende væske og store mengder giftige og brennbare gasser, som igjen kan antenne i en eksplosjonslignende brann. Hvis gassen antennes forsinket, kan det også føre til en eksplosjon. Figur 2-2 viser hvordan en fremprovosert thermal runaway i et batteri kan se ut med brennende utkast i (a) og utslipp av gnister og gasser i (b). Mer informasjon om feilmekanismer og thermal runaway er å finne i tidligere RISE rapporter [15,16] og i DSBs veileder om batteribrann [17]. For elsparkesykler kan lading av batteriet utløse thermal runaway, dersom det er feil på enten batteriet eller laderen. Det fins også feilmekanismer som kan gjøre at thermal runaway skjer tilsynelatende uprovosert, for eksempel hvis batteriet tidligere har blitt skadet eller hvis det er produksjonsfeil på batteriet.



Figur 2-1: Oversikt over ulike årsaker til thermal runaway i batterier. Illustrasjon: Kurt Tofte Rusås, hentet fra [17], gjengitt med tillatelse fra DSB.



Figur 2-2: Eksempler på fremprovosert thermal runaway i batterier. (a) viser brennende deler som kastes ut og (b) viser utslipp av gnister og gasser. Foto: Bergen brannvesen, brukt med tillatelse.

Når det gjelder rømning ved en brann i et elsykkelbatteri, vil jetflammene som kommer ut av batteriet utgjøre en fare for personer i umiddelbar nærhet, men for personer som oppholder seg i rommet for øvrig vil det i tidlig fase ikke være varmen som utvikles som vil være mest problematisk, men heller røykutviklingen. Mengde og type røyk vil være avgjørende for rømningsforholdene. Dette er igjen avhengig av hvilken type batterikjemi det er snakk om, og

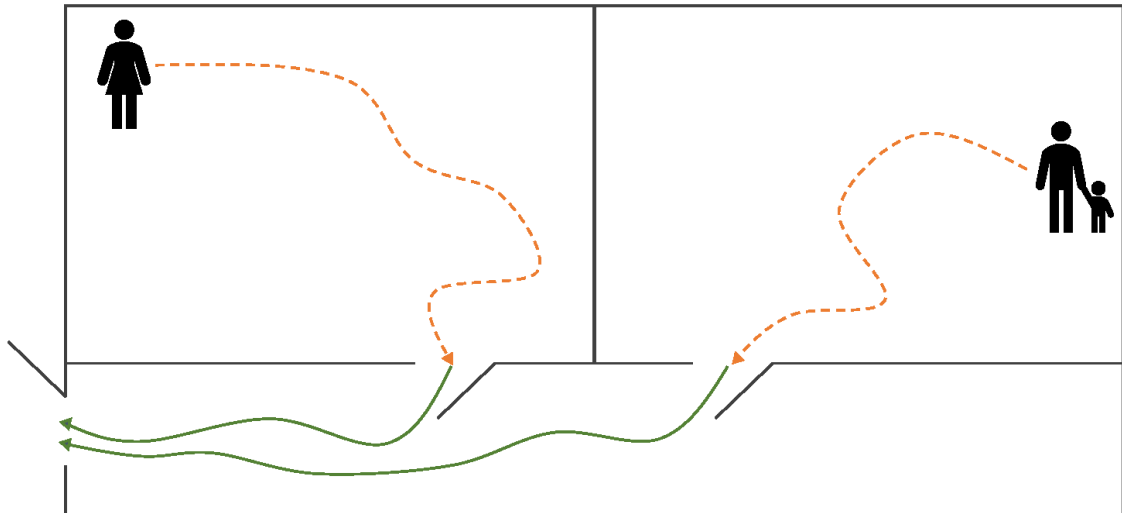
ladetilstanden på batteriet. En litteraturgjennomgang av gassmengde og sammensetning ved en thermal runaway i et batteri er presentert i RISE rapporten «Avgassing fra litium-ion batterier i hjemmet» [18]. Denne viser at avgassing inneholder mange ulike gasser: karbondioksid, brennbare komponenter som karbonmonoksid, ulike hydrokarboner, metanol og hydrogen, samt giftige komponenter som hydrogenfluorid, hydrogenklorid og hydrogencyanid. Avgassing utgjør også en eksplosjonsfare på grunn av den store andelen brennbare gasser (som for eksempel ca 30 % volumfraksjon hydrogen [18]).

2.3 Rømning og skadelig røyk

Rømning er en prosess hvor mennesker ved egen hjelp eller ved hjelp fra andre forflytter seg til et sikkert sted [19]. Man kan rømme gjennom fluktvei eller rømningsvei. Fluktvei er en del av en branncelle som brukes til rømning og evakuering fram til rømningsvei eller til sikkert sted [19]. En rømningsvei er én eller flere brannceller som er tilrettelagt for rømning fra der man oppholder seg og til et sikkert sted [19]. I et skolebygg hvor det er klasserom med korridor utenfor, og korridoren leder rett ut til frisk luft, så er klasserommet fluktveien og korridoren utenfor rømningsveien, som illustrert i Figur 2-3. I bygg med store, åpne rom slik som klasserom, åpent kontorlandskap eller gymsaler, må ofte en stor del av rømningen skje i fluktvei.

En rømningsvei skal ikke være en lagringsplass, og det er uheldig hvis elsparkesykler lagres eller lades i rømningsvei siden de, som tidligere nevnt, representerer både en mulig antenneskilde og brennbart materiale.

Hvis det brenner i en elsparkesykkel inne i et klasserom, vil det bli røyk i fluktveien, som igjen kan sive ut i korridoren og gjøre at det blir røyk i rømningsveien. Tilsvarende vil det hvis det brenner i en elsparkesykkel i korridoren utenfor, bli røyk i rømningsveien, som så kan sive inn i fluktveien. I begge tilfeller vil folk kunne bli eksponert for helseskadelig røyk ved rømning. Tilsvarende gjelder for kontorlokaler med lignende utforming eller andre publikumsbygg.



Figur 2-3: Illustrasjon av fluktvei (stiplede, oransje piler) og rømningsvei (heltrukket, grønne piler) fra et klasserom i et skolebygg. Hindringer i veien slik som pulter, reoler, hyller eller lignende gjør at man som regel ikke kan gå i en rett linje fra der man er til dit man skal.

Det er en vanlig misforståelse at sjikting av røyk gjør at det bare er røyk øverst i rommet, og ingen røyk langs gulvet, slik at det er trygt å krype langs gulvet for å rømme. Slike forhold finner vi kun i svært spesielle tilfeller. I de fleste branner hvor det er varm røyk, så vil røyken stige slik at det er *mindre* røyk langs gulvet, men luftbevegelser skapt for eksempel av folk i rommet eller ventilasjonsanlegg, gjør at det er nok turbulens til at røyken blander seg med den rene lufta. Det vil altså normalt være røyk i hele rommets tverrsnitt, i større eller mindre grad, særlig for større rom eller store takhøyder hvor brannrøyken kjøles ned og blandes med luft [20].

Hvor mye røyk som regnes som skadelig angis av ulike kritiske gassverdier. Standarden ISO 13571:2012 [9] angir kriterier for hva som regnes som livstruende nivåer av ulike gasskomponenter ved brann. Nivået for irriterende gasser angis som FEC («Fractional effective concentration»), og er konsentrasjonen som er relevant for utholdenhet eller evnen til å oppholde seg i et område som er eksponert til irriterende gasser. Nivået for kvelende gasser angis som FED («Fractional effective dose») og er dosen som er relevant for utholdenhet eller evnen til å oppholde seg i et område som er eksponert til kvelende gasser. For å vurdere tiden frem til at det ikke lengre er mulig å oppholde seg et sted (utholdenhet/tenability), brukes det i denne studien en grenseverdi for FEC og FED på 0,1. Det betyr tiden det tar før 1% av den generelle befolkningen blir påvirket. Mer om menneskers tålegrense og beregning av tiden til kritisk eksponering er å finne i RISE rapporten «Avgassing fra litium-ion batterier i hjemmet» [18].

3 Statistikk, eksempler på hendelser og løsninger

3.1 Statistikk, relevante batterihendelser

Statistikk over relevante branner i batterier per 2021 er presentert i RISE rapporten «Avgassing fra litium-ion batterier i hjemmet» [18]. Gjennomgangen viser at det har vært noen titalls slike hendelser i Norge: totalt 28 hendelser knyttet til brann eller røykutvikling i «Andre elektriske maskiner – forbrukerprodukter», hvorav 15 relatert til «balansebrett/ståbrett» eller «elsykkel». Videre ble det funnet at elsykler, elsparkesykler og balanse-/ståbrett i hovedsak oppbevares og lades i gang/inngangsparti i hus, eller i garasje og kjeller. For lette produkter som er lette å flytte, var det større variasjon på lokasjon for brannstart.

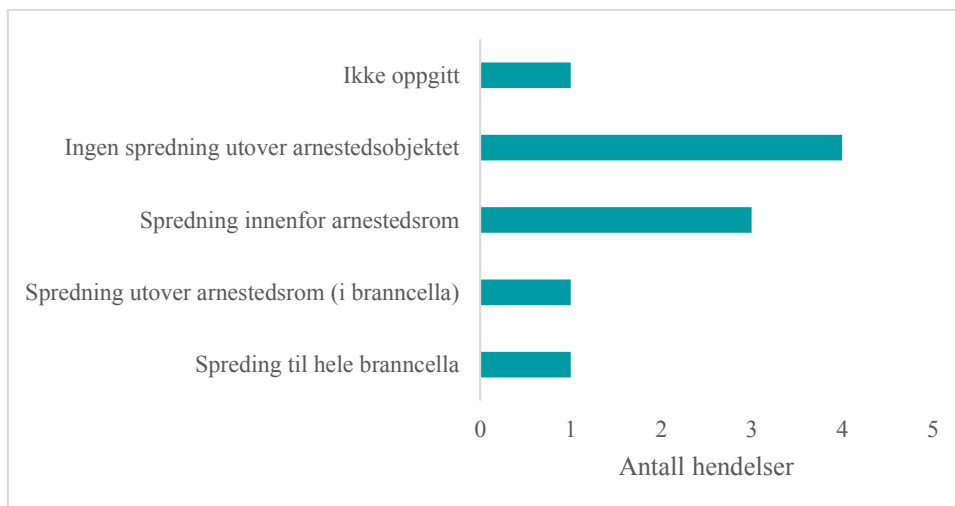
Ut fra gjennomgangen per 2021 ovenfor, og gjennomgangen av hendelser i Bergen presentert i neste avsnitt, har det til nå ikke vært hendelser i Norge med svært alvorlige konsekvenser for liv og helse knyttet til branner i elsparkesykler. Med et økende antall slike produkter på markedet, både eid av privatpersoner og utleieselskap, kan det forventes at det vil også være et økende antall branner og potensielt også med større konsekvenser for liv og helse. Fra USA kan man finne flere eksempler på branner som har startet i en elsparkesykkel hvor liv har gått tapt, og ifølge CBS News melder amerikanske myndigheter om 19 dødsfall i 2022 [21].

3.2 Eksempler på branner i elsparkesykler i Bergen

I dette avsnittet er eksempler på nylige branner i Bergen som har startet i elsparkesykler presentert, for å gi litt mer detaljert informasjon om slike branner. Bergen brannvesen har registrert 22 hendelser med brann i elsparkesykkelbatterier og elsparkesykler i perioden fra november 2019 til september 2022, hvorav det var én hendelse på slutten av 2019, 3 hendelser i 2020, 11 hendelser i 2021 og 7 hendelser frem til september 2022.

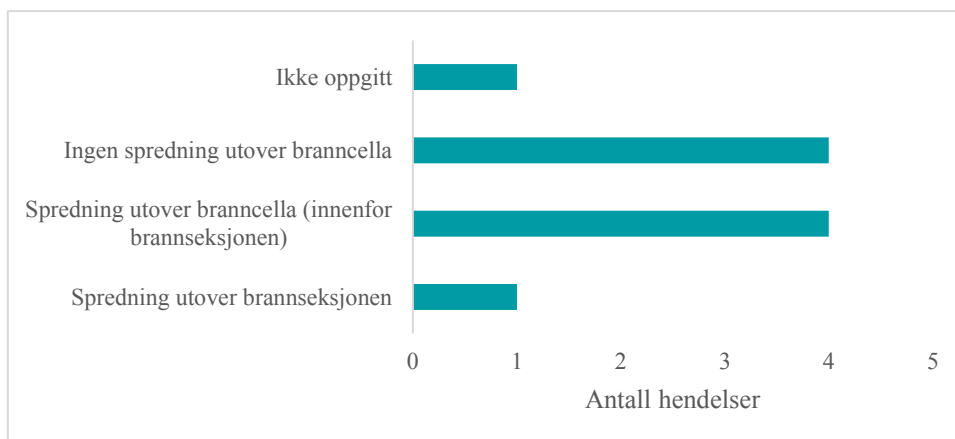
I fire av disse hendelsene var elsparkesykkelen plassert utendørs da det begynte å brenne. I sju av hendelsene var ikke batteriet tilkoblet elsparkesykkelen, men brannen oppsto i et elsparkesykkelbatteri som enten ble oppbevart eller ble ladet. I én av hendelsene er det usikkert om batteriet var tilkoblet sykkelen eller ikke.

De resterende 10 brannene oppstod mens batteriet var montert i en elsparkesykkel oppbevart innendørs. Hvorvidt brannen har spredt seg fra der den startet (arnestedsobjektet, dvs elsparkesykkelen) og til andre steder i rommet eller videre igjen er avgjørende for hvor alvorlig en slik hendelse blir. Figur 3-1 viser oversikt over rapportert *brannspredning* for de 10 brannene i elsparkesykler innendørs. Av de 10 brannene var det fire hendelser hvor det var ingen spredning utover arnestedobjektet. Det var tre hendelser der brannen spredte seg innenfor arnestedsrommet. Det var én hendelse hvor brannen spredte seg utover arnestedsrommet, men ikke utover branncella. Det var én hendelse hvor brannen spredte seg til hele branncella. I én hendelse er det ikke oppgitt hvorvidt brannen spredte seg eller ikke. Det er altså ikke rapportert om brannspredning utover branncella der brannen startet for noen av hendelsene.



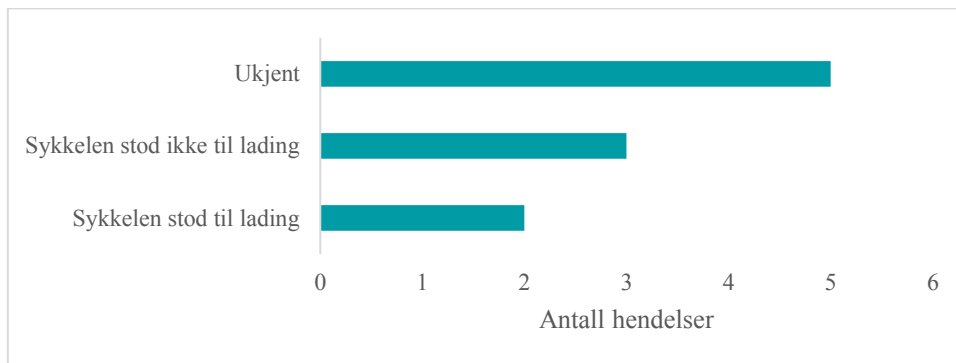
Figur 3-1 Fordeling av omfang av brannspredning for 10 hendelser med brann i elsparkesykkel innendørs, hvor elsparkesykkelen er arnestedsubjektet. Basert på data tilsendt fra Bergen brannvesen.

I tillegg til spredning av selve brannen, vil også røyken fra en slik brann spre seg i bygget og påvirke rømningsforholdene. Figur 3-2 viser oversikt over rapportert *røykspredning* for de 10 brannene med elsparkesykkel innendørs. I fire av brannene ble det ikke rapportert om røykspredning utover branncella. I fire av hendelsene spredte røyken seg utover branncella, men innenfor brannseksjonen. I én av hendelsene spredte røyken seg utover brannseksjonen. I én av hendelsene er det ikke gitt informasjon om evt røykspredning.



Figur 3-2 Fordeling av omfang av røykspredning for 10 hendelser med brann i elsparkesykkel innendørs, hvor elsparkesykkelen er arnestedsubjektet. Basert på data tilsendt fra Bergen brannvesen.

Informasjon om hvorvidt elsparkesyklene stod til lading eller ikke da de begynte å brenne er gjengitt i Figur 3-3 for de 10 brannene innendørs med batteriet montert i elsparkesykkelen. I tre av tilfellene stod sykkelen ikke til lading da det begynte å brenne mens den i to av tilfellene stod til lading. For de resterende fem tilfellene er ikke denne informasjonen oppgitt, eller det er usikkert hvorvidt sykkelen stod til lading eller ikke. I ett av tilfellene der elsparkesykkelen ikke stod til lading da brannen startet, er det oppgitt at elsparkesykkelen var ubrukt og kun hadde blitt ladet opp en gang.



Figur 3-3 Oversikt over hvorvidt elsparkesykkelen stod til lading eller ikke da den begynte å brenne. Basert på data tilsendt fra Bergen brannvesen.

Elsparkesykkelens plassering for de ulike brannene varierer. De fleste brannene der batteriet var plassert i elsparkesykkelen da det tok fyr skjedde i ulike boligbygninger, både rekkehus, enebolig, tomannsbolig og leilighetsbygg er nevnt. Elsparkesykkelens plassering inne i bygningene er rapportert å være gang, stue, kjeller eller soverom.

Figur 3-4 viser bilder fra to hendelser med brann i litium-ion batteri i små elektriske kjøretøy. Figur 3-4 (a) viser et ståbrett som har begynt å brenne utendørs, og Figur 3-4 (b) viser en elsparkesykkel som har begynt å brenne inne i en bod.



Figur 3-4: Eksempler på hendelser med brann i litium-ion batteri i små elektriske kjøretøy. (a) ståbrett som har tatt fyr utendørs og (b) elsparkesykkel som har tatt fyr inne i en bod (produktmerket er skjult på bildet). Foto: Bergen brannvesen, brukt med tillatelse.

Det er ikke meldt om personskade i noen av de 22 rapporterte hendelsene med brann i elsparkesykkel.

3.3 Eksempler på problemstillinger og løsninger

I dette avsnittet presenteres erfaringer hos Bergen brannvesen, både basert på hendelsene presentert i forrige avsnitt og deres generelle kunnskap på temaet.

Antennelse:

Batteriene i seg selv er en tennkilde. Varmgang, thermal runaway og brann kan oppstå når batteriet står til lading, men også når det ikke står til lading. Det fins mange ulike feilmekanismer som kan forårsake dette (se detaljer i avsnitt 2.2). Det kan også skje med et batteri som er helt nytt.

Brannforløp:

Dette er branner som blir veldig varme og utvikler relativt store røyk- og gassmengder. Denne typen branner utvikler seg fort og kan raskt spre seg hvis det er brennbare ting i nærheten.

Det er store forskjeller på kvaliteten på oppbyggingen av ulike elsparksykler, og hvilke sikkerhetsbarrierer som er på plass i batteriene. Det er også store forskjeller på kvalitet på det elektriske systemet, elektrisk montasje, motoren, selve batteriene og det totale energiinnholdet i batteriene, værbeskyttelse med mer. Dette gjør at det er store forskjeller mellom faren for antennelse, samt brannforløpet i ulike typer elsparksykler- når det gjelder mengde røyk/gass, hvor fort brannutviklingen går, og hvor mye utkast det er fra brannen.

Med utkast menes her at battericeller kastes ut fra elsparksykkelen under en brann. Dette skjer på grunn av at en battericelle kan revne når den blir varmet opp, noe som skjer raskt og kan ha nok energi til å kaste batteriet langt av gårde. Bergen brannvesen har observert battericeller som har blitt kastet opp til 50 meter vekk fra startbrannen. I den eksperimentelle studien presentert i kapittel 5 ble det observert utkast på opptil 9 meter. Battericellene som er kastet ut og lander langt vekk er som regel ferdig med den mest voldsomme delen av brannforløpet. Det er likevel ofte en restbrann der elektrolytt, plast, isolasjonsmateriale eller annet brenner, noe som igjen kan antenne brennbart materiale i nærheten og føre til brannspredning.

I tillegg til brennende utkast, representerer startbrannen i elsparksykkelen en fare for brannspredning. Den mest intense delen av brannforløpet foregår i batteriene i selve elsparksykkelen, og denne intense brannen kan sette fyr på det meste i umiddelbar nærhet.

Bergen brannvesen har vært utkalt til flere nylige branner i elsparksykelbatterier som ikke er tilkoblet, men som er lagret samlet, for eksempel på en palle i et lagerbygg. Observasjoner av disse brannene viser at dette er svært voldsomme branner, med stort potensiale for brannspredning. Hvis en slik hendelse hadde skjedd for eksempel i et skolebygg eller et sykehus så ville det fått store konsekvenser for folk som oppholder seg i bygget.

Konsekvenser for rømning:

For lokaler som skoler, idrettsanlegg eller kontorlandskap er det en fordel for rømning både at folk er våkne når de oppholder seg der, at det er store arealer som ofte har røykvarslere og at det ofte er flere tilgjengelige rømningsveier.

I et stort rom vil røyken fra en brann i en elsparksykel ha større volum å spre seg på enn i et lite rom, og røyken vil fortere bli uttynnet. I et mindre rom, slik som en korridor eller et

soverom vil den samme mengde røyk kunne være mer skadelig og kunne ha større konsekvenser for rømning.

Denne typen brann lager en del lyd og ser ikke ut som en tradisjonell brann, men har en intens brannutvikling, tidvise jetflammer og utkast av brennende battericeller. Det kan føre til at folk endrer adferdsmønster, noe som kan påvirke rømning.

Brannsløkking:

Veilederen «Risikovurdering og håndtering av brann i Litium-ion batterier» [17] som ble utgitt av DSB i 2021 er sentral for slokkeinnsatsen til brann- og redningsvesen ved en batteribrann. Batteribranner deles her inn i fire risikonivå ut fra energilagringsskapiteten til batteriet, samt romstørrelsen der det brenner. Dette gir et bilde av eksplosjonsrisikoen. Praktiske råd, tiltak og anbefalinger for slokkeinnsats for de ulike risikonivåene er beskrevet i veilederen. Brann i en elsparkesykkel vil være på det laveste nivået, risikonivå 1 med enkle og små branner som alle brannvesen skal kunne håndtere.

Batterier som har vært involvert i en brann bør uskadeliggjøres i etterkant. Det kan gjøres ved å kjøle de ned (krevende) eller lade de ut, for eksempel i saltvann.

Tiltak og tips:

I samtale med Bergen brannvesen ble det også diskutert tiltak, tips og anbefalinger som man kan gi til byggeier og til den generelle befolkningen. Disse er sammenstilt med resultater fra andre deler av denne studien og presentert i kapittel 7.

4 Metode og forsøksbeskrivelse

For å undersøke hvordan en brann i en elektrisk elsparkesykkelen som oppbevares innendørs i en flukt- eller rømningsvei påvirker flukt- og rømningsforholdene er det gjennomført en serie på 6 brannforsøk i et oppsett bygget for å simulere en skole. Forsøkene er også representativ for andre bygg med lignende utforming. Basert på måledata og video fra disse forsøkene er det vurdert hvordan rømningsforholdene påvirkes av en brann i en elektrisk elsparkesykkelen. Det eksperimentelle oppsettet og målemetodene som er brukt beskrives i dette kapittelet.

4.1 Forsøksoppsett

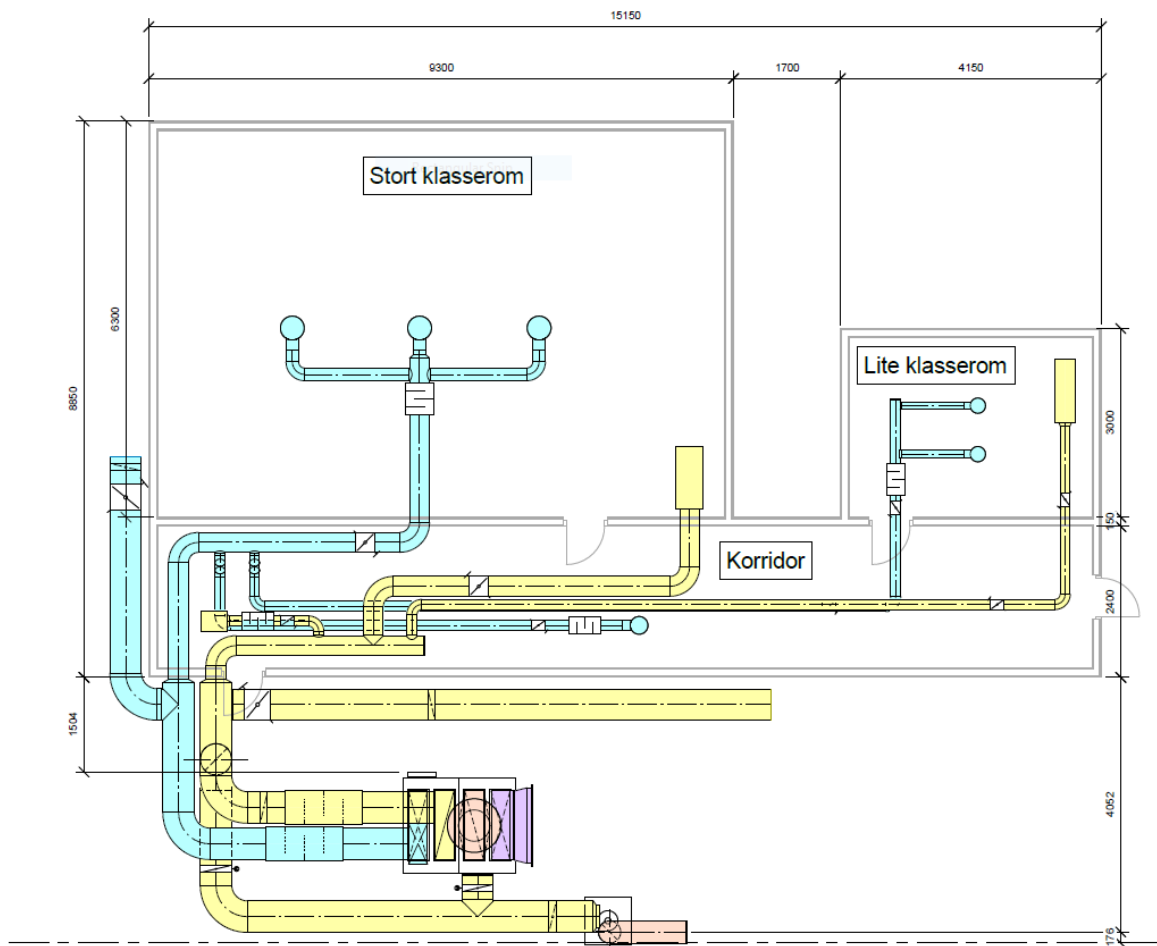
Testbygningen som ble bygget for å simulere en skole er vist i Figur 4-1. Byggingen av forsøksoppsettet ble gjort i samarbeid med BRAVENT-prosjektet (brann og røykspredning i ventilasjonskanaler) [22], og bygningen hadde derfor tre rom og et fullverdig komfortventilasjonsanlegg. Bygningen bestod av et klasserom på 55 m², et kontor på 13 m² og en 15 m lang korridor på 38 m². På bildet vises kontoret til venstre og klasserommet til høyre. Døra på venstre sida av bygningen går inn til korridoren som ligger i bakkant av bygningen. Bygningen ble bygget direkte på eksisterende betongdekke på testområdet til RISE Fire Research utendørs. Dette dekket har en slak helning mot en kulvert, mens taket er i vater. Innvendig takhøyde i bygningen varierte som følge av dette mellom 3,01 m og 3,18 m. For korridoren var variasjonen 5 cm fra laveste takhøyde på 3,01 m til høyeste takhøyde på 3,06 m. For klasserommet var variasjonen 12 cm fra laveste takhøyde på 3,06 m til høyeste takhøyde på 3,18 m. Figur 4-2 viser målsatt plantegning av bygningen.



Figur 4-1: Bilde av testbygning utvendig. Kontoret vises til venstre og klasserommet vises til høyre. Døra til venstre går inn i korridoren som ligger i bakkant på bildet.

Innvendig var reisverket på bygningen kledd med ett lag 12 mm tykke OSB plater og ett lag 12,5 mm tykke gipsplater. Gipsplatene var forskjøvet i forhold til OSB platene, slik at fugene ikke overlappet. Hjørner og skjøter med kappede flater av OSB ble tapet og skjøtene mellom gipsplatene ble fuget med Fire Bond Gap Seal+. Veggene var uisolerte, og reisverket var ikke kledd på utsiden. Yttertaket bestod av korrugerte stålplater. Under disse var taket isolert med Rockwool FLEXI A-PLATE TRD. Tykkelsen på isolasjonen var rund 120 mm i korridoren og

95 mm i klasserommet og kontoret. Videre bestod taket av 12 mm tykke OSB plater. Disse var beskyttet mot varmen fra brannene med 30 mm tykker SeaRox plater på undersiden. Det var brukt EI30 branndører både som ytterdører og mellom rommene i oppsettet.



Figur 4-2: Målsatt skisse av oppsett bygningen med installert ventilasjonsanlegg. Blå kanaler er tilluft og gule kanaler er avtrekk. Mål er oppgitt i mm. Illustrasjon: BRAVENT.

Ventilasjonsanlegget er også tegnet inn i Figur 4-2. Tilluftskanalene er vist med blå farge og avtrekkskanalene er vist med gul farge i plantegningen i Figur 4-2. I tillegg til de tre nevnte rommene var ventilasjonssystemet prosjektert til å også dekke ytterligere 300 m², altså de delene av skolen som ikke var bygget. Ventilasjonsskanalene for luft til og fra resten av skolen gikk ut i friluft på utsiden av bygningen. Dette ble gjort for å oppnå så realistiske som mulige betingelser for ventilasjonssystemet. Ventilasjonssystemet var prosjektert ut ifra romstørrelse og bruk. Det mest relevante scenario for å undersøke rømning er et scenario hvor det er mange personer i bygget. I dette tilfelle vil ventilasjonssystemet automatisk øke luftmengden for å opprettholde et godt romklima. Derfor ble de maksimale prosjekterte luftmengdene til og fra rommene brukt for alle brannforsøkene, det vil si 900 m³/time for klasserommet og 200m³/time for korridoren.

4.2 Testobjekt

Det ble brukt 6 like elektriske sparkesykler. Syklene som ble brukt er en populær modell som ligger prissjiktet mellom 4 000 og 6 000 kr og er godkjent for bruk i Norge. Merke og modell holdes anonymt da det ikke er utført tester med ulike modeller fra ulike leverandører og det ikke er noe grunnlag for å vurdere om valgt modell skiller seg fra andre, konkurrerende modeller i noen grad når det kommer til brannutvikling og avgassing ved en thermal runaway i batteriet.

Syklene hadde et litium-ion batteri med en batterikapasitet på 370 Wh. Den fysiske størrelsen på batteriet i syklene var 31 cm x 9,2 cm x 4,5 cm. Batteriet bestod av såkalte 18650 celler, som er sylindriske celler med en diameter på 18 mm og en høyde på 65 mm. Den nominelle spenningen i batteriet er oppgitt å være 37 V. Det er ikke kjent hvilken batterikjemi dette batteriet har.

Det ble utført 3 forsøk med brann i elsparkesykkel i klasserommet og 3 forsøk med brann i elsparkesykkel i korridoren. Syklene ble i alle forsøkene plassert i et hjørne i rommet. Alle avstander mellom ulike målepunkt og elsparkesyklene er oppgitt som avstand langs gulvet, det tas altså ikke hensyn til sensorens plassering i høyden. Avstanden er målt frem til midt under elsparkesykkelens batteri.

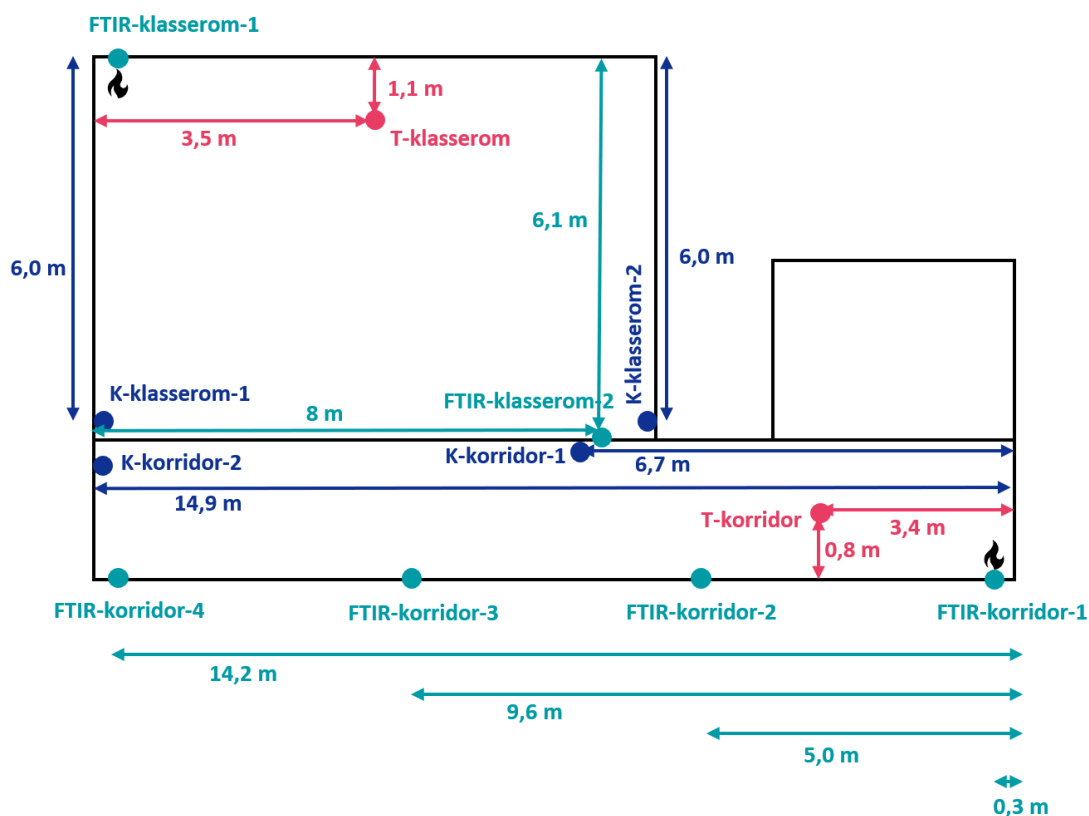
I tillegg til selve batteriet var det også andre deler på elsparkesykkelen som bestod av brennbare materialer, f.eks dekkene, håndtakene og plastledninger.

4.3 Instrumentering og målemetoder

Det ble brukt FTIR (Fourier-Transform Infrarød Spektroskopi) av typen Gasmet DX 4000 til å måle konsentrasjon av ulike gasser underveis i alle testene. Gassene som ble målt CO_2 , CO, HCl, HF, HCN, SO_2 , CH_2O , NO og NO_2 . I tillegg ble O_2 konsentrasjon målt med et innebygd Zirkonia celle instrument. Gassen ble trukket ut fra rommet gjennom kobberør med en indre diameter på 4 mm. Kobberørene var plassert 2,0 m over gulvet og stakk 10 cm ut fra veggen. Gasskonsentrasjonen ble logget hvert 7. sekund. Deteksjonsgrensa for gassene var i størrelsesordenen 10^0 ppm.

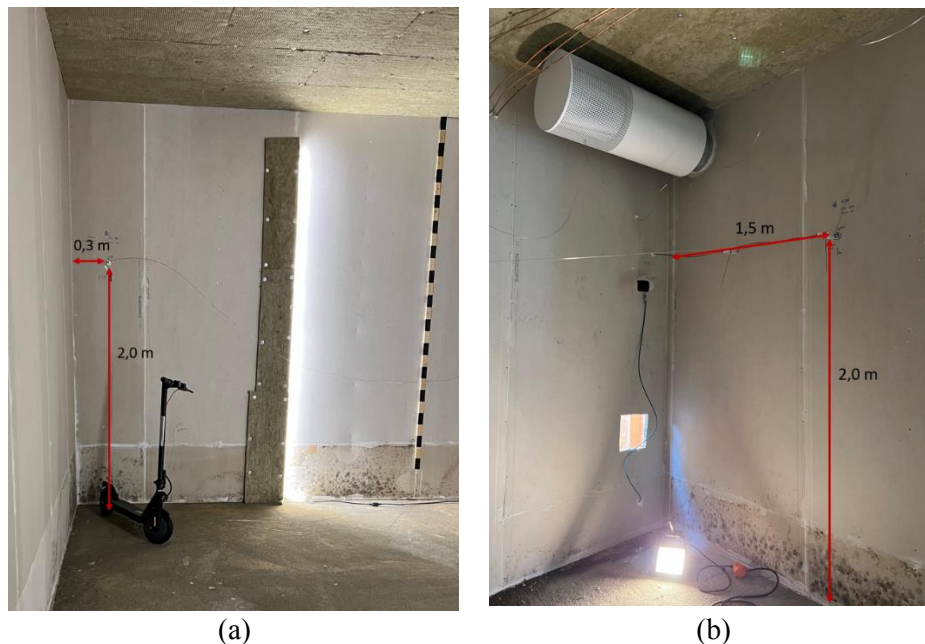
Det ble brukt to stk FTIR instrument, slik at gasskonsentrasjonen kunne måles i to ulike målepunkter i hver av testene. Det ene målepunktet var plassert rett ved elsparkesykkelen og det andre lenger unna.

For testene i korridoren ble plasseringen av målepunktet lengst unna elsparkesykkelen endret mellom hvert forsøk slik at det i korridoren ble målt gasskonsentrasjon i til sammen 4 ulike punkter for de tre forsøkene. De ulike plasseringene av gassmålepunktene er vist med lyseblå prikker i Figur 4-3. I samme figur angir flammen elsparkesykkelens plassering. Avstanden mellom FTIR-korridor-2 og elsparkesykkelen var 4,4 m. Avstanden mellom hver av de fire gassmålepunktene i korridoren var 4,8 m. «FTIR-korridor-1» og «FTIR-korridor-4» var begge plassert 30 cm fra hjørnet av rommet.



Figur 4-3: Plassering av kamera (K), temperatursensorer (T) og FTIR målepunkt (FTIR) vist med prikker og plassering elsparkesyklene er vist med flammer. Oppgitte avstander i figuren er fra målepunkt til vegg.

For testene i klasserommet ble ikke plasseringen av gassmålepunktene endret undervegs i forsøksserien. Figur 4-4 (a) viser bilde av elsparkesykkelen og gassmålepunktet «FTIR-klasserom-1». Gassmålepunktet er plassert 30 cm fra hjørnet. Figur 4-4 (b) viser bilde av gassmålepunktet «FTIR-klasserom-2». Dette er plassert i samme hjørne som avtrekksventilen (se Figur 4-2), og i en avstand på 1,5 m fra hjørnet. Dørkarmen vises så vidt i høyre bildekant i (b). Avstanden fra elsparkesykkelen til «FTIR-klasserom-2» var 9,4 meter.



Figur 4-4: Plassering av gassmålepunktene i klasserommet. (a) viser målepunktet rett ved elsparkesykkelen, FTIR-klasserom-1, og (b) viser målepunktet på motsatt side av rommet, FTIR-klasserom-2, ved døra som så vidt vises i høyre bildekant. Begge gassmålepunktene var plassert 2 m over gulvet og stakk 10 cm ut fra veggen. Avtrekksventilen er vist oppe i venstre hjørne i (b).

Temperaturen ble målt flere ulike steder i rommene med termoelement av type K. På undersida av elsparkesykkelen ble temperaturen målt ved gassflammen som ble brukt for å sette i gang den termiske hendelsen. Dette termoelementet var plassert midt under batteriet, i en avstand på 4 cm fra undersida av batteriet. Temperaturen ble også målt i ulike høyder i rommene ved å montere termoelement i en kjetting hengende fra taket. Temperaturen ble her målt 0,01 m, 0,35 m, 1,00 m, og 2,00 m fra taket. I klasserommet var denne kjettingen plassert 3,1 m fra elsparkesykkelen, mens den i korridoren var plassert 3,0 m fra elsparkesykkelen. Plasseringen til kjettingene er tegnet inn med rosa prikker i Figur 4-3. I tillegg ble temperaturen også målt med termoelementer plassert ved gassmålepunktene. Temperaturene ble logget hvert 4. sekund.

For å dokumentere brannforløpet ble to videokamera brukt i hvert av rommene. Plasseringen av disse er vist med mørkeblå prikker i Figur 4-3. Kamera «K-klasserom-1» var plassert 0,7 m over gulvet i en avstand på 5,4 m fra den elektriske elsparkesykkelen, og kamera «K-klasserom-2» var plassert 1,8 m over gulvet i en avstand på 9,9 m fra elsparkesykkelen. I korridoren var kamera «K-korridor-2» var plassert 2,1 m over gulvet i en avstand på 14,4 m fra elsparkesykkelen. Kamera «K-korridor-1» var plassert 0,8 m over gulvet i en avstand på 6,3 m fra elsparkesykkelen.

For å vurdere kvalitativt hvordan siktforholdene var ble det montert målestokker på veggene i rommene. Påmalte felt markerte hver 10. cm på disse målestokkene.

4.4 Prosedyre for antennelse av elsparksykkel

Hvordan det igangsettes thermal runaway i battericella kan ha en stor betydning for utviklingen av hendelsen og spredning til andre battericeller. Typiske metoder for å sette i gang thermal runaway i en celle er å varme den opp med et eksternt varmeelement, eksponere den for en flamme, penetrere den med en nagle (*nail penetration*) og overlading. Imidlertid har alle disse metodene fordeler og ulemper. En detaljert diskusjon av disse finnes for eksempel i Bisschop et al. [23]. Kort oppsummert for denne studien:

Overlading og oppvarming med et varmeelement krever at man modifiserer batteriet, enten for å deaktivere batterihåndteringssystemet (BMS, *battery management system*) som i utgangspunktet skal forhindre overlading eller for å få plass til varmeelementer. Dette krever god kjennskap til batteriet og/eller et samarbeid med batteriprodusenten, noe som ikke var til stede for disse forsøkene.

Nail penetration er vanskeligere å kontrollere og er mindre repeterbar enn de andre metodene og ble derfor ikke valgt for brannforsøkene.

Eksponering av en flamme har vist god repeterbarhet i andre forsøk [23] og er enkelt å kontrollere. Et viktig aspekt for brannforsøkene som ble gjennomført i lukkede rom er at eksponeringen av en flamme fra en brenner med større sikkerhet fører til en thermal runaway og tidlig antenning av gassene siden brenneren kan stå på over lengre tid og gjennom hele forsøket. Dette bidrar til å redusere eksplosjonsfaren og er hovedgrunnen for at denne metoden ble valgt for brannforsøkene. Den garanterte antenningen av gassene representerer imidlertid også en ulempe med denne metoden, siden forsøkene er mindre representative for hendelser hvor avgassingene fra batteriet ikke antenner (gassdispersjon uten brann) eller antenner forsinket (eksplosjon).

For den brukte sykkeltypen var batteriet plassert i plattformen man står på. Utenom et deksel på undersiden var denne delen av elsparksykkelen laget av metall. Dette dekselet var laget av et plastmateriale og ble tatt bort før testene. Dette ble gjort for å ha muligheten til å varme direkte på batteriet og for å redusere mengden av andre materialer som kunne bidra til brannutviklinga før selve batteriet har begynt å reagere. I et virkelig brannscenario vil gassene produsert av plastbrannen fra dekselet komme i tillegg til de målte gassene i forsøket. Det anmerkes at det også finnes elsparksykler som bruker metalldeksler på undersiden av batteriet.

Oppvarmingen ble gjort med en liten gassflamme. Gassrøret var plassert midt under batteriet i en avstand på omtrent 4 cm fra underkanten av batteriet. Flammen brant i 19 minutter for alle testene. Effekten av denne pilotflammen er beregnet til å være mellom 450 og 750 W basert på vekten av gassen som ble forbrukt. Figur 4-5 viser pilotflammens plassering og størrelse.

Etter at pilotflammen var tent, ble alle dører i bygningen lukket. Dørene ble holdt lukket gjennom hele forsøkene, og spredning av røyk fra brannrommet var ikke en del av studien. Alle målinger og observasjoner er derfor bare utført i rommet hvor elsparksykkelen brant.

Alle syklene hadde 100% SOC (state of charge), det vil si at de var fulladede da forsøkene ble satt i gang.



Figur 4-5: Bilde som viser startbrannen som satte i gang den termiske hendelsen i batteriet på elsparkesykkelen.

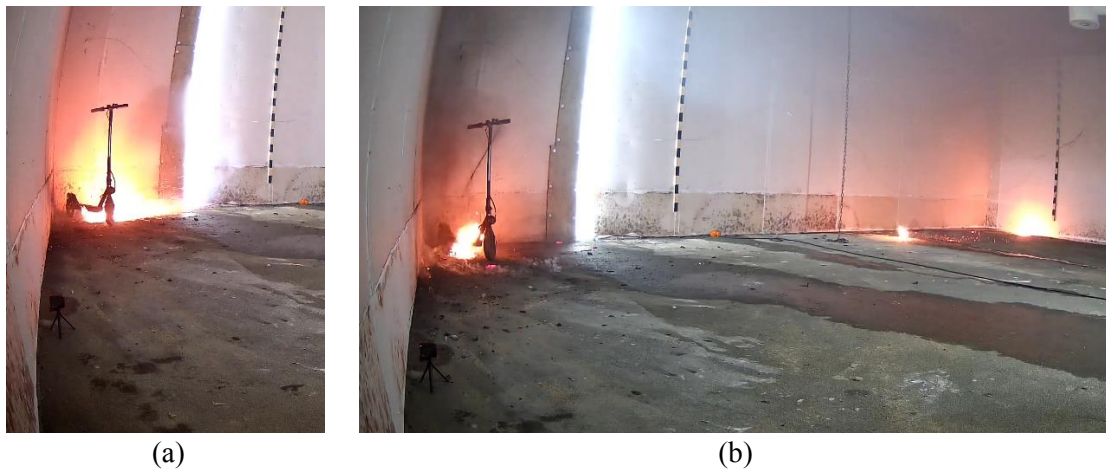
5 Resultater

Dette kapittelet presenterer resultatene fra brannforsøkene. Resultatene diskuteres videre i kapittel 6.

5.1 Brannforløp i elsparkesykkelen

Den termiske hendelsen ble satt i gang med en liten gassflamme fra undersida av batteriet, som beskrevet i forrige kapittel. I starten brant denne pilotflammen helt rolig i alle forsøkene, men etter en stund ble det observert brennende dråper som dryppa fra elsparkesykkelen i området rundt flammen. Dette er antakelig plastmaterialet rundt batteriet som brenner. Samtidig som dette skjedde ble også brannen noe større. Dette skjedde mellom 42 og 65 sekunder etter at pilotflammen ble tent for de seks forsøkene.

Mellom 4 minutter og 10 sekunder og 4 minutter og 58 sekunder etter pilotflammen ble tent endret brannen seg plutselig og det ble en eksplosjonsartet brann med utsending av gnister og en fresende oppførsel som vist i Figur 5-1 (a). Det ble også observert utkast av brennende deler i stor fart bort fra elsparkesykkelen. Disse brennende delene ble kastet både opp i taket og helt til andre enden av klasserommet, 9 meter unna elsparkesykkelen, som vist i Figur 5-1 (b). Ut fra tidligere erfaringer, er det antatt at disse brennende delene var battericeller.



Figur 5-1: Foto som viser (a) den eksplosjonsartede brannen som oppstod i batteriene ca 5 minutter etter at pilotflammen ble tent, og i (b) brennende deler som ble slengt 9 m unna til den andre enden av klasserommet 30 sekunder etter at den eksplosjonsartede brannen startet.

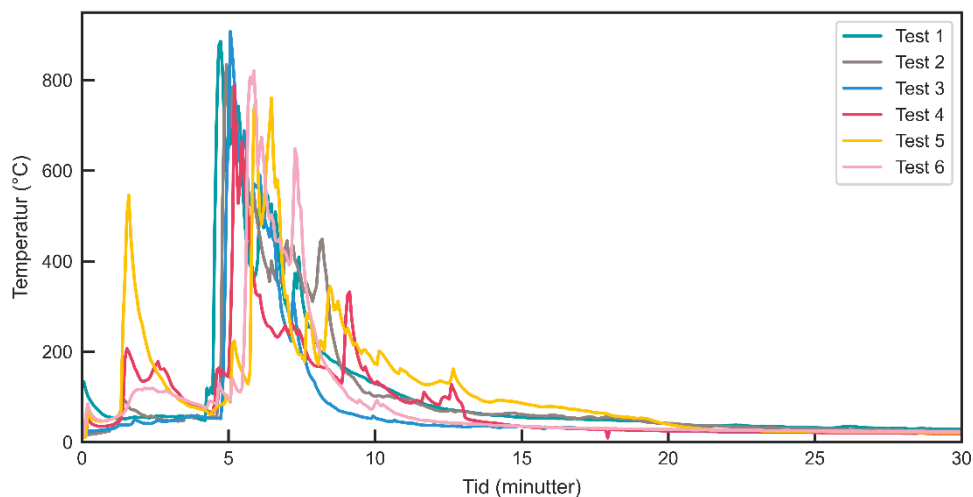
Varigheten på den eksplosjonsartede brannen var mellom 3 minutter og 17 sekunder og 7 minutter og 15 sekunder for de ulike forsøkene. Innen 3,5 minutter etter siste eksplosjonsaktige oppførsel i batteriet hadde hele brannen dødd ut i alle forsøkene utenom Test 5. I test 5 begynte det også å brenne i framhjulet og det brant der i ca 30 minutter etter siste eksplosjonsaktige oppførsel i batteriet.

Tidspunkt for de nevnte milepælene er gitt i Tabell 5-1 for alle forsøkene.

Tabell 5-1: Oversikt over tidspunkt for ulike milepæler i brannutviklinga for de seks utførte forsøkene.

	Tid fra pilotflammen tennes til start drypping av brennende materiale fra undersida av elsparkesykkelen (min:sek)	Tid fra pilotflammen tennes til den eksplosjonsartede brannen startet (min:sek)	Varighet på den eksplosjonsartede brannen (min:sek)
Test 1	00:42	04:10	03:28
Test 2	00:51	04:28	03:39
Test 3	00:46	04:37	05:51
Test 4	00:51	04:21	05:30
Test 5	01:05	04:58	03:17
Test 6	00:58	04:10	07:15

Temperaturutviklinga i målepunktet 4 cm under batteriet er vist i Figur 5-2 for alle forsøkene. Her ser man en kraftig temperaturøkning etter omtrent 5 minutter for alle testene, noe som samsvarer med tidspunktet for første eksplosjonsartede oppførsel i batteriene. Man ser også at de høyeste temperaturene ved batteriet ble målt i starten av brannforløpet og temperaturen viser en avtagende trend etter dette. Den høyeste temperaturen som ble målt var 907 °C i T



Figur 5-2: Temperaturutvikling som funksjon av tid, 4 cm på undersida av batteriet fra startbrannen ble igangsatt, for de seks utførte forsøkene.

En thermal runaway karakteriseres av at varmen som generes i en litium-ion battericelle er flere ganger høyere enn varmen cella avgir til omgivelsen. Starten av en thermal runaway er ofte definert som tidspunktet hvor selvoppvarmingsraten er $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ eller mer. For å bruke dette kriteriet er det nødvendig å måle celletemperaturen. Dette var ikke tilgjengelig i brannforsøkene og tidspunktet når den første cella starter å ventilere gassene ble derfor brukt som referansepunkt. Ventileringen begynner når trykket i en celle blir så høyt at cella sprekker og gassene fra cella slipper ut. Denne eksplosjonsaktige hendelsen er tydelig observerbar i videoopptakene fra brannforsøkene og brukes altså som nullpunkt for videre analyser.

Etter brannene hadde slokket ble sparkesyklene hentet ut og de utbrente battericellene samlet sammen.

Figur 5-3 viser de utbrente battericellene fra Test 5.

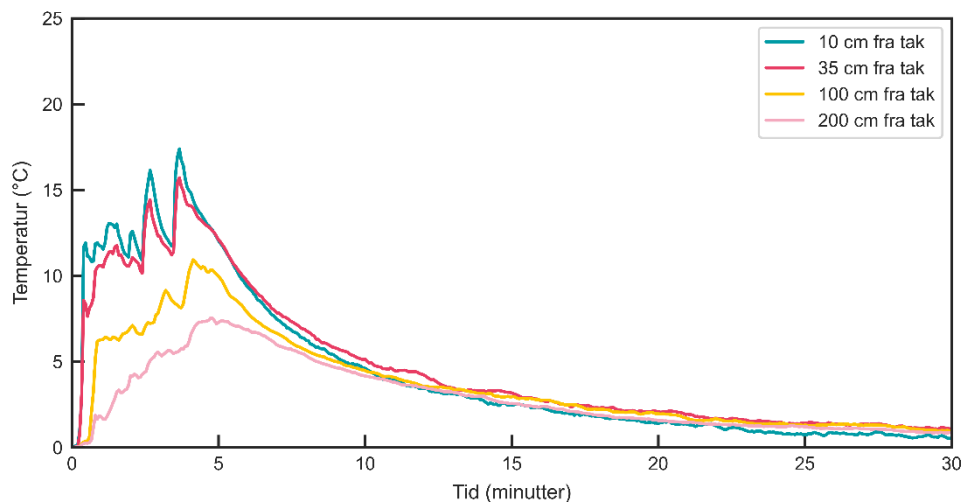


Figur 5-3: Oppbrente battericeller samlet sammen etter Test 5.

5.2 Temperaturutvikling i rommet

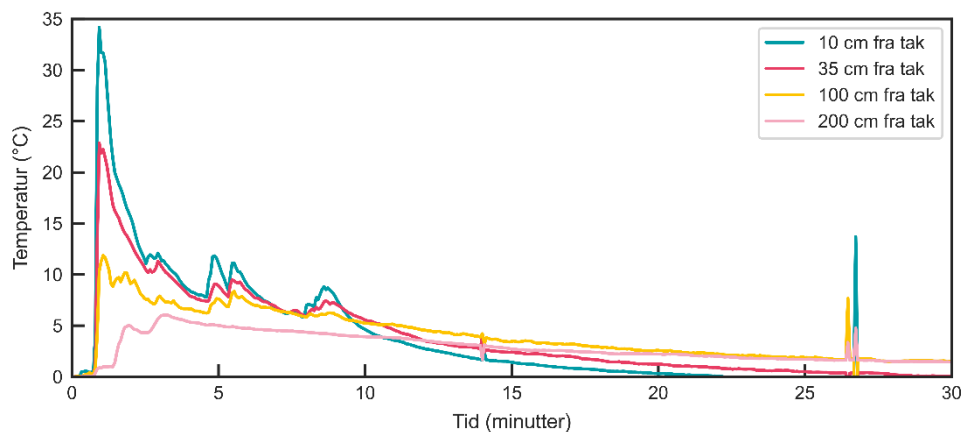
Figur 5-4 viser hvordan temperaturen endret seg i ulike høyder i klasserommet for Test 2. Test 2 er brukt som eksempel da lignende trend ble observert i de andre to forsøkene i klasserommet også. Tiden er gitt fra den eksplosjonsartede brannen startet. Termoelementene var montert i en kjetting hengende fra taket, og denne var plassert 3,1 m fra elsparkesykkelen. Det registreres kun moderate temperaturøkninger som følge av brannen i elsparkesykkelen.

Temperaturøkningen var størst nærmest taket og avtok med økt avstand fra taket. 10 cm under taket ble det målt en temperaturøkning på 17 °C omtrent 4 minutter etter at den eksplosjonsartede brannen startet.



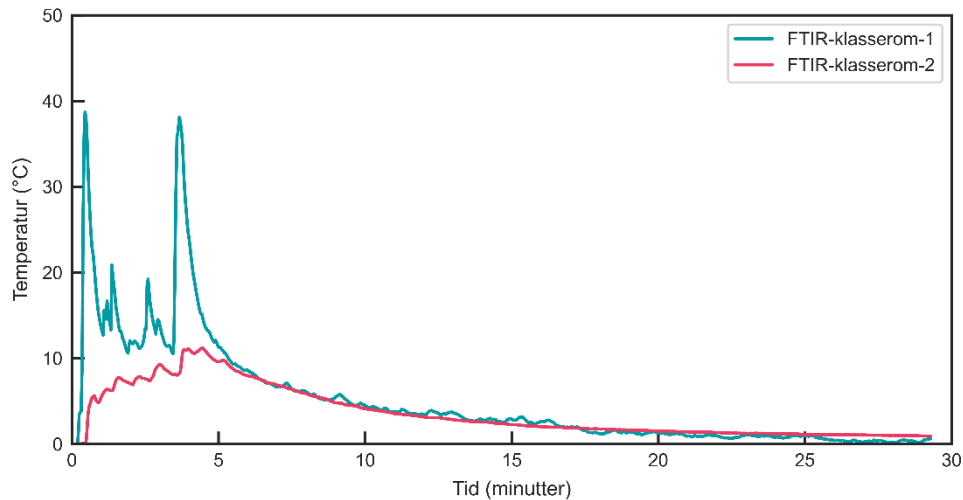
Figur 5-4: Temperaturøkning i ulike avstander fra taket for Test 2 i klasserommet etter at den eksplosjonsartede brannen startet.

Figur 5-5 viser temperaturendringen i ulike høyder i korridoren for Test 4. Termoelementene var montert i en kjetting hengende fra taket, og denne var plassert 3,0 m fra elsparkesykkelen. Også her registreres kun moderate temperaturendringer og man ser at temperaturøkningen faller med økt avstand fra taket. Den høyeste temperaturøkningen som ble målt var 34 °C. Toppene som er registrert etter ca 26 minutter skyldes trolig en feil med loggingen, men dette påvirker ikke resultatene fra forsøket.

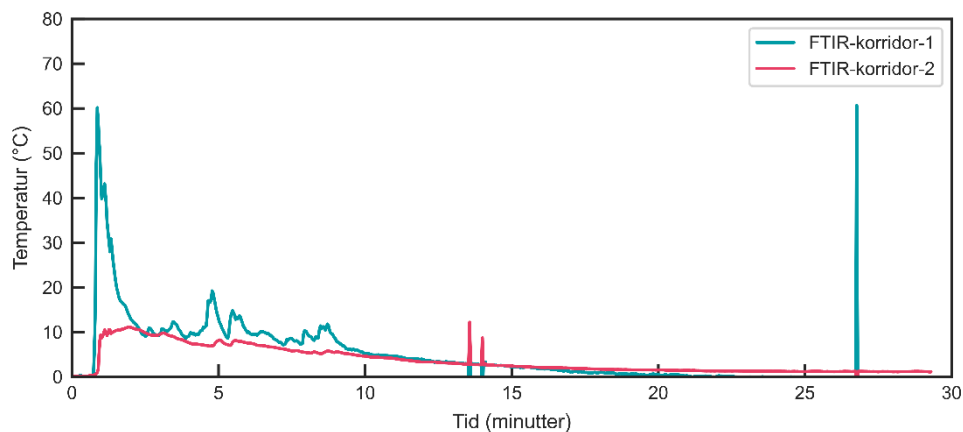


Figur 5-5: Temperaturøkning i ulike avstander fra taket for Test 4 i korridoren etter at den eksplosjonsartede brannen startet.

Temperaturen ble også målt ved de to gassmålepunktene i hver test. Figur 5-6 viser temperaturutviklingen ved de to gassmålepunktene for Test 2 i klasserommet og Figur 5-7 viser temperaturutviklingen ved de to gassmålepunktene for Test 4 i korridoren. Målepunktene FTIR-klasserom-1 og FTIR-korridor-1 var plassert 2 m over gulvet på veggen rett bak elsparkesykkelen, også her ble det kun registrert moderate temperaturøkninger. Målepunktene FTIR-klasserom-2 og FTIR-korridor-2 var plassert hhv 9,4 m og 4,4 m fra elsparkesykkelen i en høyde på 2 m over gulvet og her registreres kun små temperaturøkninger.



Figur 5-6: Temperaturøkning ved målepunktene for gasskonsentrasjon i Test 2 i klasserommet. Målepunktet FTIR-klasserom-1 er plassert rett ved elsparkesykkelen og målepunktet FTIR-klasserom-2 er plassert i andre enden av klasserommet, 8.5 m unna elsparkesykkelen. Begge målepunktene er plassert 2 m over gulvet.



Figur 5-7: Temperaturøkning ved målepunktene for gasskonsentrasjon i Test 4 i korridoren. Målepunktet FTIR-korridor-1 er plassert rett ved elsparkesykkelen og målepunktet FTIR-korridor-2 er plassert 4,4 m unna elsparkesykkelen. Begge målepunktene er plassert 2 m over gulvet.

5.3 Røykutvikling i rommet

Ved å studere videomaterialet kan siktforholdene i en flukt- eller rømingssituasjon vurderes. Det er hentet ut bilder fra videoene ved ulike tidspunkt i brannforløpet og disse presenteres for begge rommen i de kommende avsnittene.

5.3.1 I klasserommet

Figur 5-8 viser bilder fra Test 1 i klasserommet. Bildet i Figur 5-8 (a) er tatt ved første observasjon av eksplosjonsartet ventilering i battericellene. De påfølgende bildene i (b) – (e) er tatt med ett minutt mellomrom. Allerede etter ett minutt (b) ser man i at det begynner å legge seg røyk i øverste del av rommet. Etter to minutter (c) er røyken tettere og fyller også en større del av rommet. Nå ser man bare så vidt den helt nederste delen av målestaven montert på veggen til høyre i bildet. Etter tre minutter (d) ser man ikke lenger noe av målestaven til høyre. Avstanden fra kameraet til denne målestaven er 10 m. Det er nå også blitt vanskelig å se målestaven til venstre i bildet, avstanden mellom denne og kameraet er 6,7 m. Etter fire minutter (e) blitt vanskelig å se både elsparkesykkelen og ledningen som ligger på gulvet.



(a) Ved første observasjon av eksplosjonsartet ventilering i battericellene.



(b) 1 minutt etter bilde (a).



(c) 2 minutter etter bilde (a).



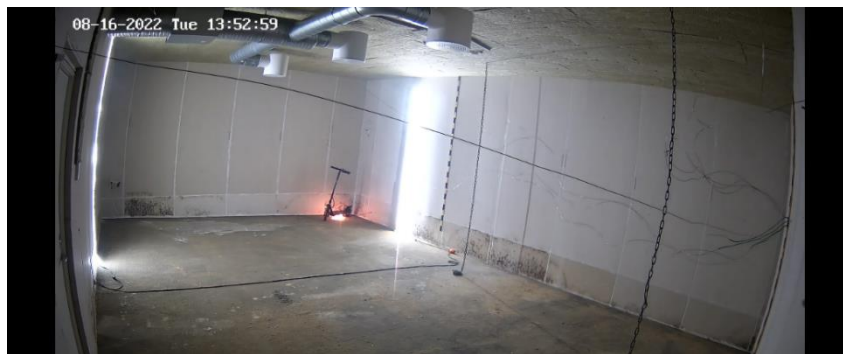
(d) 3 minutter etter bilde (a).



(e) 4 minutter etter bilde (a).

Figur 5-8: Bilder som viser røykutviklingen over tid for Test 1 i klasserommet. Første bildet i (a) viser første observasjon av eksplosjonsartet ventilering i battericellene. Bildene i (b), (c), (d) og (e) er tatt hhv 1, 2, 3 og 4 minutter etter bildet i (a).

Figur 5-9 viser røykutviklinga i same test og ved samme tidspunkt som i Figur 5-8, men fra en annen vinkel. Også denne kameravinkelen viser at heler rommet fylles av brannrøyk ila 2-3 minutter etter første observasjon av eksplosjonsartet ventilering i battericellene.



(a) Ved første eksplosjonsaktig ventilering i batteriet.



(b) 1 minutt etter første eksplosjon.



(c) 2 minutter etter første eksplosjon.



(d) 3 minutter etter første eksplosjon.

Figur 5-9: Bilder som viser røykutviklingen over til for Test 1 i klasserommet. Første bildet i (a) viser første observasjon av eksplosjonsartet ventilering i battericellene. Bildene i (b), (c), (d) og (e) er tatt hhv 1, 2, 3 og 4 minutter etter bildet i (a).

5.3.2 I korridoren

Figur 5-10 viser bilder fra Test 4 i korridoren tatt med ett minutt mellomrom. Kameraet er plassert 14.1 m fra elsparkesykkelen. Avstanden mellom de fire lyslistene nedover korridoren er 2,4 m. 0,5 m fremfor lyslista nærmest kameraet er det montert en målestav. Avstanden fra kameraet til denne målestaven er 5,8 m. Bildet i Figur 5-10 (a) er tatt ved første observasjon av eksplosjonsartet ventilering i battericellene, bildene i (b), (c) og (d) er tatt hhv 1, 2 og 3 minutter etter bildet i (a). Allerede etter ett minutt begynner korridoren å fylles med røyk, og man ser fra denne kameravinkelen ikke noen tydelige forskjeller mellom mengden røyk oppe ved taket eller nede ved gulvet. Etter 2 minutter ser man verken elsparkesykkelen eller brannen i batteriet fra denne avstanden. Etter 3 minutter ser man ikke lenger gjenstandene som står på gulvet i korridoren.



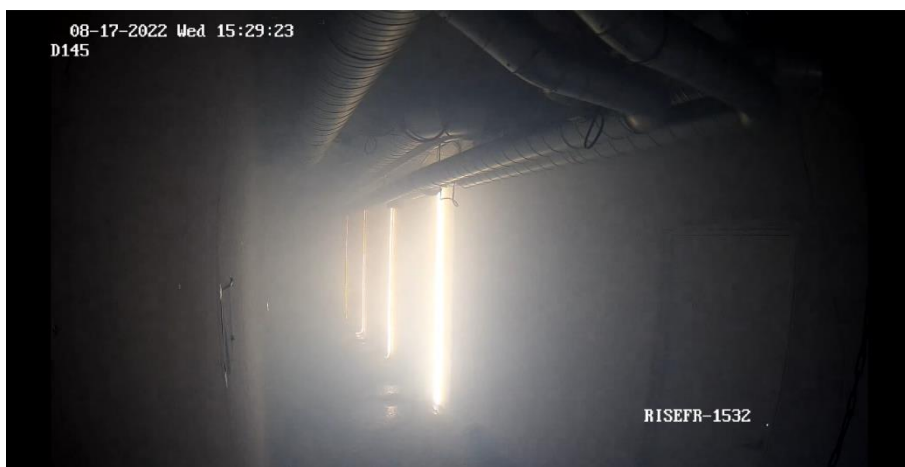
(a) Ved første eksplosjonsaktig ventilering i batteriet.



(b) 1 minutt etter (a).



(c) 2 minutter etter (a).



(d) 3 minutter etter (a).

Figur 5-10: Bilder som viser røykutviklingen over tid for Test 4 i korridoren. Første bildet i (a) viser første observasjon av eksplosjonsartet ventilering i battericellene. Bildene i (b), (c) og (d) er tatt hhv 1, 2 og 3 minutter etter bildet i (a).

Figur 5-11 viser røykutviklinga i samme test og ved samme tidspunkt som i Figur 5-10 men fra en annen vinkel og avstand. Kameraet er her plassert 6,3 m fra elsparkesykkelen. Også her ser man at det i veldig liten grad er forskjell på mengden røyk i ulike høyder i rommet. 3 minutter etter første observasjon av eksplosjonsartet ventilering i battericellene er det ikke lenger mulig å se selve elsparkesykkelen på bildene fra dette kameraet.



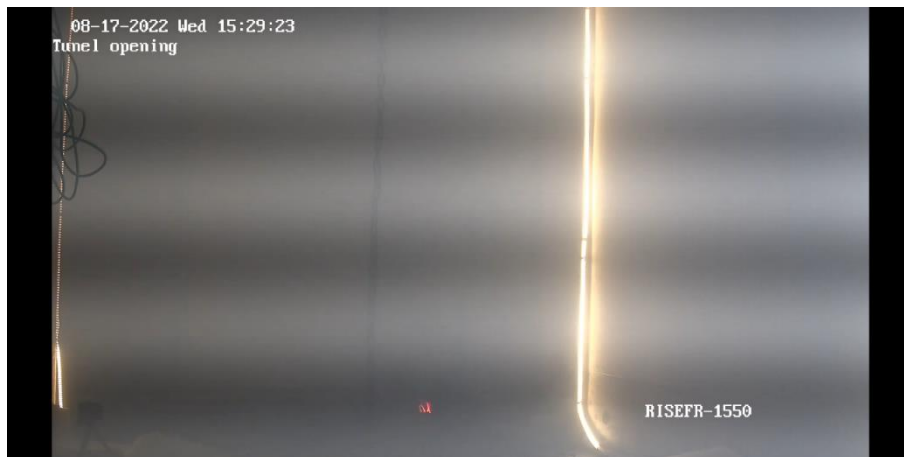
(a) Ved første eksplosjonsaktig ventilering i batteriet.



(b) 1 minutt etter (a).



(c) 2 minutter etter (a).



(d) 3 minutter etter (a).

Figur 5-11: Bilder som viser røykutviklingen over tid for Test 4 i korridoren. Første bildet i (a) viser første observasjon av eksplosjonsartet ventilering i battericellene. Bildene i (b), (c) og (d) er tatt hhv 1, 2 og 3 minutter etter bildet i (a).

5.4 Utslipp av kvelende gasser

Konsentrasjonen av de to kvelende gassene CO og HCN inngår i beregningen av FED, som er dosen som påvirker evnen til å oppholde seg i et område der man er eksponert for kvelende gasser. I tillegg brukes konsentrasjonen av CO₂ til å korrigere for økt opptak av de kvelende gassene som følge av hyperventilering. Målte konsentrasjoner av disse gassene ulike steder i rommene presenteres i dette avsnittet sammen med beregning av FED.

5.4.1 Kvelende gasser i klasserommet

Figur 5-12 viser konsentrasjonen av CO, HCN og CO₂ for Test 2 i klasserommet. I venstre kolonne (Figur 5-12 (a), (c) og (e)) vises konsentrasjonen av gassene i målepunktet «FTIR-klasserom-1» som var lokalisert rett ved elsparkesykkelen. I høyre kolonne (Figur 5-12 (b), (d) og (f)) vises konsentrasjonen av gassene i målepunktet «FTIR-klasserom-2» som var lokalisert i en avstand på 9,4 m fra elsparkesykkelen. Begge målepunktene var lokalisert i en høyde på 2.0 m over gulvet. Se Figur 4-3 for plassering av gassmålepunktene.

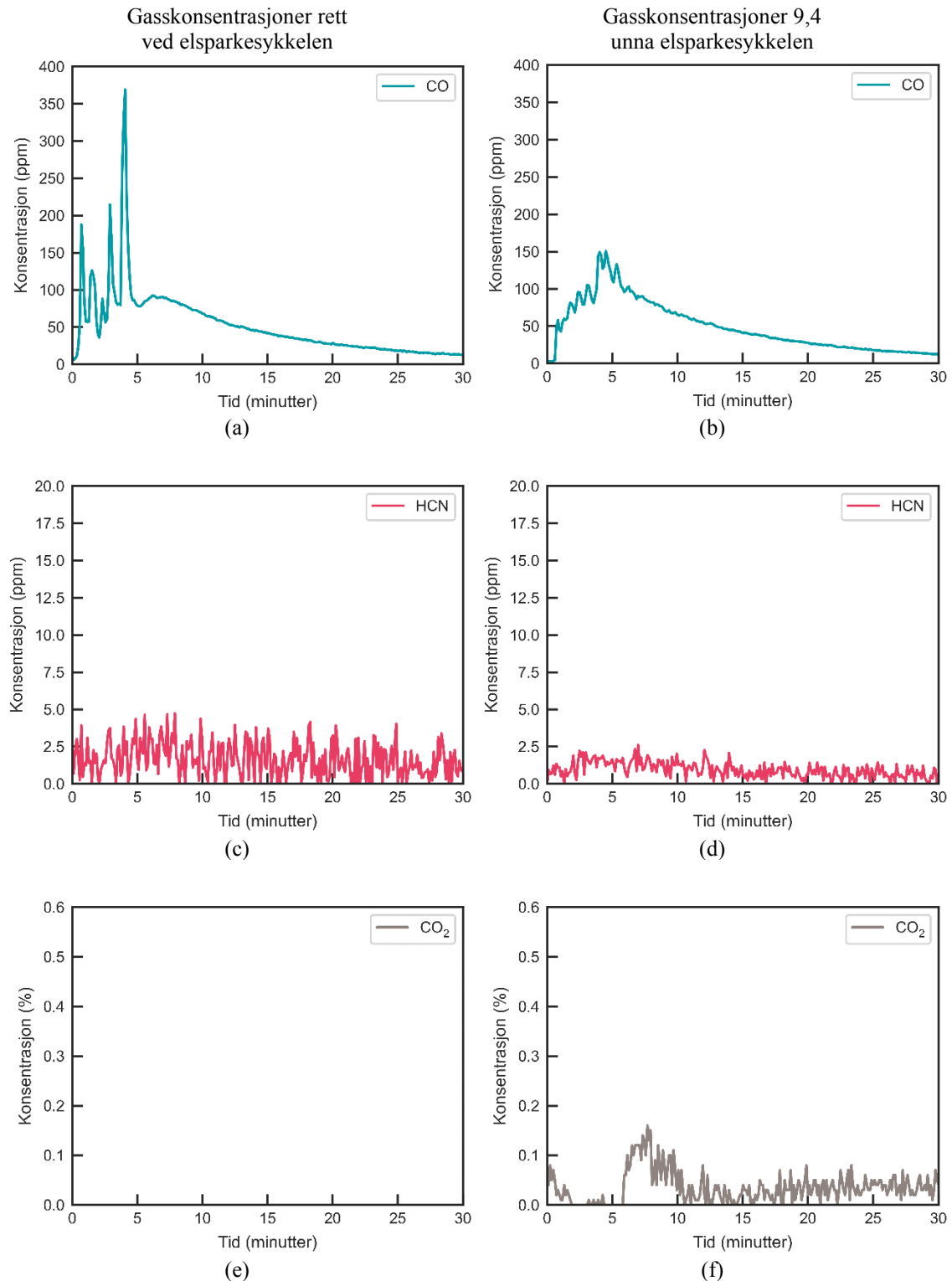
Nærme elsparkesykkelen ser man noen høyere toppe i CO konsentrasjonen på over 350 ppm i tidsperioden da det var eksplosjonsartet ventilering i battericellene. For å sette dette i kontekst så ligger AEGL-2² (*access acute exposure guideline level*) verdien, som er verdien når eksponering for gassen virker invalidiserende, for CO og en eksponeringstid på 10 minutter på 420 ppm. Tidspunktene for disse toppene sammenfaller med tidspunktene for temperaturoppene målt 10 cm fra taket, som vist i Figur 5-4. Disse toppene er ikke like fremtredende i målepunktet 9,4 m unna sykkelen, men utenom disse toppene er målt CO konsentrasjon omtrent lik i de to gassmålepunktene. Man ser ingen tydelig forsinkelse mellom

² AEGL verdier publiseres av USAs miljøvernmyndighet EPA (United States Environmental Protection Agency) og uttrykkes som spesifikke konsentrasjoner av luftbårne kjemikalier der negative helseeffekter kan oppstå. Det skiller mellom 3 AEGL verdier: AEGL-1: Ubehagelig, AEGL-2: Invalidiserende, AEGL-3: Dødelig.

startpunkt for deteksjon av CO i de to målepunktene. Konsentrasjonen av CO faller etter at brannen har sloknet og er nede på 12 ppm etter 30 minutter.

De målte HCN konsentrasjonene er lave for begge målepunktene, AEGL-2 verdien for 10 minutter eksponering til HCN er 17 ppm, og spesielt målepunktet nærmest elsparkesykkelen viser mye støy. I målepunktet 9,4 m unna elsparkesykkelen ser man kun en svak økning i HCN konsentrasjonen på opp mot 2.5 ppm 2-3 minutter etter første eksplosjon.

I Figur 5-12 (f) vises målt CO₂ konsentrasjon (i volum %) 9,4 m unna elsparkesykkelen. Man ser at i perioden da batteriet brant gir den tidvis ikke detekterer noe CO₂. CO₂ målingene rett ved elsparkesykkelen detekterer heller ikke noe CO₂. Fra litteraturen vet vi at CO₂ er en av hovedkomponentene som dannes ved brann i et litium-ion batteri [24], det må derfor være noe feil med disse målingene. Hvilken betydning dette får for beregningene av FED verdiene diskuteres i kapittel 6.1.



Figur 5-12: Målt konsentrasjon av karbonmonoksid (CO), hydrogencyanid (HCN) og karbondioksid (CO₂) (volum %) for Test 2 i klasserommet. I kolonnen til venstre ((a), (c) og (e)) viser konsentrasjonene målt rett ved elsparkesykkelen i målepunktet FTIR-klasserom-1. I kolonnen til høyre ((b), (d) og (f)) viser konsentrasjonen målt 9,4 m unna elsparkesykkelen i målepunktet FTIR-klasserom-2.

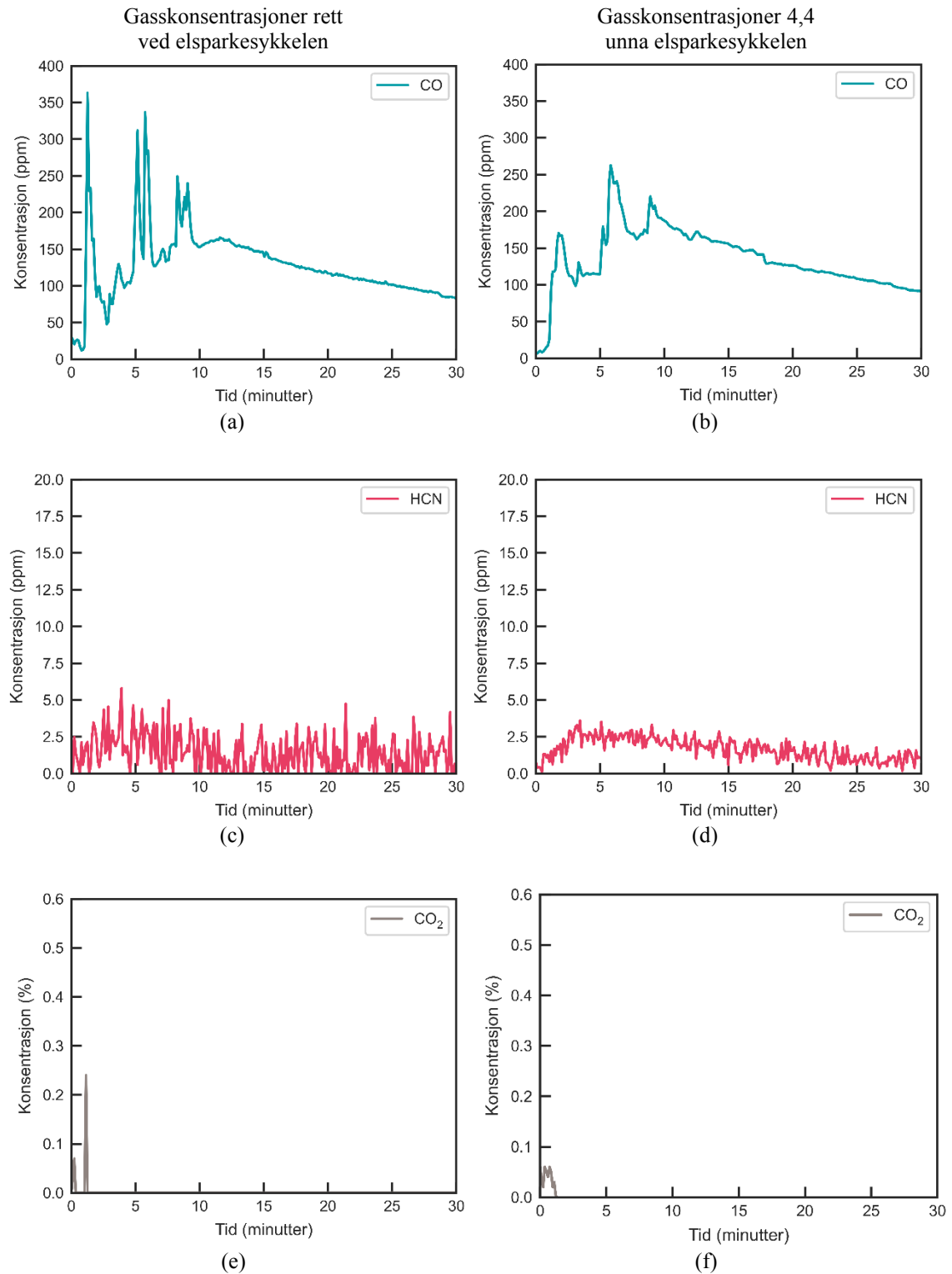
5.4.2 Kvelende gasser i korridoren

Målte konsentrasjoner av CO, HCN og CO₂ er vist i Figur 5-13 for Test 4 som ble utført i korridoren. I venstre kolonne (Figur 5-13 (a), (c) og (e)) vises konsentrasjonen av gassene i målepunktet «FTIR-korridor-1» som var lokalisert rett ved elsparkesykkelen. I høyre kolonne (Figur 5-13 (b), (d) og (f)) vises konsentrasjonen av gassene i målepunktet «FTIR-korridor-2» som var lokalisert i en avstand på 4,4 m fra elsparkesykkelen. Begge målepunktene var lokalisert i en høyde på 2.0 m over gulvet. Se Figur 4-3 for plassering av gassmålepunktene.

Som for brannene klasserommet ser man også i korridoren at de høyeste toppene kommer nærmest brannen. I Test 4 kom siste eksplosjonsaktig ventilering 5 minutter og 30 sekunder etter første eksplosjon, likevel ser man i Figur 5-13 (a) og (b) en stigende trend i CO konsentrasjonen helt frem til omtrent 10 minutter etter første eksplosjonsaktig ventilering for begge gassmålepunktene. Etter dette avtar CO konsentrasjonen, men selv etter 30 minutter måles det fortsatt 80-90 ppm CO i de to gassmålepunktene.

For HCN er det igjen mye støy i målingen nærmest elsparkesykkelen. I målepunktet lenger unna ser man at det detekteres opp mot omtrent 3-4 ppm i perioden da batteriet brenner før konsentrasjonen av HCN avtar.

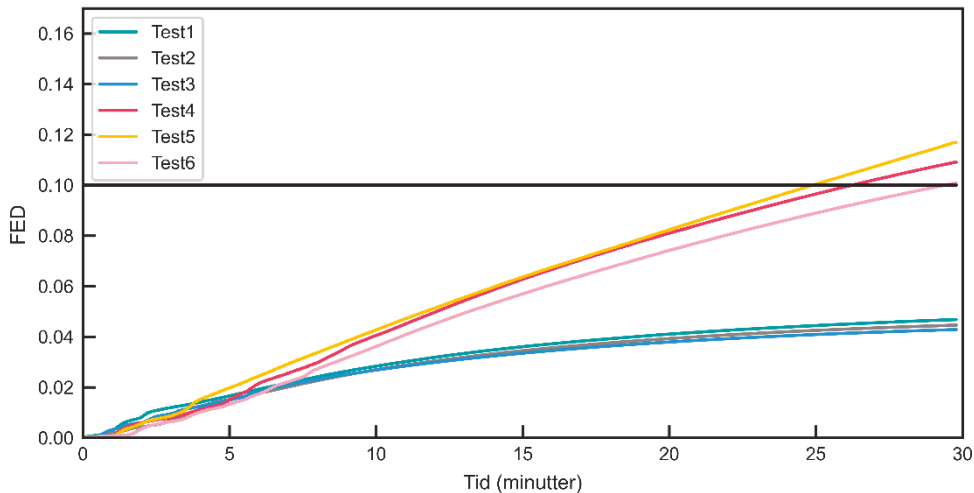
CO₂ ble kun detektert i noen topper helt i starten for begge målepunktene, som nevnt tidligere er tyder dette på at det er noe galt med målingene.



Figur 5-13: Målt konsentrasjon av de kveldende gassene karbonmonoksid (CO), hydrogencyanid (HCN) og karbondioksid (CO₂) (volum %) for Test 4 i korridoren. I kolonnen til venstre ((a), (c) og (e)) viser konsentrasjonene målt rett ved elsparkesykkelen i målepunktet FTIR-korridor-1. I kolonnen til høyre ((b), (d) og (f)) viser konsentrasjonen målt 4,4 m unna elsparkesykkelen i målepunktet FTIR-korridor-2.

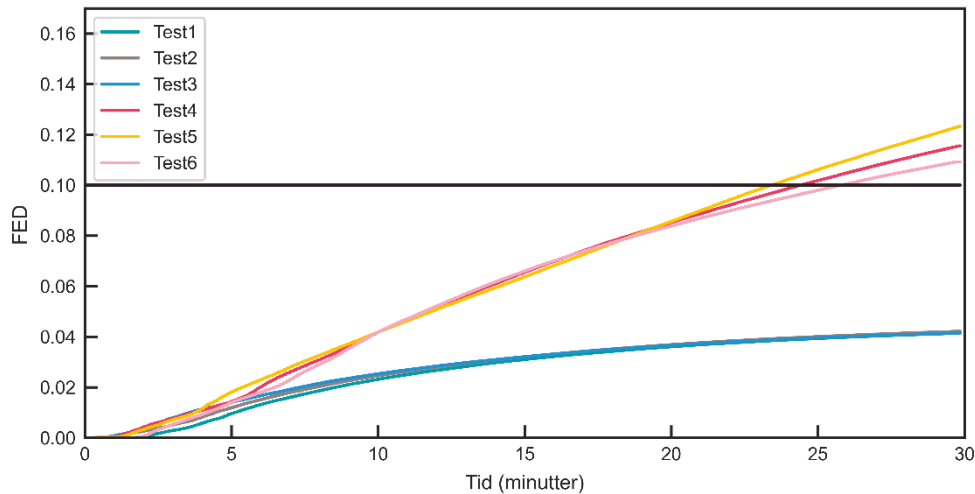
5.4.3 FED

Beregnet FED verdi er vist i Figur 5-15 for målepunktet rett ved elsparkesykkelen som funksjon av tid fra første eksplosjonsaktig ventilering i batteriet. Grenseverdien på 0,1 FED ble ikke oppnådd i noen av testene i klasserommet (Test 1-3). For testene i korridoren (Test 4-6) ble denne grenseverdien oppnådd etter 25 minutter til 29,5 minutter.



Figur 5-14: Den effektive dosen, FED, som funksjon av tid etter første eksplosjonsaktig ventilering i batteriet for gassmålepunktene nærmest elsparkesykkelen. Test 1-3 ble utført i klasserommet mens Test 4-6 ble utført i korridoren. Den sorte horisontale linjer indikerer grenseverdien for FED på 0,1.

FED for målepunktene lenger unna den brennende elsparkesykkelen er vist i Figur 4-3 for alle forsøkene. For Test 1-3 i klasserommet var dette målepunktet plassert ved døra, i en avstand på ca 9,4 m fra den brennende elsparkesykkelen. Grenseverdien på 0,1 FED ble ikke oppnådd i noen av testene i klasserommet (Test 1-3). For testene i korridoren ble dette målepunktet flyttet lenger unna elsparkesykkelen for hver test slik at avstanden fra elsparkesykkelen til målepunktet var 4,4 m for Test 4, 9 m for Test 5 og 13,6 m for Test 6. Den kritiske grenseverdien på 0,1 FED ble oppnådd etter 24,4 minutter for Test 4, etter 23,5 minutter for Test 5 og etter 25,8 minutter for Test 6. Det er ingen systematisk sammenheng mellom beregnet FED verdi og avstand til elsparkesykkelen for de tre testene utført i korridoren.



Figur 5-15: Den effektive dosen, FED, som funksjon av tid etter første eksplosjonsaktig ventilering i batteriet for gassmålepunktene lengst unna elsparkesykkelen. For Test 1-3 i klasserommet var avstanden fra brannen 9,4 meter. For Test 4-6 i korridoren var denne avstanden hhv 4,4 m, 9 m, og 13,6 m. Den sorte horisontale linjer indikerer grenseverdien for FED på 0,1.

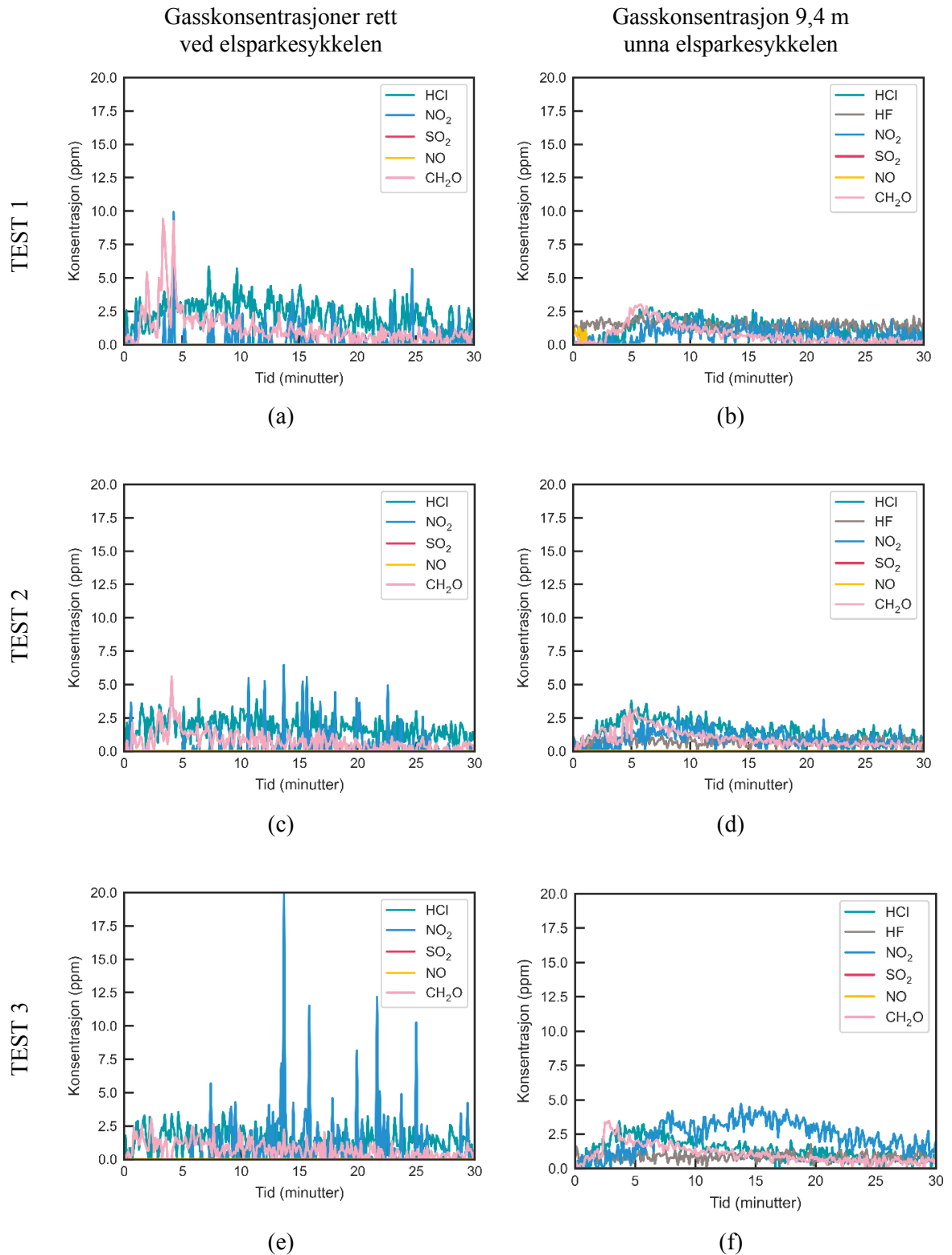
5.5 Utslipp av irriterende gasser

I beregningen av FEC inngår konsentrasjonen av de irriterende gassene HCl, HBr, HF, SO₂, NO₂, NO og CH₂O. Av disse ble HCl, HF, SO₂, NO₂, NO og CH₂O målt i forsøkene. Målte konsentrasjoner av disse gassene ulike steder i rommene presenteres i dette avsnittet sammen med beregning av FEC.

5.5.1 Irriterende gasser i klasserommet

Figur 5-16 viser målte konsentrasjoner av de irriterende gassene i de tre forsøkene i klasserommet. I venstre kolonne (Figur 5-16 (a), (c) og (e)) er konsentrasjonen i gassmålepunktet rett ved elsparkesykkelen vist. Målingene av HF for dette FTIR instrumentet viste forhøyede verdier på 10 – 20 ppm også før forsøkene, og HF målingene for dette målepunktet er derfor utelatt. I målepunktet ved elsparkesykkelen detekteres det små mengder av HCl, NO₂ og CH₂O. Det er ikke noen tydelig forskjell i mengdene som detekteres av disse gassene i dette målepunktet, men i Test 3 detekteres noen høye topper av NO₂ etter at brannen i batteriet har sloknet. Det detekteres ikke SO₂ og NO i dette målepunktet.

I høyre kolonne av Figur 5-16 ((b), (d) og (f)) er konsentrasjonen i gassmålepunktet 9,4 m fra elsparkesykkelen vist. I alle tre testene er det HCl, NO₂, CH₂O og HF som detekteres i dette målepunktet. I tillegg detekteres litt NO de første 2 minuttene av Test 1. Den målte konsentrasjonen av CH₂O i dette målepunktet følger samme trend som konsentrasjonen av CO (Figur 5-12 (c)), med en topp rundt siste eksplosjonsaktig ventilering i batteriet før konsentrasjonen avtar etterpå. De målte toppene i NO₂ nærme elsparkesykkelen for Test 3 gjenspeiles i en noe høyere målt konsentrasjon av NO₂ også i målepunktet 9,4 m unna elsparkesykkelen i samme tidsrom.



Figur 5-16: Målte konsentrasjoner av irriterende gasser i de tre forsøkene i klasserommet. Test 1 ved elsparkesykkelen i (a) og 9,4 m unna elsparkesykkelen i (b). Test 2 ved elsparkesykkelen i (c) og 9,4 m unna elsparkesykkelen i (d). Test 3 ved elsparkesykkelen i (e) og 9,4 m unna elsparkesykkelen i (f).

5.5.2 Irriterende gasser i korridoren

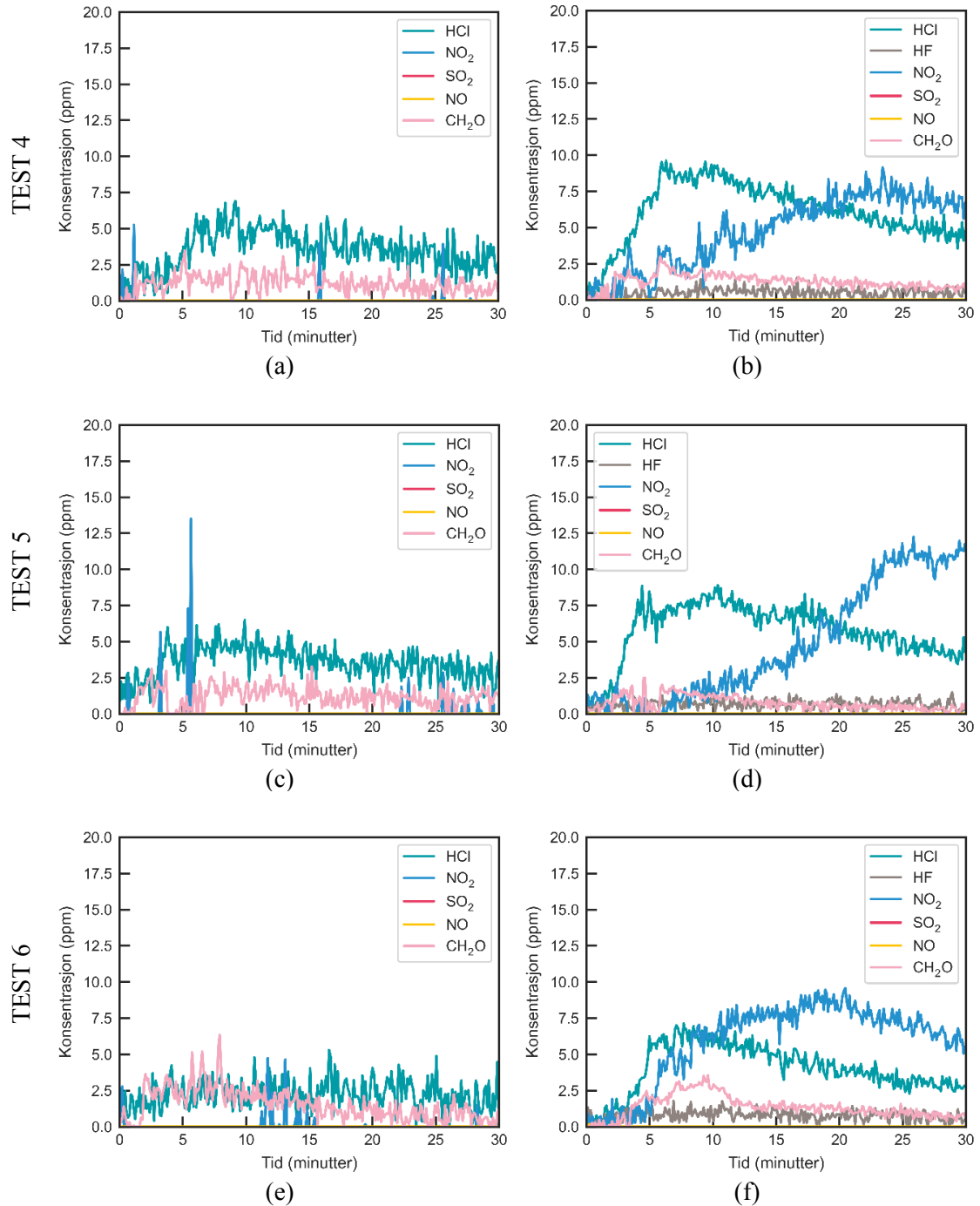
Figur 5-17 viser målte konsentrasjoner av de irriterende gassene i de tre forsøkene i korridoren. Til venstre i Figur 5-17 (a), (c) og (e) er konsentrasjonen i gassmålepunktet rett ved elsparkesykkelen vist. Målingene av HF er utelatt fra dette målepunktet også i disse forsøkene da det, på grunn av en feil i måleutstyr, ikke vistes riktig nullverdi før forsøkstart. I målepunktet ved elsparkesykkelen detekteres det små mengder av HCl, NO₂ og CH₂O. Det detekteres ikke SO₂ og NO i dette målepunktet. Som for forsøkene i klasserommet detekteres kun små mengder av disse gassene i korridoren også. Det detekteres noe mer HCl for Test 4 og Test 5 enn det gjorde for Test 6. Likevel ligger maksverdien for HCl under AEGL 2 grensen (for 10 minutter eksponering) på 100 ppm. Imidlertid overstiges AEGL 1³ grensen (for 10 minutter eksponering) på 1.8 ppm.

Til høyre i Figur 5-17 (b), (d) og (f) er konsentrasjonen i en avstand på hhv 4,4 m, 9 m, og 13,6 m fra elsparkesykkelen vist. HCl, NO₂, CH₂O og HF detekteres i disse målepunktene. Både HCl og NO₂ akkumuleres frem til en stund etter siste eksplosjonsaktig ventilering i batteriet og det måles fortsatt forhøyede konsentrasjoner 30 minutter etter første eksplosjonsaktig ventilering i batteriet, som også var tilfelle for CO i de samme målepunktene i korridoren. NO₂ verdien overstiger AEGL 1 grensen (for 10 minutter eksponering) på 0,5 ppm, men ligger fortsatt under AEGL 2 grensen (for 10 minutter eksponering) på 20 ppm. De detekterte mengdene av CH₂O og HF er på samme nivå som for forsøkene i klasserommet.

³ AEGL 1: Bemerkelsesverdig ubehag, irritasjon eller visse asymptomatiske ikke-sensoriske effekter. Effektene er imidlertid ikke invalidiserende og er forbigående og reversible ved opphør av eksponering.

Gasskonsentrasjoner rett ved elsparkesykkelen

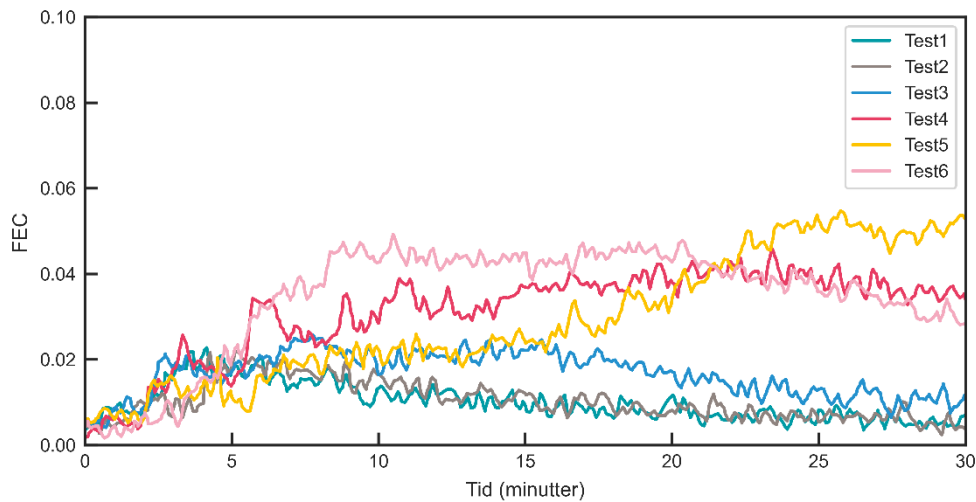
Gasskonsentrasjoner målt i ulike avstander fra elsparkesykkelen, nærmest i (b), lengst unna i (f)



Figur 5-17: Målte konsentrasjoner av irriterende gasser i de tre forsøkene i korridoren. Test 4 ved elsparkesykkelen i (a) og 4,4 m unna elsparkesykkelen i (b). Test 5 ved elsparkesykkelen i (c) og 9 m unna elsparkesykkelen i (d). Test 6 ved elsparkesykkelen i (e) og 13,6 m unna elsparkesykkelen i (f).

5.5.3 FEC

Figur 5-18 viser beregnet FEC for målepunktet lengst unna den elektriske elsparkesykkelen for alle testene. Det ble ikke i noen av forsøkene, verken i klasserommet eller i korridoren, oppnådd en FEC verdi som er over grenseverdien på 0,1. Høyeste FEC verdi på 0,054 ble oppnådd i Test 5 i korridoren 25 minutter etter at den eksplosjonsartede brannen startet.



Figur 5-18: Den effektive konsentrasjonen, FEC, som funksjon av tid etter første eksplosjonsaktig ventilering i batteriet for målepunktet lengst unna elsparkesykkelen i alle forsøkene. Test 1-3 ble utført i klasserommet mens Test 4-6 ble utført i korridoren.

I Testene 1-3 er FEC beregnet i en avstand på 9,4 m fra elsparkesykkelen. I Testene 4-6 er FEC beregnet i en avstand på hhv 4,4 m, 9 m, og 13,6 m fra elsparkesykkelen. Det vises ikke noen systematisk sammenheng mellom avstand til elsparkesykkelen og beregnet FEC verdi.

6 Diskusjon

I dette kapittelet diskuteres både forsøksoppsettet og funnene. Til slutt diskuteres implikasjonene av resultatene i et større perspektiv, og noen konkrete tips og anbefalinger presenteres.

6.1 Diskusjon av metode

I denne studien ble brannen i elsparkesykkelbatteriet startet med oppvarming fra en pilotflamme. Metoden ble valgt for å ha en enkel, rask, repeterbar og reproducerbar initieringsmetode for å sette i gang thermal runaway. Ulempen med den valgte initieringsmetoden er at den ikke er like representerbar for scenarier hvor de ventilerte gassene ikke antennes eller antenningen skjer forsinket (eksplosjon).

Gassmålingene som er gjort i denne studien er basert på punktmålinger. I disse forsøkene er gassen ikke godt blandet, og da kan punktmålinger være sensitive for gassens bevegelser og plassering av punktmålingene, særlig med tanke på plassering av ventilasjonsinntak- og uttak. Dette er dels kompensert for ved å ha målepunkt som ble flyttet gradvis lengre unna brannen (i forsøkene hvor brannen startet i korridoren).

Måleinstrumentet som ble brukt nærmest elsparkesykkelen detekterte forhøyet bakgrunnsnivå av HF, og det mangler derfor data for konsentrasjon av HF på dette målepunktet for alle testene. Det er derfor ikke beregnet FEC for målepunktet ved elsparkesykkelen. I korridoren ble det likevel målt konsentrasjon av HF i tre ulike posisjoner, 4,4 m, 9 m og 13,6 m unna elsparkesykkelen. Det er lite forskjell i målt konsentrasjon i de tre målepunktene i ulike avstand fra elsparkesykkelen. Den HF-målingen som er nærmest elsparkesykkelen er dermed målingen 4,4 m fra elsparkesykkelen i korridor. Imidlertid ga HF målingen for Test 1 i klasserommet, 9,4 m fra elsparkesykkelen de høyeste verdiene. Mens målingene i Test 2 og Test 3 viste noe lavere verdiene. HF reagerer med de fleste overflatene. Dette kan føre til signifikante *wall losses* [25]. Derfor forventes generelt større HF verdier nærmest utslippspunktet, men det er ikke mulig å estimere data nærmere hhv 4,4 m og 9,4 m i korridoren og klasserommet basert på måledata fra forsøkene.

FED og FEC verdiene som er brukt i denne studien korresponderer, per definisjon, til en median verdi av en lognormalfordeling av reaksjonen på en gasseksponering. Det vil si at ved en FEC og/eller FED verdi på 1,0 vil halvparten av personene være mer sensitive (*susceptible*) og den andre halvparten mindre sensitive for gasseksponeringen. For en FEC og/eller FED verdi på 0,1 betyr dette at 1.1% av de eksponerte personene vil oppleve nedsatt evne til å rømme. Å bruke en lognormalfordeling er en antagelse som er nødvendig på grunn av manglende eksperimentelle data. Derfor er det viktig å være bevist på at spedbarn og små barn er spesielt utsatt for kvelende giftstoffer da de inhalerer et større luftvolum i forhold til kroppsmassen enn voksne. Eldre, spesielt de med et nedsatt kardiovaskulært system, er også spesielt utsatt for kvelende giftstoffer. Sammen med personer som lider av lungesykdommer som for eksempel kronisk obstruktiv lungesykdom (KOLS) [9]. Det vil si at risikoen relatert til eksponering for branngasser fra litium-ion batterier i publikumsbygg hvor det oppholder seg over gjennomsnittlig mange små barn (for eksempel barnehager og skoler) eller eldre (for eksempel omsorgsbolig) er større enn i andre publikumsbygg.

Konsentrasjonen av CO₂ inngår i beregningen av FED verdien for å kompensere for økt opptak av de kvelende gassene som følge av hyperventilering. Det var noen utfordringer knyttet til CO₂ målingen i flere av forsøkene. Dette kan påvirke beregningen av FED. For målepunktet rett ved elsparkesykkelen var høyeste målte konsentrasjon i noen av testene 0,3 %, mens det for målepunktene lenger unna ble målt maksimalt 0,6 % CO₂. Basert på de høyeste detekterte CO₂ målingene ble det derfor gjennomført en sensitivitetsberegning hvor CO₂ ble antatt å ha en konstant høy konsentrasjon gjennom hele brannforløpet. Selv med denne konservative antagelsen oppnådde FED verdien i klasserommet, som var 0,05, ikke grenseverdien av 0,1. I korridoren ble grenseverdien oppnådd 2 minutter raskere, altså etter ca. 23 minutter sammenlignet med opprinnelig 25 minutter.

Det er ikke gjort optiske målinger eller annen kvantifiserbar måling av optisk tetthet på røyken. Det var ikke montert ledesystem i rommene så vi kan ut fra visuelle observasjoner i forsøkene ikke si noe kvantitativt om hvorvidt man kunne ha sett markeringsskilt eller retningsskilt (elektriske eller etterlysende), eller ledelinjer i en rømningssituasjon. Målestaver og lyskjeder ble installert i hovedsak for å kunne si noe om høyden på et eventuelt røyksjikt under taket. Likevel er det mulig å gjøre en kvalitativ analyse. I klasserommet ble det observert at røyken i starten var tette oppunder taket, før den etter 3-4 minutter fylte hele rommet. Det var ikke mulig å se forskjell på mengde røyk i ulike høyder for forsøkene i korridoren. Det er ikke klart om dette skyldes forskjeller i kameravinklene som ble brukt, romstørrelse, romgeometri eller ventilasjon.

Elsparkesyklene som ble brukt er en populær modell i prissjiktet 4 000 – 6 000 kr. Dyrere sykler har gjerne større batterier som vil kunne ha høyere brannenergi og større gassutslipp. For de brukte syklene var det i alle testene, utenom en der fremhjulet også tok fyr, bare selve batteriet som brant. Det kan antas at også plastdekselet som ble fjernet fra undersiden av sparkesykkelen hadde bidratt til brannen. Dette vil være annerledes for elsparkesykler som bruker metallplater på undersiden. Generelt gjelder at andre sykkelmodeller kan ha annen utforming og materialbruk som kan gjøre at brannen i sykkelen blir større.

Forsøkene ble utført i omgivelser av lite brennbare materialer som betong og gipsplater. I en reell brann i en elsparkesykkel både den eksplosjonsartede brannen og de brennende objektene som ble slengt ut i rommet kunne bidra til spredning av brannen utover elsparkesykkelen.

Repetisjoner av brannforsøkene viste at den valgte forsøksoppsett ga god repeterbarhet.

6.2 Diskusjon av resultatenes betydning for rømning

I forsøkene ble temperaturen målt både i umiddelbar nærhet til elsparkesykkelen og ved ulike høyder i rommet i en avstand på i underkant 3 m fra elsparkesykkelen. Rett ved elsparkesykkelen ble det målt en temperaturøkning på maksimalt 47 °C i klasserommet og 60 °C i korridoren. I målepunktene knappe 3 m unna sykkelen ble det målt en temperaturøkning på maksimalt 22 °C i klasserommet og 35 °C i korridoren. Dette vurderes ikke å være en temperaturøkning som vil kunne påvirke rømning.

Det ble detektert kvelende gasser i brannrommet både når elsparkesykkelen brant i klasserommet og når den brant i korridoren. Beregningene viser at det ble oppnådd FED verdier på over 0,1 i alle forsøkene i korridoren. Det betyr at 1,1 % av den generelle befolkningen blir påvirket, og man kan derfor med sikkerhet si at dette vil kunne påvirke rømning. Dette skjedde

mellom 23,5 og 29,5 minutter etter at den eksplosjonsartede brannen i batteriet startet for forsøkene i korridoren. I klasserommet ble det ikke oppnådd FED verdier på over 0,1. I tillegg til de kvelende gassene som inngår i beregningen av FED vil også lave konsentrasjoner av oksygen kunne medføre kvelning. Oksygenkonsentrasjonen må derfor tas hensyn til dersom den faller under 13 % [9]. Målingene viser at konsentrasjonen av oksygen kun i liten grad ble påvirket av brannene, og konsentrasjonen av oksygen falt aldri under 19 %.

Irriterende gasser ble detektert i alle de utførte forsøkene. Ikke alle gassene som ble forsøkt målt ble detektert, og de som ble detektert hadde lave konsentrasjoner. Følgelig oversteg ikke den beregnede FEC verdien 0,1 i noen av testene. FEC verdien utviklet seg likt for brannene i de to rommene de første 5-6 minuttene etter at den eksplosjonsartede brannen startet. Etter dette flater verdien ut og begynner å falle i klasserommet mens den fortsetter å stige i korridoren. Dette kommer av at konsentrasjonen av noen av de irriterende gassene i korridoren fortsetter å stige også etter at brannen har sloknet, og det måles høyere konsentrasjoner av disse gassene. Det kan antas at dette henger sammen med de forskjellige ventilasjonsforholdene i klasserommet og korridoren.

I klasserommet byttes luften 7,8 ganger per time mens luften i korridoren byttes bare 1,2 gang per time. I tillegg er også romgeometri og antall tilluftsventiler og deres plassering forskjellig. Det ble målt høyere konsentrasjoner av både kvelende og irriterende gasser i korridoren enn i klasserommet. De to rommene hadde ulikt gulvareal og følgelig også ulikt luftvolum. Luftvolumet i korridoren var 115 m³ mens luftvolumet i klasserommet var 172 m³. Utslipp av lik gassmengde fra brannen vil derfor i gjennomsnitt gi høyere konsentrasjon i korridoren enn i klasserommet. I tillegg var, som diskutert i forrige avsnitt, ventilasjonen ulik for de to rommene. Utskiftningen av luft skjer mye saktere i korridoren enn i klasserommet, noe som også bidrar til økt konsentrasjon av de frigjorte gassene. Det er vanskelig å skille disse to effektene fra hverandre.

I klasserommet ble gasskonsentrasjonene målt i to målepunkter, ett rett ved elsparkesykkelen og ett 9,4 m unna. Det ble detektert noen høyere toppe i konsentrasjonen av noen av gassene nærme sykkelen, men utover det ble det ikke vist noen forskjell på gasskonsentrasjonen som var målt rett ved elsparkesykkelen og gasskonsentrasjonen som ble målt i andre enden av rommet. Det var heller ingen forskjell i de beregnede FED verdiene i disse to målepunktene i klasserommet. Dette kan tyde på at det forholdsvis store rommet og ventilasjonssystemet som opererer med prosjekterte maksimale luftmengder fører til en relativ jevn gassblanding i rommet.

For alle de tre forsøkene i korridoren tok det lenger tid før FED verdien oversteg 0,1 i målepunktet som var helt nærme elsparkesykkelen enn i målepunktet som var plassert lenger unna. Posisjonen til målepunktet som var plassert lenger unna elsparkesykkelen ble flyttet mellom de tre forsøkene i korridoren, for å få en indikasjon på om avstanden til elsykkelen spiller en viktig rolle for rømningen. Det ble ikke funnet noen systematisk sammenheng mellom når FED oversteg 0,1 og hvor stor avstanden var mellom målepunktet og elsparkesykkelen for dette målepunktet. Dette viser at gassene sprer seg fort, og at forholdene for rømning ikke nødvendigvis er bedre i litt avstand fra elsparkesykkelen enn rett ved den. Imidlertid er det viktig å ta i betraktning at ved å flytte målepunktene lenger bort fra elsparkesykkelen ble ikke bare avstanden forandret, men også lokasjonen i forhold til ventilasjonssystemet. Målepunktet «FTIR-korridor-2» i Test 4 var plassert mellom elsparkesykkelen og tilluftsventilen, mens målepunktet «FTIR-korridor-3» i Test 5 var plassert mellom tillufts- og avtrekksventilen og

målepunktet «FTIR-korridor-4» i Test 6 var plassert veldig nært avtrekksventilen (se Figur 4-2 og Figur 4-3). Dermed er det ikke bare den horisontale spredningen, men i stor grad også vertikale strømningsmønstre som påvirker gasskonsentrasjonene, noe som ikke ble målt i forsøkene.

Bildene fra rommene hvor det brant viser at det forholdsvis fort blir tett brannrøyk. Etter få minutter danner det seg så mye røyk at flere av målepinnene på veggene ikke lenger kan sees. I klasserommet kan man i starten se at det er mest røyk oppunder taket, likevel er hele rommet fylt av røyk etter bare 3-4 minutter. I korridoren ser man ikke denne forskjellen på røykmengde i ulike høyder av rommet i starten av brannen, og hele rommet fylles med røyk i løpet av 3 minutter. Det er ingen tydelig forskjell mellom det visuelle uttrykket til brannrøyken ved brann i korridoren eller i klasserommet, selv om det ble detektert høyere gasskonsentrasjoner i korridoren.

Siden røyktettheten ikke ble målt og lysforholdene i rommene ikke er spesifisert er det ikke mulig å gjennomføre en kvantitativ analyse basert på hvor mange meter man ser. Et videokamera kan se mer eller mindre enn et menneske, avhengig av kamerainnstillingene (blender, ISO og lukkertid). I INSTA/TS 950:2014 [26] oppgis det et alternativt for å bestemme tilstrekkelig sikt til rømning, som er basert på en røykfri høyde av $1,6 \text{ m} + 0,1 \times H$, som er i dette tilfelle rund 1,9 m. Bildene fra brannforsøkene viser at røyken etter kun en kort tid på 1-2 minutter reduserer sikten i en høyde på 1,9 m, estimert av målestokkene på veggene (se figurene Figur 5-8 til Figur 5-11). Det vil si at den raske røykutviklingen i elsparkesykkelbatteriet fører til nedsatt sikt og påvirker derfor rømningen allerede etter kort tid.

Både målingene av gasskonsentrasjoner, beregninger av FED og FEC, og de visuelle inntrykkene fra videoene viser altså at det ikke nødvendigvis er slik at den farlige brannrøyken befinner seg bare helt nærme objektet som brenner, eller kun i et sjikt under taket. Dette har betydning for rømning fordi det vil kunne være brannrøyk med irriterende eller kvelende gasser til stede i hele rommet hvor brannen startet. I de tilfellene hvor brannen ble startet i korridoren, vil det bety at når folk beveger seg fra fluktvei og inn i rømningsveien i korridoren, vil det kunne være en betydelig mengde brannrøyk i hele korridoren, og ikke bare nærme der hvor brannen startet.

I forsøkene her har vi sett at noen av gassmålingene i noen tilfeller var høyere ved 4, 9 og 13 meter vekk fra elsparkesykkelen, enn den gassmålingen som ble gjort i umiddelbar nærhet til elsparkesykkelen, se for eksempel irriterende gasser i fig 4-16. I umiddelbar nærhet til elsparkesykkelen fører brannen til at varme gasser og røyk stiger oppover mot taket. Utenfor dette område er røyk og gasser mer påvirket av ventilasjonssystemet, i tillegg til at avkjøling av gassene kan føre til at gasser og røyk synker. Dette har betydning for rømning fordi det vil kunne være brannrøyk med irriterende eller kvelende gasser til stede i hele rommet hvor brannen startet, selv om den lokale konsentrasjonen vil være avhengig av utforming av rommet og ventilasjonssystemet.

I de tilfellene hvor brannen ble startet i korridoren, vil det bety at når folk beveger seg fra fluktvei og inn i rømningsveien i korridoren, vil det kunne være en betydelig mengde brannrøyk i hele korridoren, og ikke bare nærme der hvor brannen startet.

6.3 Det større bildet - antennelse, romstørrelse og ventilasjon

I dette avsnittet vil vi diskutere implikasjonene av resultatene i et større perspektiv, og si noe generelt om konsekvensene av en thermal runaway i et elsparkesykkelbatteri i rom som brukes som flukt- eller rømningsvei.

Prosjektet har fokusert på konsekvensene av en brann i et litium-ion batteri og det er ikke fokusert på hva som gjør at batterier i elsparkesykler begynner å brenne. Vi anbefaler likevel generelt å følge Ladevettreglene utarbeidet av DSB, Norsk brannvernforening og forsikringsselskapet If [3] og rådene for trygg lading av elsparkesykler [5] for å redusere sjansen for at det begynner å brenne i utstyr og fremkomstmiddel med litium-ion batterier. Ladevettreglene er viktige å følge for å sørge for at faren for brann ved lading minskes, men det er likevel viktig å være klar over at det kan begynne å brenne i elsparkesykkelen også når den ikke står til lading, slik som eksempelhendelsene fra Bergen viser (se avsnitt 3.2). I publikumsbygg kan byggeiere legge til rette for trygg lading og lagring, både med tanke på tyveri og brann. Det er en stor fordel hvis det kan legges til rette for at elsparkesykler og annet lignende utstyr kan lagres og lades vekk fra brennbart materiale, og vekk fra rømningsvei slik som korridor og trapperom.

Når det gjelder utendørs lagring og lading er det noen fordeler og noen ulemper knyttet til det. Dersom en brann først har oppstått, er det en fordel for brannsikkerheten at dette er utendørs, siden man unngår de farene for brannspredning og ulempene for rømning som man kunne ha fått dersom den samme brannen startet inne i et bygg. Det er derimot, ikke nødvendigvis bra for batteriene å være lagret utendørs, hvis det er kaldt eller sollys. Ifølge veileder for sikkerhet i elsykler og elsparkesykler fra NFPA [27], bør man lagre batterier ved romtemperatur, og unngå lading i minusgrader, samt unngå lagring i direkte sollys. Dette bør hensyntas ved utendørs lagring, hvis det går.

Når det gjelder elsparkesykler som antennelseskilde, var det i denne studien ikke noe brennbart i nærheten av elsparkesykkelen som brant. I et klasserom eller i et kontorlandskap er ikke dette tilfelle, her er det mange brennbare objekter, slik som sekker, gardiner, stoler osv. Også i korridorer, trappeoppganger og andre lignende steder blir det lagret ting, selv om rømningsveier ikke skal brukes som lagringsplass. Mens elsparkesykkelen brant, kom det jetflammer ut fra batteriet. Mens temperaturene midt inni batteriet når det brenner forventes å ligge på noen hundre grader (typisk 500-700 °C [28,29]), så kan det forventes at temperaturen midt inni jetflammen er enda høyere (typisk opp mot 1000 °C⁴). De varme jetflammene kan lett antenne nærliggende brennbare objekter. Det ble også observert utsending av gnister og større, brennende biter av flere centimeter størrelse, antagelig brennende battericeller. Det ble observert slike brennende utkast som spredte seg opp til 9 meter vekk fra elsparkesykkelen. Disse gnistene og brennende utkastene vil kunne antenne andre ting i rommet, også langt unna elsparkesykkelen. Merk at slike brennende utkast i noen rapporter og litteratur også omtales som flyvebranner⁵. I tillegg til å representere en fare for brannspredning, vil det også være en

⁴ Basert på erfaringer fra branntester med batterier ved RISE Fire Research og ved RISE i Sverige (dataene er ikke tilgjengelig i offentlig publiserte rapporter).

⁵ Flyvebrann: «Brennende partikler eller gjenstander fra en brann som transporteres i luften eller faller ned og kan antenne brennbare materialer.»[19]

viss fare for personskade som følge av selve prosjektillets treff, hvis et brennende utkast treffer en person som oppholder seg i nærheten.

En elsparkesykkel som brenner vil altså kunne gi en rask brannspredning på grunn av den eksplosjonsartede brannutviklingen. Dette er også observert i hendelsene med elsparkesykler fra Bergen presentert i avsnitt 3.2, hvor brannen i 5 av de 10 hendelsene spredte seg utover arnestedsojektet (elsparkesykkelen). I to av hendelsene med brannspredning spredte brannen seg også utover arnestedsrommet, hvorav én til hele branncella.

Den raske brannutviklingen, store røykdannelsen og brennende utkast vil kunne være gi fare for liv og helse, og hindre rømning via flukt- og rømningsveier. I klasserom, idrettshaller og andre publikumsbygg hvor det er barn og unge eller eldre til stede vil det være spesielt viktig at man har så lang tid som mulig til å rømme, og unngår potensiale for en rask brannutvikling, også i fluktveien. Det er derfor viktig å unngå lagring og lading av elsparkesykler og lignende elektriske enheter i flukt- og rømningsveier.

Brann i batterier kan ha en eksplosjonsartet brannutvikling, med jetflammer og brennende utkast som lander langt vekk fra der brannen startet. Det kan gi en rask brannspredning.

Den raske og eksplosjonsartet brannutvikling i litium-ion batterier har ikke bare betydning for brannspredningen, men også hvor mye tid personer i nærheten har til å reagere. I mange tilfeller vil det første man opplever når det brenner i et litium-ion batteri være at en eller flere celler begynner å ventilere, en hendelse som beskrevet kan være veldig voldsom, selv om *thermal runaway* har allerede pågått en stund i batteriet. Alle branner representerer en stressituasjon og er vanligvis skremmende. Likevel kan det forventes at det raske brannforløpet, de høye lydene når det smeller fra batteriet, jet brannen og de brennende delene som kan kastes ut i rommet ved en brann i en litium-ion batteri vil være mer skremmende enn for eksempel en ulmebrann som starter med røykutvikling. Dette kan påvirke hvordan personer reagerer under rømningen og vil være enda viktigere når det gjelder for eksempel barn på skoler eller andre publikumsbygg.

Den eksplosjonsartede brannutviklingen, med jetflammer og brennende utkast kan være ekstra skremmende og dermed påvirke hvordan personer reagerer under rømningen.

Når det gjelder betydning av størrelsen på rommet, så har vi i denne studien sett på to romstørrelser. Det er likevel mulig å si noe mer generelt om betydelsen av størrelse på rommet for rømning ved en thermal runaway i et batteri. To viktige faktorer ved brannrøyk når det gjelder rømning er synlighet/sikt og gassinnhold i røyken. For det første, jo større rommet er, jo større område har brannrøyken å spre seg på, og sikten vil være bedre i et stort rom sammenlignet med et lite rom med samme mengde røyk. Det er likevel ikke bare tettheten av brannrøyken/sikten som avgjør om folk kommer seg ut eller ikke, for eksempel kan type ledesystem og plassering av markerings- og retningskilt og eventuelt ledelinjer være avgjørende for rømning. I store og åpne rom kan det være vanskeligere å se markeringskiltene som viser veien ut, sammenlignet med i mindre og mer oversiktlige rom, uavhengig av mengde brannrøyk. Mer om funksjonen til visuelle ledesystemer finnes i egen RISE rapport [30]. For det andre, som beskrevet i forrige avsnitt, viste resultatene fra forsøkene i denne studien at spredning av gassene i brannrøyken gikk fort uavhengig av rommets størrelse. Ved en brann i

en elsparkesykkel vil det med andre ord kunne oppstå forhold som vil kunne hindre rømning, også når det er et stort, åpent rom.

Selv om rommet er stort og åpent, vil gassene i brannrøyken kunne spre seg til store deler av rommet på kort tid og dermed forverre siktforholdene.

Når det gjelder betydning av ventilasjon, er det i denne studien ventilasjon som var prosjektert ut fra romstørrelse og bruk, og det er ikke studert brann uten aktiv ventilasjon. Likevel kan man si noe generelt om en slik brann også for tilfeller uten aktiv ventilasjon. Uten ventilasjon vil luftskiftingen være mindre, noe som fører til at gjennomsnittskonsentrasjoner av giftige gasser i rommet vil være høyere. Det er ikke mulig å si på en generell basis hvordan ventilasjonssystemet påvirker lokale gasskonsentrasjoner. Luftstrømmen fra en tilluftsventil kan for eksempel hjelpe å tynne ut giftige gasser, men kan også føre til at høyere gasskonsentrasjoner under taket transporteres nærmere gulvet og dermed mot personer i flukt- og rømningsveiene. På samme måte hjelper avtrekket å trekke ut giftige gasser, men kan også føre til at gassen sprer seg raskere på tvers av rommet. Elsparkesykkelen ble i brannforsøkene bevist plassert lengst unna avtrekket i korridoren for å simulere en antagelig worst case.

I mange eldre bygårder, er det kun ett trapperom som rømningsvei, eksempelvis i mange såkalte 1890-bygårder⁶ som typisk er murgårder over 6-7 etasjer. Disse trapperommene er som regel uventilerte. Vi kan ikke si noe nøyaktig om røykspredningen oppover i et slikt trapperom ut fra de eksperimentelle resultatene i denne studien. Dersom noen har lagret eller ladet en elsparkesykkel i en av de nedre etasjene i et slikt trapperom, og denne tar fyr, kan vi likevel med sikkerhet si at en slik brann vil kunne påvirke rømningsforholdene i trapperommet vesentlig. Man vil da måtte rømme igjennom brannrøyken for å komme seg ut. På grunn av de giftige gassene som dannes ved en brann i en litium-ion batteri vil ikke dette være heldig.

Ventilasjon påvirker hvordan brannrøyken sprer seg, men det vil aldri være heldig å måtte rømme gjennom brannrøyk fra en elsparkesykkel som brenner.

⁶ 1890-gård er en fellesbetegnelse på bygårder av mur som ble bygd i perioden ca 1860-70 til 1920-40

7 Tips og anbefalinger

Her oppsummeres tips og anbefalinger fra denne studien. Den viktigste anbefalingen er:

Unngå lagring og lading av elsparkesykler og lignende i oppholdsrom og rømningsveier.

Tips og anbefalinger til befolkningen:

- Følg ladeveireglene [3] og rådene for trygg lading av elsparkesykler [5].
- Ikke lad batteriet hvis batteriet eller elsparkesykkelen er skadet.
- Lad i rom med fungerende røykvarsler.
- Elsparkesykkelen kan begynne å brenne, selv om de ikke står til lading.
- Elsparkesykkelen kan begynne å brenne selv om den er helt ny.
- Kjøp elsparkesykkel av god kvalitet, og ikke importer den selv. Dårlig kvalitet kan gi en økt fare for brann.
- Bruk originale batterier og originale ladere. Det er ikke alt som passer som bør brukes sammen.
- Oppbevar helst batteriene i romtemperatur, og unngå lading i minusgrader.

Tips og anbefalinger til byggeier:

- Tilrettelegg og finn gode løsninger for trygg lagring av elsparkesykler og annet lignende utstyr med litium-ion batterier. En god start er et dedikert område vekk fra rømningsvei, uten brennbart materiale i nærheten, med røykvarsler som fungerer og er koblet til brannalarmanlegg eller seriekoblet. Kan det være ute, så er det å foretrekke, men unngå helst direkte sollys og minusgrader.

Tips og anbefalinger til brannvesen:

- Lær fra og bruk DSBs veileder "Risikovurdering og håndtering av brann i Litium-ion batterier" fra 2021 [17].

8 Konklusjoner

Totalt seks storskala brannforsøk i testbygning bygget for å simulere en skolebygning med tre rom og fullverdig komfortventilasjonssystem ble gjennomført. Brannforsøkene viste at forsøksoppsettet inkludert metoden for å igangsette *thermal runaway* (pilotflamme) førte til god repeterbarhet. I alle forsøkene ble romtemperaturen i fire forskjellige høyder og rett ved batteriet målt. I tillegg ble konsentrasjonen av følgende gasser målt i to målepunkter per rom: CO₂, CO, O₂, HCl, HF, HCN, SO₂, CH₂O, NO og NO₂. Et av målepunktene var plassert nærme elsparksykkelen, mens det andre var plassert lenger unna.

Denne studien har vist at en thermal runaway i et litium-ion batteri fører til en rask og eksplosjonsartet brannutvikling, med jetflammer og brennende utkast som lander langt vekk fra der brannen startet. Varigheten på den eksplosjonsartede brannen var mellom ca. 3 minutter og 7 minutter for de ulike forsøkene. Innen 3,5 minutter etter siste smell fra batteriet hadde hele brannen dødd ut i alle forsøkene utenom for en test hvor framhjulet fortsatte å brenne.

Brann i et elsparksykelbatteri eller lignende litium-ion batterier kan føre til rask røykspredning til hele rommet. Om røyken sprer seg først i et sjikt under taket eller om røyken blandes raskt, er avhengig av rommets størrelse og ventilasjonsforholdene. Ventilasjonssystemet kan blant annet føre til at røykkonsentrasjonen ved en gitt høyde er høyere lenger bort fra brannen enn direkte ved siden av brannen. Generelt fører ventilasjonssystemer med høye luftutskiftingsrater til at røyken raskere trekkes ut fra brannrommet. På grunn av den raske røykspredningen vil sikten i rommet påvirkes etter kort tid og gjøre rømningen vanskeligere.

Selv om en elsparksykelbatteribrann danner mye røyk så er den avgitte energien ikke høy nok for å øke romtemperaturen til et kritisk nivå. Nært brannen er det, likevel, stor fare for spredning av brannen til andre brennbare materialer i rommet, siden litium-ion batterier ofte brenner med jetflammer. Utkast av brennende battericeller kan også føre til brannspredning relativt langt bort fra selve batteriet.

Gassmålingene i brannforsøkene registrerte både kvelende og irriterende gasser. På grunn av batteristørrelsen, som påvirker hvor mye gass det dannes, i forhold til romstørrelse og ventilasjonsforholdene var den beregnede kritiske konsentrasjonen av irriterende gasser (FEC) i alle forsøkene under den valgte grenseverdi av 0,1. Selv om FEC verdien var under 0,1 i alle forsøkene hadde folk i brannrommet begynt å kjenne en effekt fra noen av de giftige gassene. Denne effekten hadde imidlertid ikke vært invalidiserende. FED, altså den kritiske dosen for kvelende gasser, ble først oppnådd etter 23 til 30 minutter. Det er viktig å huske at konsentrasjonen av giftige gasser i et rom på grunn av en brann i en litium-ion batteri er veldig avhengig av forholdet mellom batteristørrelse, romstørrelse og ventilasjonsforholdene, som allerede nevnt. Det vil si at for et større batteri eller i et mindre rom hadde grenseverdiene kunne blitt oversteget.

Konklusjonene fra denne studien er relevant for alle publikumsbygg, men er spesielt viktig for bygg hvor det oppholder seg over gjennomsnittlig mange barn eller eldre. Små barn og eldre er spesielt utsatt for kvelende giftstoffer. Det kan også tenkes at deres reaksjon til en plutselig startende brann i et litium-ion batteri med jetflammer, høye eksplosjonsaktige lyder og brennende utkast, kan påvirke deres evne å reagere på situasjonen og rømme fra bygget.

Elsparkesykkelen som ble brukt i brannforsøkene hadde et plastdeksel på undersiden av batteriet, som ble fjernet før forsøkstarten. På grunn av den høye flammetemperatur antas det at dekselet hadde brent opp ved en ekte batteribrann. Dermed forventes at man hadde sett lignende brennende utkast som observert i brannforsøkene. Mange elsparesykler bruker metalldeksler på undersiden av batteriet. Det anbefales å gjennomføre branntester med flere modeller for å undersøke om det finnes et design som er tryggere på generell basis. Dette kan undersøkes uten å bygge en ekstra testbygning som gjort i denne studien,

Den viktigste anbefalingen fra denne rapporten er å unngå lagring og lading av elsparesykler og lignende i oppholdsrom og rømningsveier. I tillegg presenteres konkrete tips og anbefalinger for befolkningen, for byggeiere og for brannvesen.

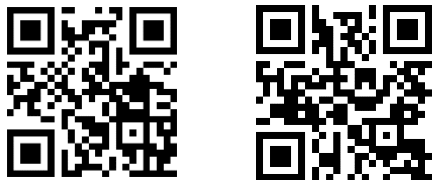
9 Referanser

- [1] ‘Over 40 branner knyttet til elsparkesykler – ber brukerne melde om feil’, <https://www.nrk.no>, 26 Jun. 2022. [Online]. Available: <https://www.nrk.no/vestfoldogtelemark/dsb-tar-grep-etter-at-flere-branntilfeller-med-elsparkesykler-1.16012491>.
- [2] Norsk brannvernforening, ‘1 av 3 lader el-sparkesykkelen i fluktvei’, <https://brannvernforeningen.no>, 9. 2022. [Online]. Available: <https://brannvernforeningen.no/nyheter/2022/09/1-av-3-lader-el-sparkesykkelen-i-fluktvei/>.
- [3] DSB, ‘Ladevett for trygg lading’. [Online]. Available: <https://www.sikkerhverdag.no/strom/el-produkter/ladevett-for-trygg-lading/>.
- [4] Brannfaglig fellesorganisasjon (BFO), ‘Veiledning for oppbevaring og lading av el-sykler / -sparkesykler’, www.bfobrann.no, Feb. 2022. [Online]. Available: <https://www.bfobrann.no/fag/veiledning-for-oppbevaring-og-lading-av-el-sykler-sparkesykler>.
- [5] DSB, ‘Trygg lading av elektrisk sykkel, sparkesykkel og ståbrett’. [Online]. Available: <https://www.sikkerhverdag.no/strom/el-produkter/trygg-lading-av-elektrisk-sykkel-sparkesykkel-og-stabrett/>.
- [6] H. Hugo, ‘Hvor trygge er batteridrevne fremkomstmidler?’, www.brennaktuelt.no, 21 Mar. 2022. [Online]. Available: <https://www.brennaktuelt.no/bfo-brann-brannbeskyttelse/hvor-trygge-er-batteridrevne-fremkomstmidler/112539>.
- [7] Bokmålsordboka, Språkrådet og Universitetet i Bergen, ‘Elsparkesykkel’, Ordbøkene.no, Lest oktober. 2022. [Online]. Available: <https://ordbokene.no/bm/114006/elsparkesykkel>.
- [8] Språkrådet, ‘Elsparkesykkel?’, Lest oktober. 2022. [Online]. Available: <https://www.sprakradet.no/svardatabase/sporsmal-og-svar/elsparkesykkel/>.
- [9] International Organization for Standardization, ‘ISO 13571 Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires.’ International Organization for Standardization, 2012.
- [10] ‘Kollegiet for brannfaglig terminologi’, 2023. [Online]. Available: <http://www.kbt.no>.
- [11] Alex, ‘How Much Does an Electric Bike Battery Cost?’, eBikesHQ.com.
- [12] ‘Hjelp meg å velge: Batteri’, dell.com, Nov. 2022. [Online]. Available: <https://www.dell.com/no-no/shop/help-me-choose/cp/hmc-battery-consumer-laptop>.
- [13] ‘Sammenligning reell størrelse batteri ELBILER’, elbilforum.no, 2013.
- [14] K. Mathias, H. U. Eirik, and V. Marius, ‘Hvor stort elbilbatteri trenger du egentlig?’, Teknisk Ukeblad, desember. 2020. [Online]. Available: <https://www.tu.no/artikler/hvor-stort-elbilbatteri-trenger-du-egentlig/504642>.
- [15] R. F. Mikalsen *et al.*, ‘Energieffektive bygg og brannsikkerhet’, RISE Fire Research, Trondheim, Norge, RISE-rapport 2019:02, ISBN: 978-91-88907-16-5, Apr. 2019.
- [16] A. S. Bøe and K. Glansberg, ‘Brannrisiko ved lagring av ikke-tilkoblede litium-ion og litiumbatterier’, RISE Fire Research, Trondheim, Norge, RISE-rapport 2019:98, 2019.
- [17] DSB, *Risikovurdering og håndtering av brann i Litium-ion batterier, veileder for brann- og redningsvesen*, 1st ed. Tønsberg, Norway: Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), 2021.
- [18] C. Meraner, T. Li, and C. S. Meliá, ‘Avgassing fra litium-ion batterier i hjemmet’, RISE Fire Research, Trondheim, Norway, RISE-rapport 2021:17, 2021.
- [19] ‘Kollegiet for brannfaglig terminologi’, 2022. [Online]. Available: <http://www.kbt.no>.
- [20] D. Drysdale, ‘Diffusion Flames and Fire Plumes’, in *An Introduction to Fire Dynamics*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011, pp. 121–179.
- [21] K. Gibson, ‘At least 19 killed this year in hoverboard, e-scooter fires, feds say’, CBS News, 22 Dec. 2022. [Online]. Available: <https://www.cbsnews.com/news/e-scooter-hoverboard-fires-deaths-injuries-feds/>. [Accessed: 25 Jan. 2023].
- [22] Norges forskningsråd, ‘BRAVENT - Effektiv røykventilering av små branner’, Prosjektbanken, 30 Nov. 2022. [Online]. Available: <https://prosjektbanken.forskningsradet.no/project/FORISS/321099?Kilde=FORISS&distri>

- ution=Ar&chart=bar&calcType=funding&Sprak=no&sortBy=date&sortOrder=desc&result
Count=30&offset=0&Fritekst=bravent. [Accessed: 30 Nov. 2022].
- [23] R. Bisschop, P. Andersson, C. Forsberg, and J. Hynynen, ‘Lion Fire II - Extinguishment and Mitigation of Fires in Lithium-ion Batteries at Sea’, RISE Research Institutes of Sweden, Borås, 2021:111, 2021.
- [24] Ben Gully *et al.*, ‘Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression’, DNV GL, 2019–1025, Rev. 4, Nov. 2019.
- [25] ‘Lithium-Ion Battery Safety Issues for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles’, National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 812 418, Oct. 2017.
- [26] ‘SN-INSTA/TS 950:2014 Analytisk brannteknisk prosjektering - Komparativ metode for verifikasjon av brannsikkerhet i byggverk’. Standard Norge, 2014.
- [27] ‘E-Bike and E-Scooter Safety’. National Fire Protection Association. NFPA, 2022.
- [28] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist, A. Lorén, and B.-E. Mellander, ‘Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests’, *Journal of Power Sources*, vol. 271, pp. 414–420, Dec. 2014.
- [29] F. Larsson, ‘Lithium-ion Battery Safety - Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation’, Chalmers, Göteborg, Sweden, 2017.
- [30] A. K. Storesund, R. F. Mikalsen, and H. Ishol, ‘Rømning i brann. Funksjonen til ulike visuelle ledesystemer.’, SP Fire Research AS, SPFR A14113, ISBN 978-82-14-00130-3, Sep. 2014.

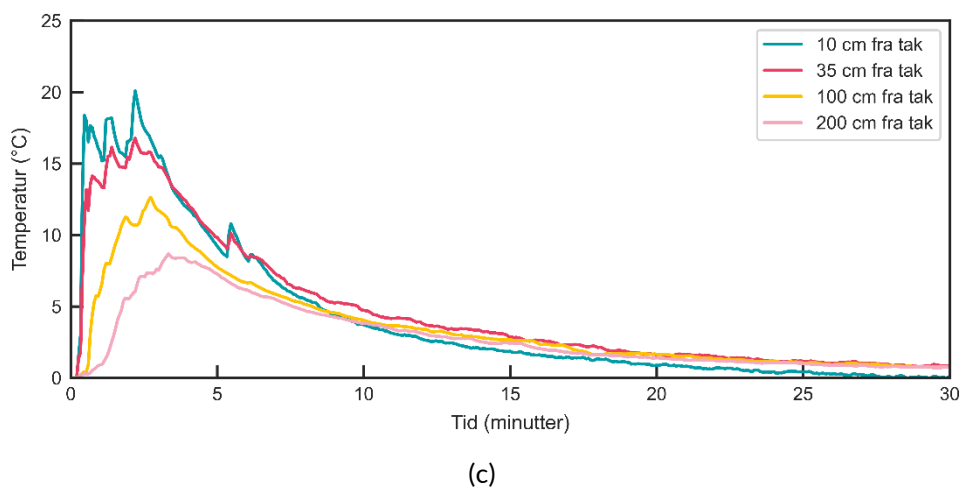
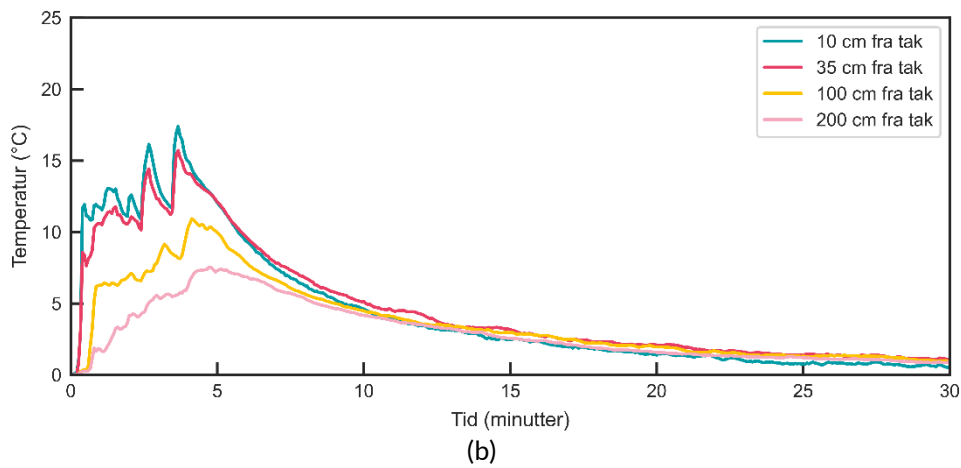
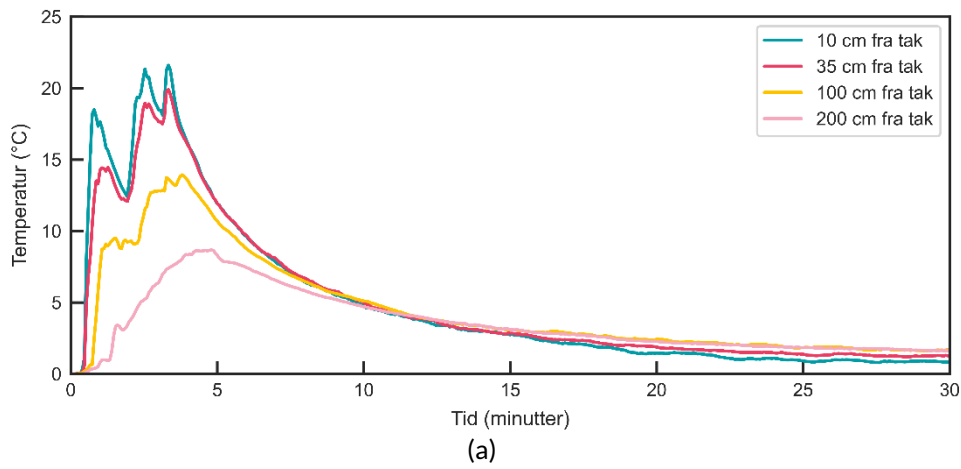
Vedlegg A: Videomateriale

Videomateriale fra studien er tilgjengelig via QR kodene eller lenken under.



<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-64169>

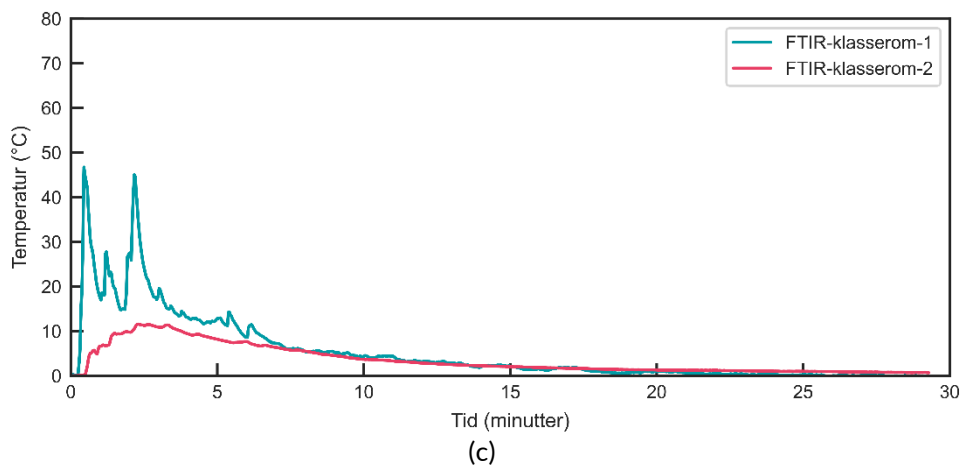
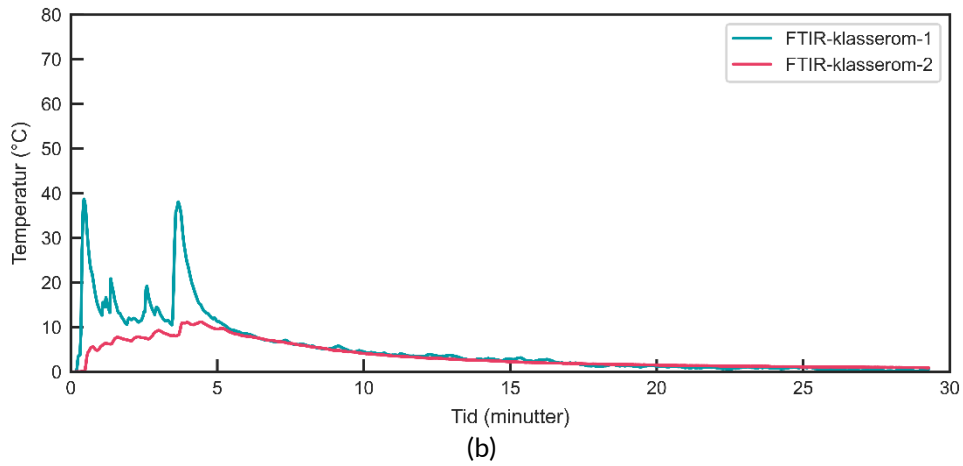
Vedlegg B: Måledata klasserom



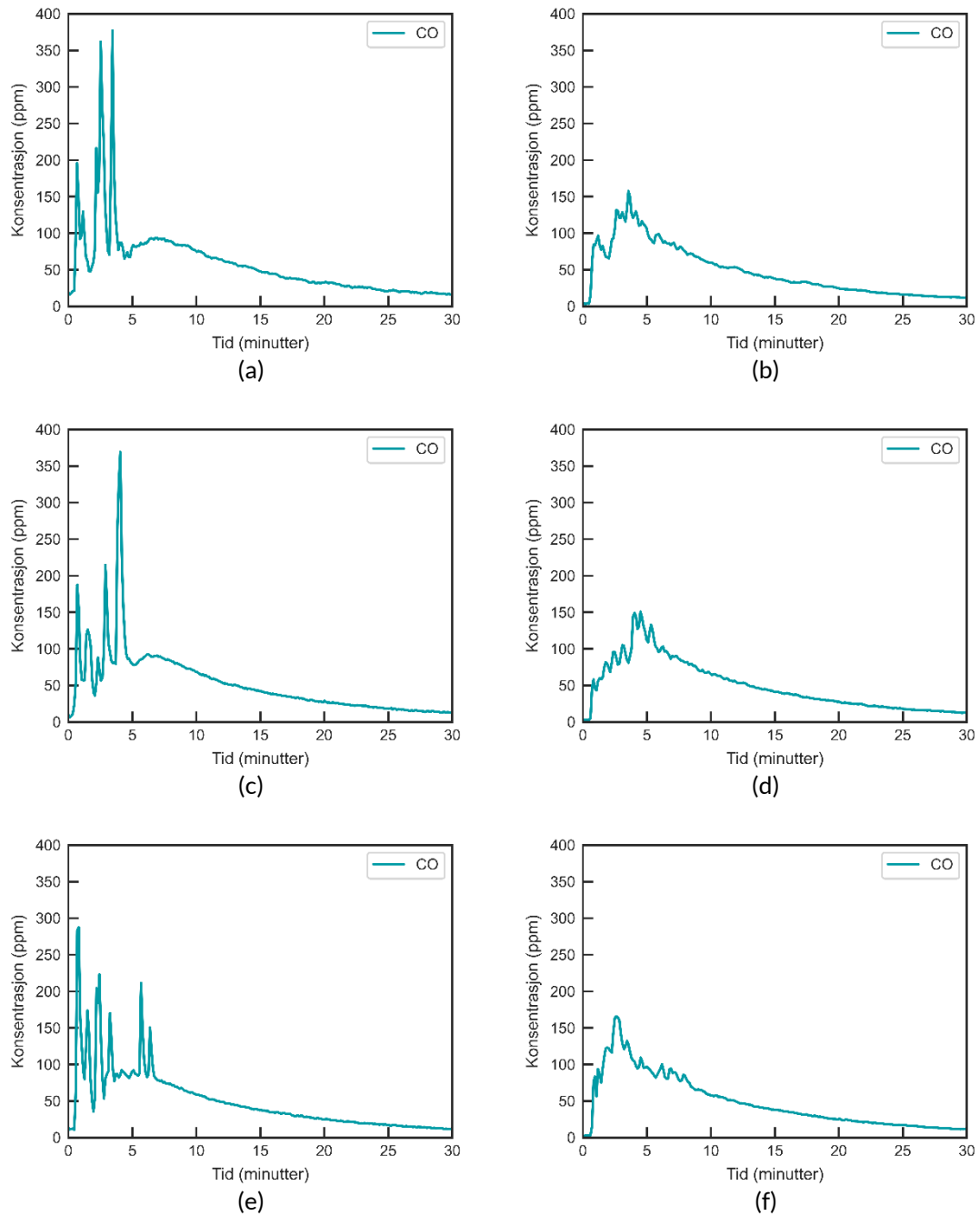
Figur 9-1: Temperaturøkning i ulike høyder i klasserommet sfa tid fra den eksplosjonsartedebrannen startet. (a) Test 1, (b) Test 2 og (c) Test 3.

Data mangler fra Test 1

(a)



Figur 9-2: Temperaturøkning ved FTIR målepunktene i klasserommet sfa tid fra den eksplosjonsartede brannen startet. (a) Data mangler for Test 1, (b) Test 2 og (c) Test 3.

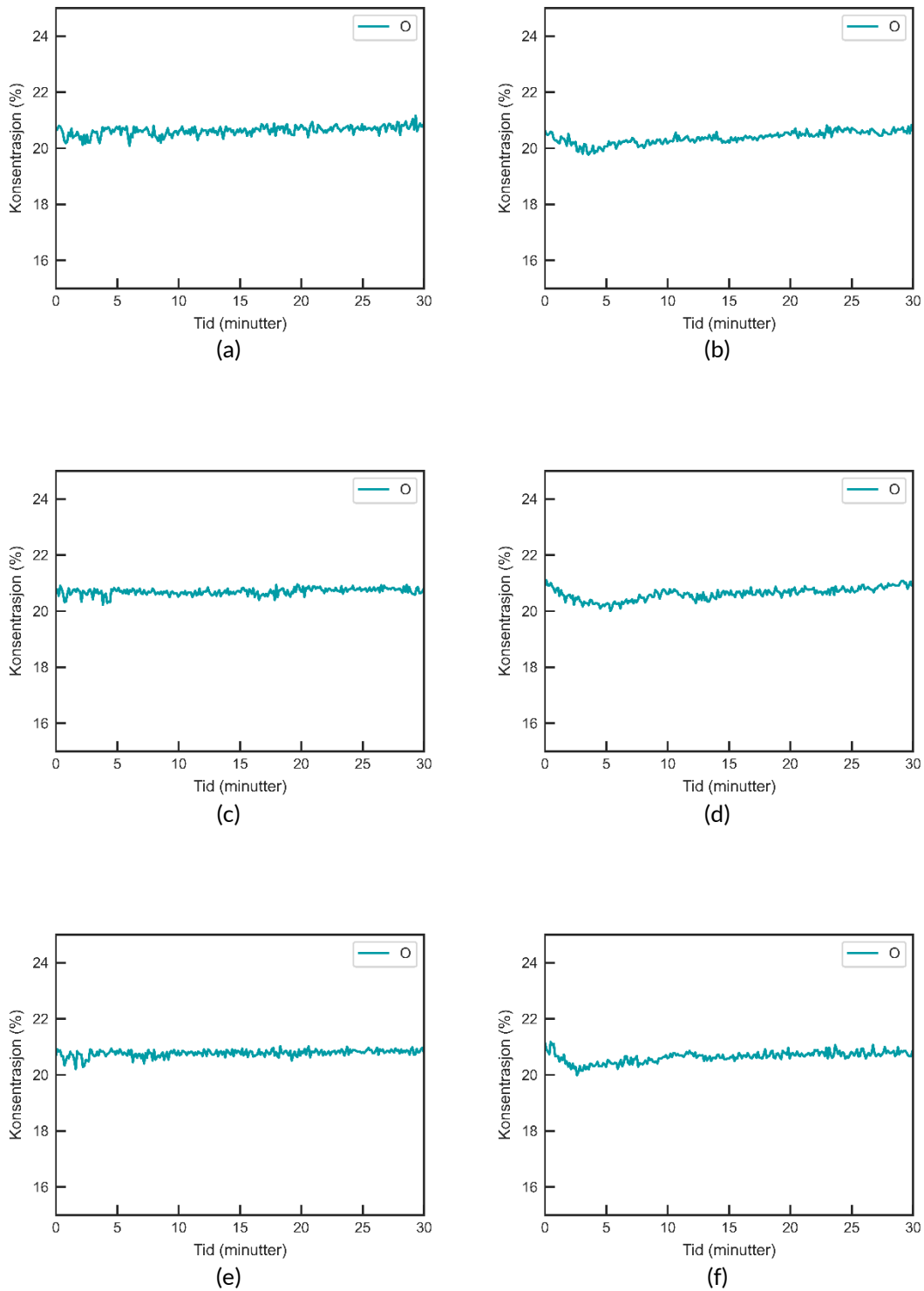


Figur 9-3: CO konsentrasjon for Test 1-3 i klasserommet sfa tid fra start av den eksplosjonsartede brannen.

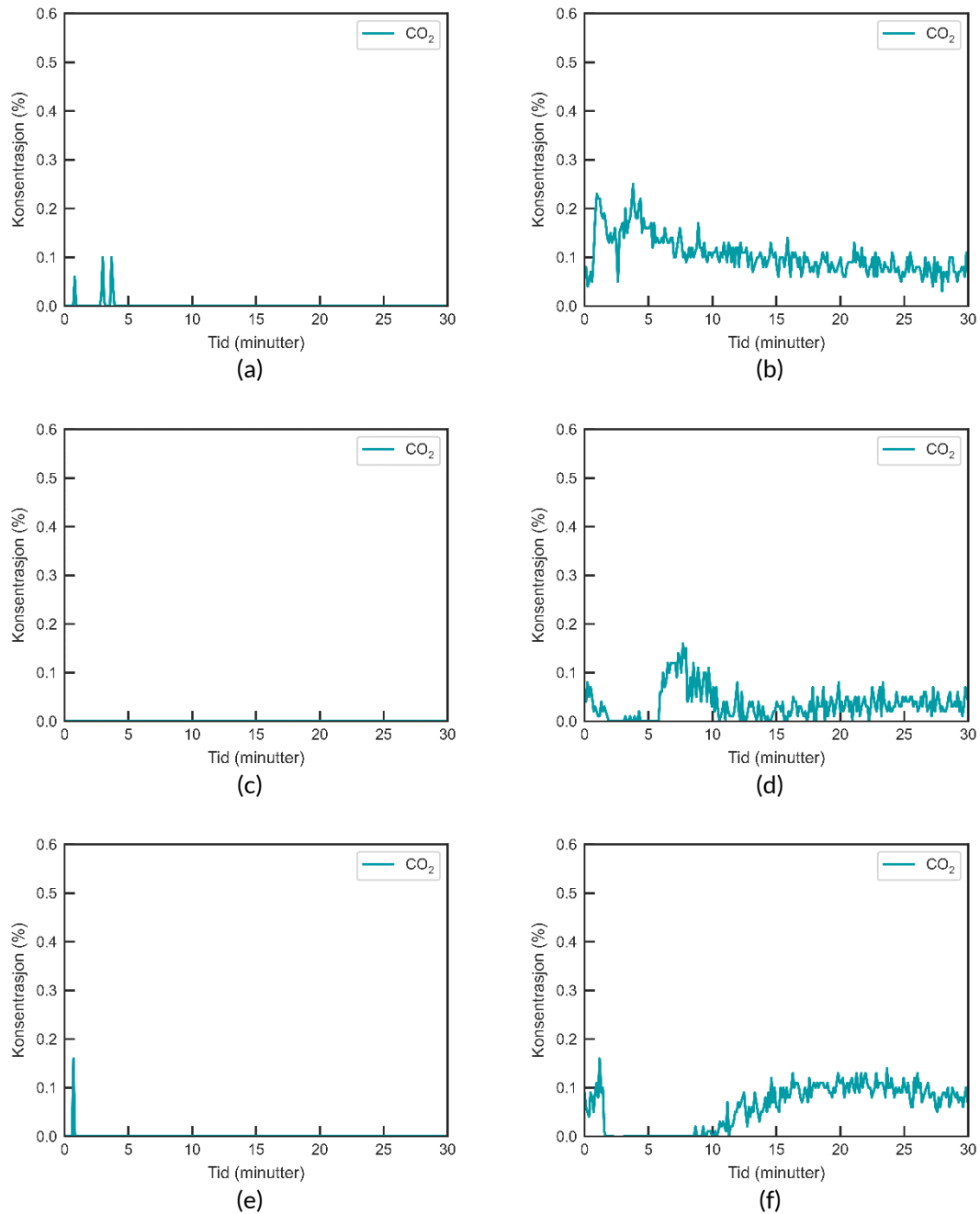
Test 1: (a) FTIR-klasserom-1 (b) FTIR-klasserom-2.

Test 2: (c) FTIR-klasserom-1 (d) FTIR-klasserom-2.

Test 3: (e) FTIR-klasserom-1 (f) FTIR-klasserom-2.



Figur 9-4: O₂ konsentrasjon (volum %) for Test 1-3 i klasserommet sfa tid fra start av den eksplosjonsartede brannen.
 Test 1: (a) FTIR-klasserom-1 (b) FTIR-klasserom-2.
 Test 2: (c) FTIR-klasserom-1 (d) FTIR-klasserom-2.
 Test 3: (e) FTIR-klasserom-1 (f) FTIR-klasserom-2.

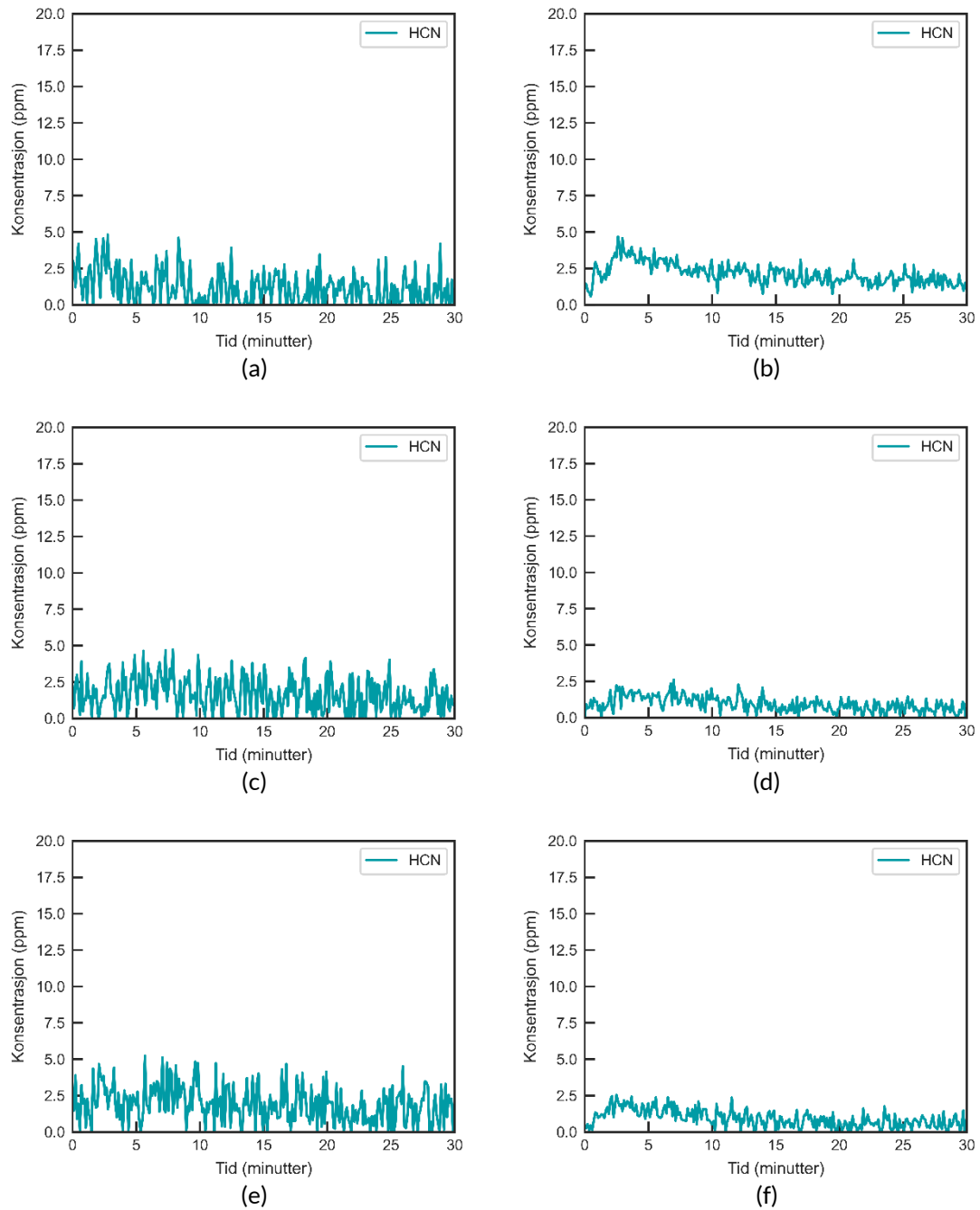


Figur 9-5: CO₂ konsentrasjon (volum %) for Test 1-3 i klasserommet sfa tid fra start av den eksplosjonsartede brannen.

Test 1: (a) FTIR-klasserom-1 (b) FTIR-klasserom-2.

Test 2: (c) FTIR-klasserom-1 (d) FTIR-klasserom-2.

Test 3: (e) FTIR-klasserom-1 (f) FTIR-klasserom-2.



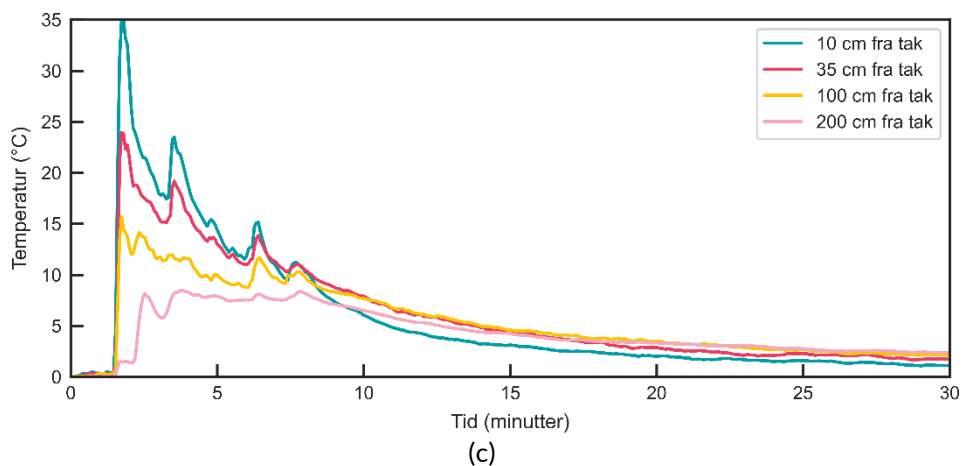
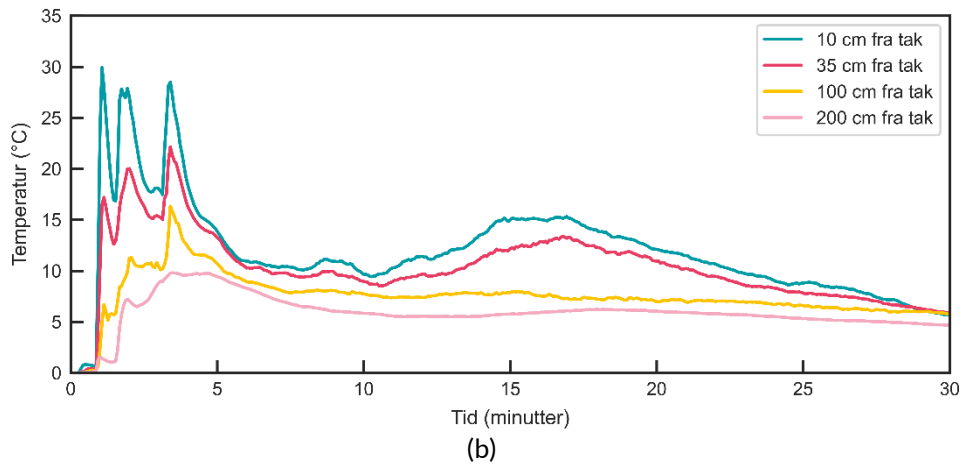
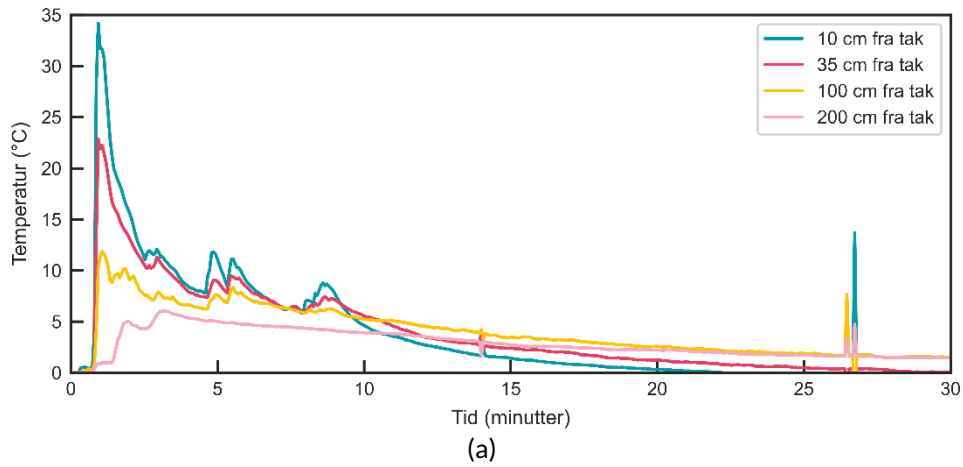
Figur 9-6: HCN konsentrasjon for Test 1-3 i klasserommet sfa tid fra start av den eksplosjonsartede brannen.

Test 1: (a) FTIR-klasserom-1 (b) FTIR-klasserom-2.

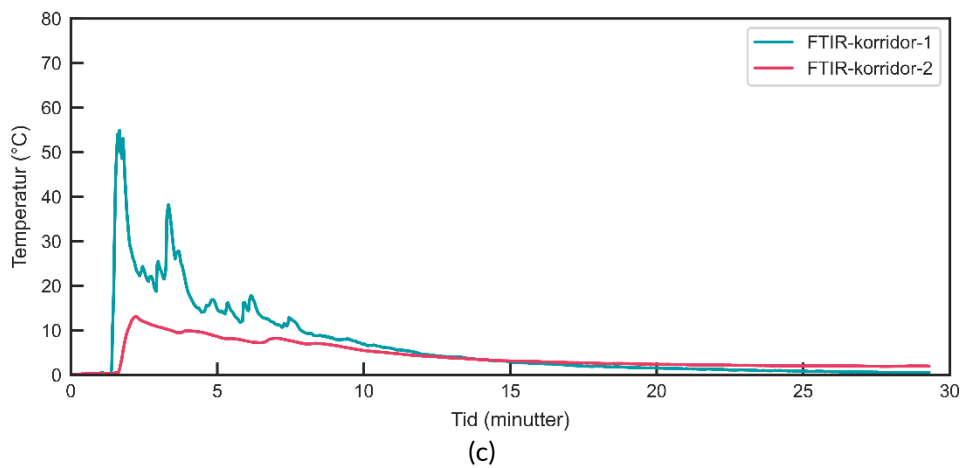
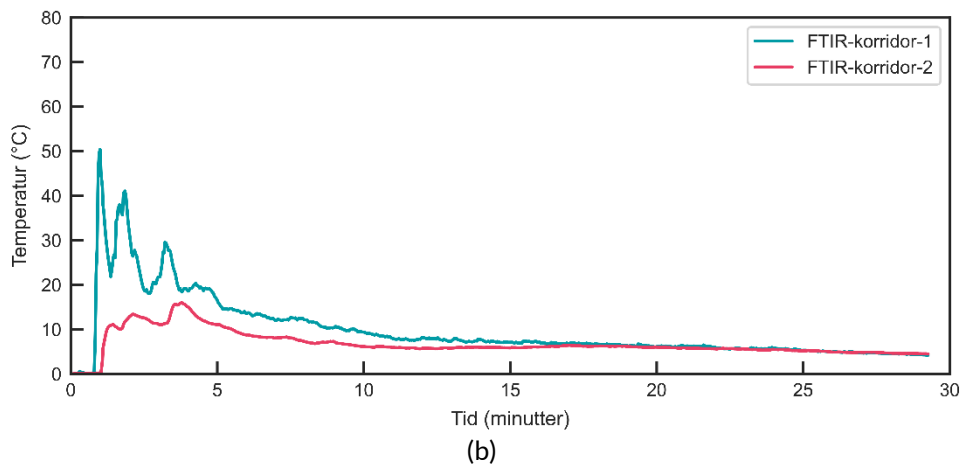
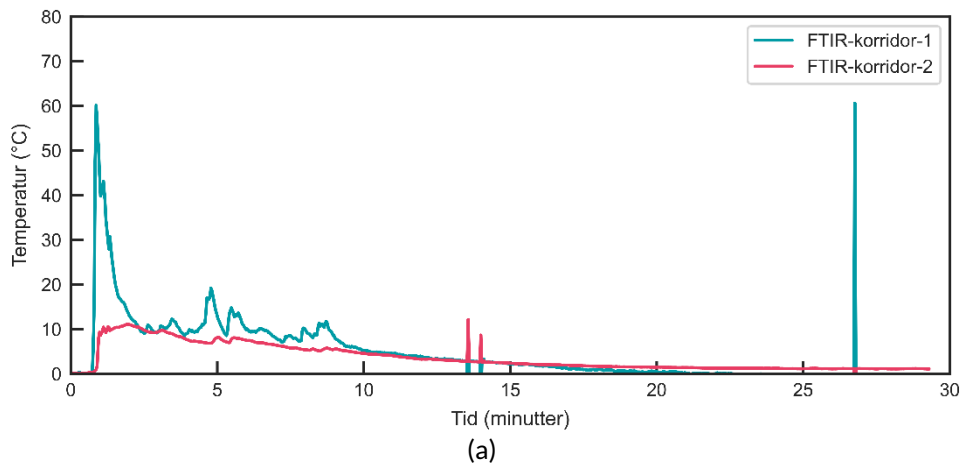
Test 2: (c) FTIR-klasserom-1 (d) FTIR-klasserom-2.

Test 3: (e) FTIR-klasserom-1 (f) FTIR-klasserom-2.

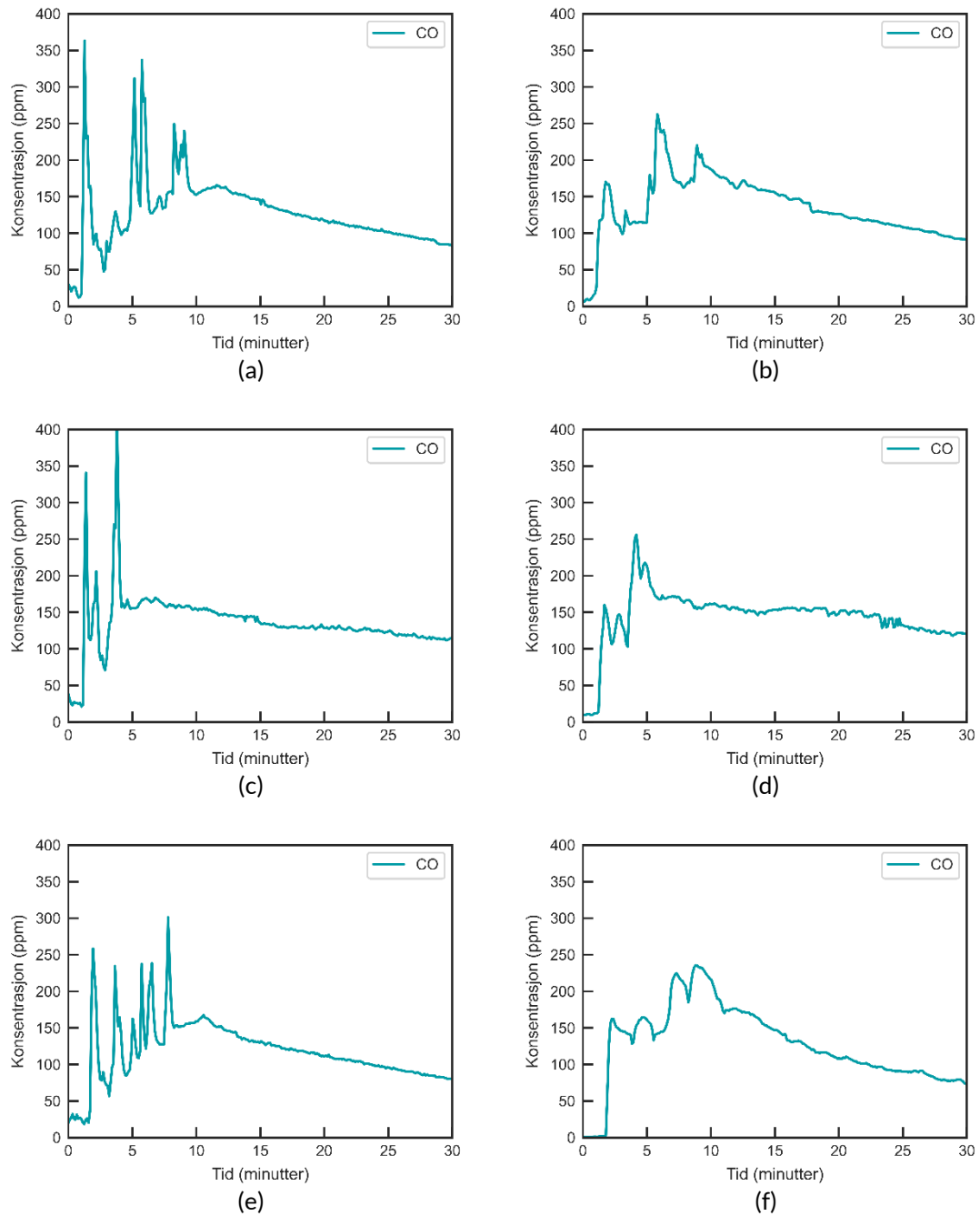
Vedlegg C: Måledata Korridor



Figur 9-7: Temperaturøkning i ulike høyder i korridoren sfo tid fra den eksplosjonsartede brannen startet. (a) Test 4, (b) Test 5 og (c) Test 6.



Figur 9-8: Temperaturøkning ved FTIR målepunktene i korridoren sfa tid fra den eksplosjonsartede brannen startet. (a) Test 4, (b) Test 5 og (c) Test 6.

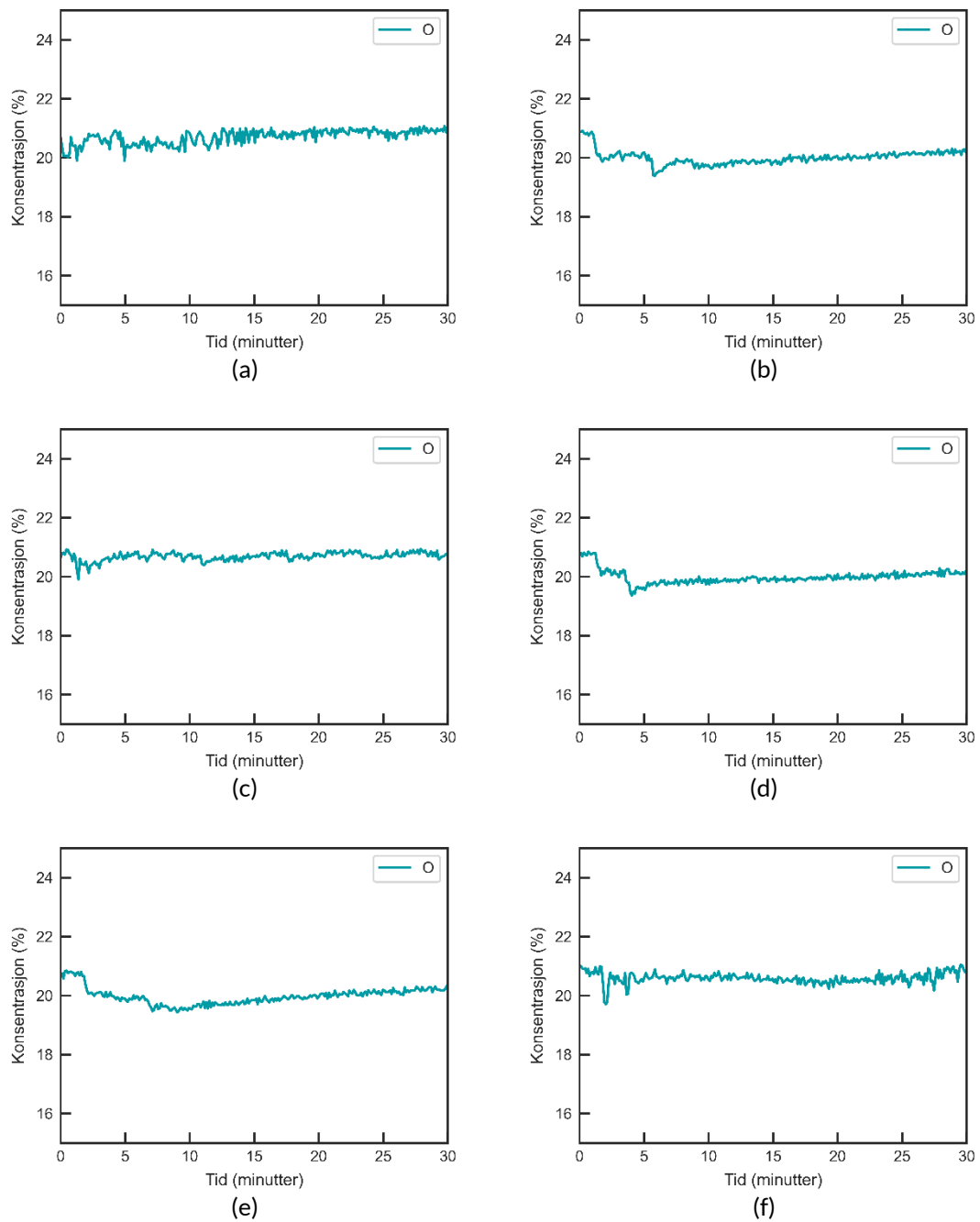


Figur 9-9: CO konsentrasjon for Test 4-6 i klasserommet sfa tid fra start av den eksplosjonsartede brannen.

Test 4: (a) FTIR-korridor-1 (b) FTIR- korridor -2.

Test 5: (c) FTIR- korridor -1 (d) FTIR- korridor -3.

Test 6: (e) FTIR- korridor -1 (f) FTIR- korridor -4.

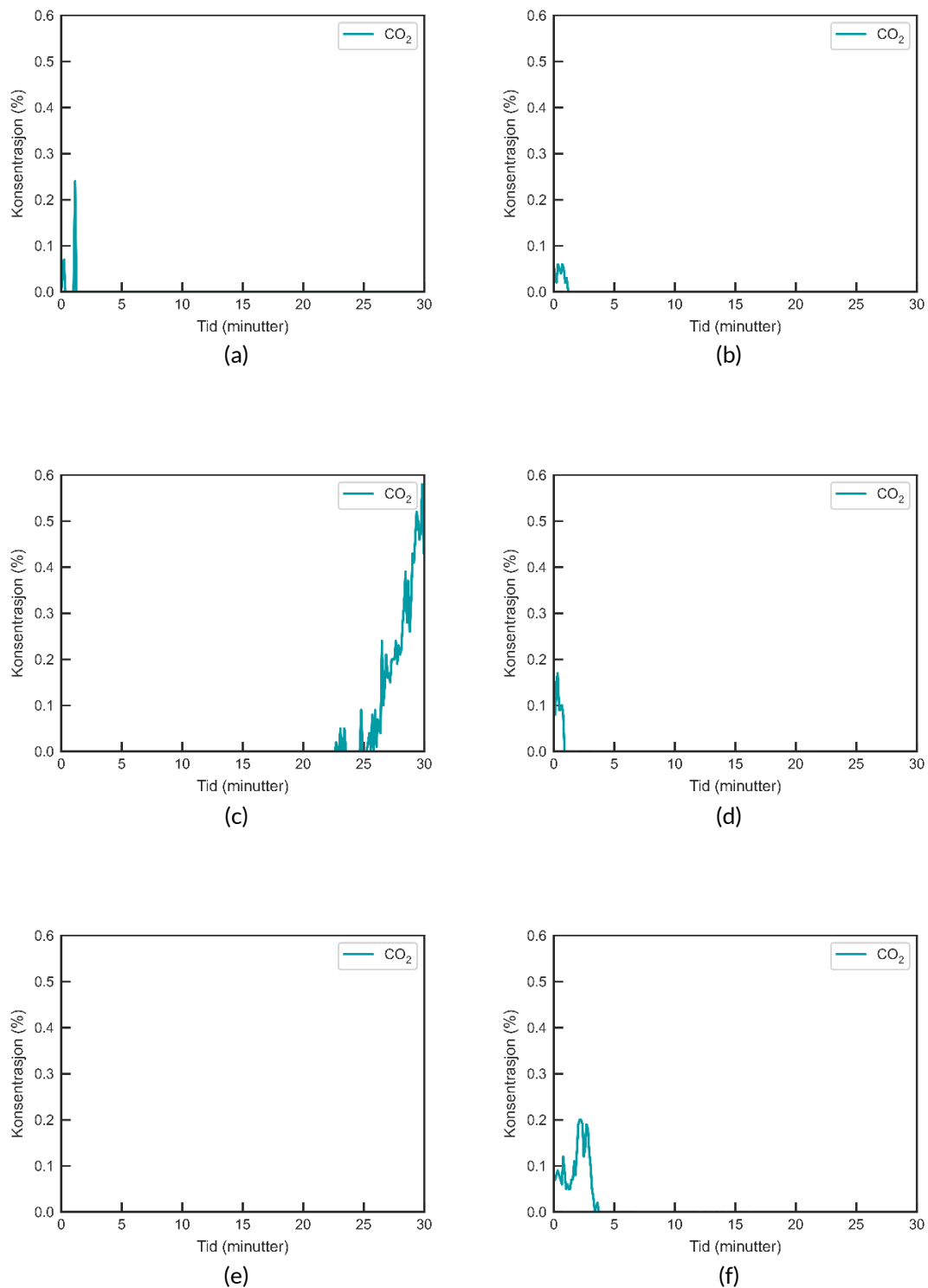


Figur 9-10: O₂ konsentrasjon (volum %) for Test 4-6 i klasserommet sfa tid fra start av den eksplosjonsartede brannen.

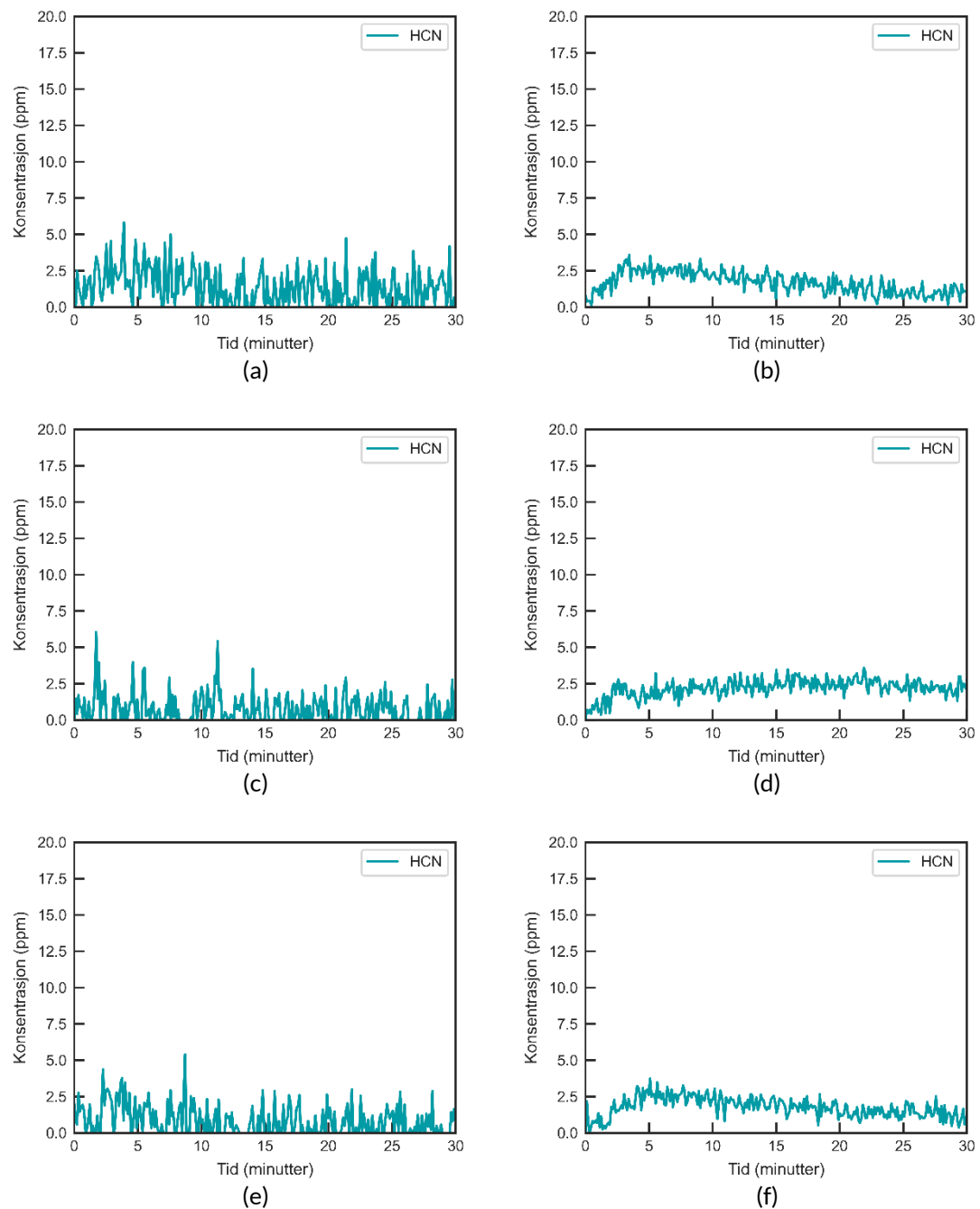
Test 4: (a) FTIR-korridor-1 (b) FTIR- korridor -2.

Test 5: (c) FTIR- korridor -1 (d) FTIR- korridor -3.

Test 6: (e) FTIR- korridor -1 (f) FTIR- korridor -4.



Figur 9-11: CO₂ konsentrasjon (volum %) for Test 4-6 i klasserommet sfa tid fra start av den eksplosjonsartede brannen.
 Test 4: (a) FTIR-korridor-1 (b) FTIR- korridor -2.
 Test 5: (c) FTIR- korridor -1 (d) FTIR- korridor -3.
 Test 6: (e) FTIR- korridor -1 (f) FTIR- korridor -4.



Figur 9-12: HCN konsentrasjon for Test 4-6 i klasserommet sfa tid fra start av den eksplosjonsartede brannen.

Test 4: (a) FTIR-korridor-1 (b) FTIR- korridor -2.

Test 5: (c) FTIR- korridor -1 (d) FTIR- korridor -3.

Test 6: (e) FTIR- korridor -1 (f) FTIR- korridor -4.

RISE – Research Institutes of Sweden

ri.se / info@ri.se / post@risefr.no / (+47) 464 18 000 / risefr.no
Postboks 4767 Torgarden, 7465 TRONDHEIM

RISE Fire Research AS
RISE Rapport: 2023:32
ISBN: 978-91-89757-78-3

