

Kartlegging av forskningsstatus innen brannetterforskning

Jan P. Stensaas, Anne Steen-Hansen og Christian Sesseng

SP Fire Research AS

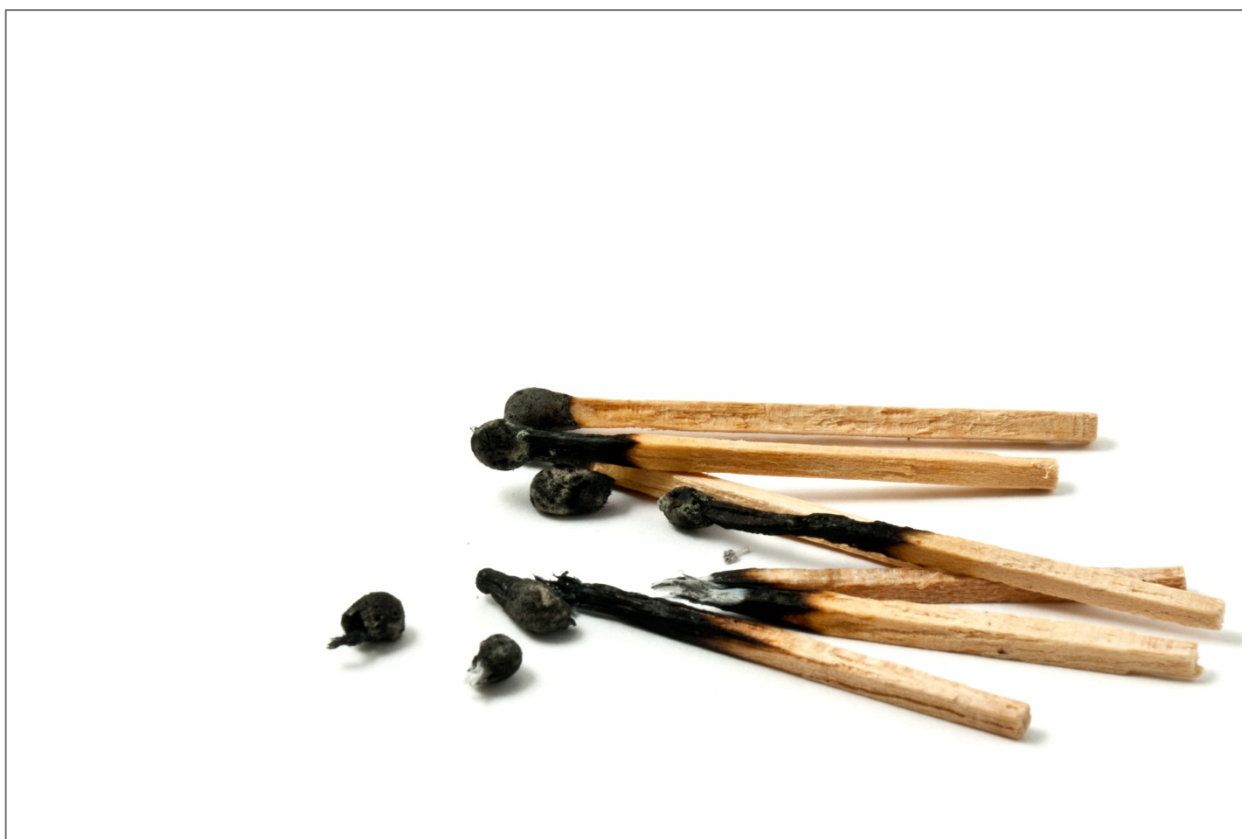


Foto: ID 23935950 © Panuwat Katlungka | Dreamstime.com

Kartlegging av forskningsstatus innen brannetterforskning

VERSJON 1		DATO 2015-11-27		NØKKELOORD: Brann Etterforskning Litteratur- studium
FORFATTERE Jan P. Stensaas, Anne Steen-Hansen og Christian Sesseng				
OPPDRA GSGIVER Norsk brannvernforening		OPPDRA GSGIVERS REF. Thor Kr. Adolfsen		
PROSJEKTNR. 20116		ANTALLSIDER OG VEDLEGG: 73 sider, ingen vedlegg		
SAMMENDRAG				
I dette prosjektet er det gjennomført et litteraturstudium der vi har kartlagt forskningsstatus innen utvalgte tema innenfor brannetterforskning. Det er gjennomført søk i aktuelle litteraturdatabaser for nasjonale og internasjonale publikasjoner, og i annen relevant faglitteratur som bøker og rapporter. Utvalgte relevante forskningsinstitusjoner og fagmiljøer er også kontaktet for å undersøke status innenfor de aktuelle temaene. Følgende prioriterte emner er undersøkt: • Brennbare væsker • Antennelse ved gnister, glør og varme partikler • Batterier • Selvantennelse				
UTARBEIDET AV Christian Sesseng		SIGNATUR		
KONTROLLERT AV Anne Steen-Hansen		SIGNATUR		
GODKJENT AV Paul-Halle Zahl Pedersen		SIGNATUR		
RAPPORTNR. A15 20116:1	ISBN	GRADERING Åpen	GRADERING DENNE SIDE Åpen	

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1	2015-11-27	Første versjon.

Innholdsfortegnelse

Forord	5
Sammendrag	6
English summary	7
1 Innledning	8
1.1 Bakgrunn	8
1.2 Arbeidsbeskrivelse	8
2 Brennbare væsker	9
2.1 Innledning	9
2.2 Faktorer som har betydning for å finne spor etter brennbar væske	9
2.3 Mulighet for falsk påvisning av brennbar væske	11
2.4 Påvisning av spor etter brennbare væsker ved UV-lys og kamera	16
2.5 Alternative analysemetoder	16
2.6 SINTEF/Kripos-prosjektet «Bestemmelse av branntekniske spor etter bruk av brennbar væske»	20
2.6.1 Forsøksoppsettet og forsøkene	20
2.6.2 Forsøkene	21
2.6.3 Bruk av "Sniffer"	25
2.6.4 Betydningen av tilførsel av sløkkevann	25
2.6.5 Konklusjoner fra studien	26
2.7 Oppsummering	28
3 Brann som følge av gnister, glør og varme partikler	30
3.1 Innledning	30
3.2 Antennelse av trevirke	30
3.3 Antennelse av brennbart støv	32
3.4 Antennelse av biologisk materiale	32
3.5 Antennelse ved sigaretter	33
3.5.1 RIP-sigaretter	33
3.5.2 Egenskaper ved tradisjonelle sigaretter	34
3.5.3 Ulmebrann i stoppete møbler	35
3.5.4 Hva betyr møbeltrekket for antennelse?	37
3.5.5 Hva skjer med RIP-sigaretter dersom de tildekkes?	38
3.5.6 Antennelse av andre materialer med sigaretter	39
3.6 Hva må til for at en varm partikkel skal antenne olje- og spritbaserte væsker?	40
3.6.1 Generelt om antennelse av brennbare væsker	40
3.6.2 Flammepunktet til en brennbar væske	41
3.6.3 Hva må til for at en varm partikkel skal antenne en brennbar væske eller gass?	42
3.7 Oppsummering	46
4 Brann i batterier	47
4.1 Generelt	47
4.2 Batterityper	47
4.2.1 Blybatterier	48
4.2.2 Litium-ionbatterier	50
4.3 Feil i batterier som kan medføre brann	51
4.3.1 Termisk årsak	53
4.3.2 Mekanisk årsak	53

4.3.3	Elektrisk årsak	54
4.3.4	Dårlig elektrokjemisk design	54
4.3.5	Produksjonsfeil	54
4.3.6	Faktorer som påvirker effekten av feil i batterier	55
4.3.7	Sikringsmekanismer	55
4.4	Oppsummering	59
5	Innspill fra politidistriktene om tema man bør se nærmere på	60
5.1	Selvantennelse	60
5.1.1	Generelt	60
5.1.2	Hyppigheten av selvantennelse i Norge	61
5.1.3	Nødvendige betingelser for selvantennelse	62
5.1.4	Ekstern antennelse versus selvantennelse	63
5.1.5	Materialer som er i stand til å forårsake selvantennelse	63
5.1.6	Pyrofort tre («selvantennelig tre»)	64
5.1.7	Treolje	64
6	Videre arbeid	67
6.1	Hva fant vi ikke svar på i forskningslitteraturen	67
6.2	Forslag til videre arbeid	67
6.2.1	Spor etter bruk av tennbriketter og stearinlys	68
6.2.2	Betingelsene for antennelse ved varme partikler	68
6.2.3	Spor etter primær og sekundær brann i batterier	69
	Referanser	70

Forord

Da Norsk brannvernforening utarbeidet sin *Håndbok i brannetterforskning*, var det en rekke tema innenfor brannetterforskning det var vanskelig å finne forskningslitteratur om. Norsk brannvernforening tok derfor initiativ til å få gjennomført et forprosjekt, et litteraturstudium, som skulle kartlegge forskningsstatus og eventuelle kunnskapshull, innen brannetterforskning. Denne rapporten presenterer resultatene av dette forprosjektet.

Forprosjektet ble finansiert av Norsk brannvernforening, Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, Politidirektoratet, UNI-stiftelsen, Sparebank1 og Tryg Forsikring. Styringskomiteen for prosjektet har bestått av representanter fra Norsk brannvernforening, Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, Politidirektoratet og KRIPOS.

Christian Sesseng
Prosjektleder

Trondheim, 27.11.2015

Sammendrag

I denne rapporten presenteres resultatene fra et litteraturstudium der forskningsstatusen for utvalgte områder innen brannetterforskning er kartlagt. Vi har kartlagt og sammenfattet tilgjengelig kunnskap innenfor brannetterforskningsfeltet, samt vurdert kvaliteten til de kildene som er brukt som grunnlag. Noen kilder er for eksempel fagfellevurdert, slik tilfellet er i vitenskapelige publikasjoner. For andre kilder kan påstander og konklusjoner være litt mer usikre, og da har vi vurdert om det er behov for mer arbeid innenfor spesifikke områder.

Det er gjennomført søk i aktuelle litteraturdatabaser for nasjonale og internasjonale publikasjoner, og i annen relevant faglitteratur, som bøker og rapporter. Utvalgte relevante forskningsinstitusjoner og fagmiljøer er også kontaktet for å undersøke status innenfor de aktuelle temaene. Følgende prioriterte emner er undersøkt:

- Brennbare væsker
- Antennelse ved gnister, glør og varme partikler
- Batterier
- Selvantennelse

Innenfor hvert emne var det i samarbeid med styringskomiteen satt opp en liste med spørsmål som vi ville prøve å besvare gjennom studien. I hvilken grad vi har funnet svar på spørsmålene, er oppsummert i slutten av hvert kapittel.

English summary

This report presents the results from a literature review of the state-of-the-art of fire investigation. We have reviewed and summarized available knowledge and assessed the quality of the references. Some references are peer reviewed, which is common for scientific publications, whereas for other references, there may be uncertainties regarding statements and conclusions. In such cases, we have assessed whether or not there is a need for further studies in order to conclude.

We have made queries in national and international scientific literature databases and searched for other relevant technical literature, such as books and reports. A selection of relevant research institutions and communities have been contacted to get more information on the status of the topics of interest. The following prioritized subjects have been looked into:

- Flammable liquids
- Ignition by sparks, embers and hot particles
- Batteries
- Autoignition

For each subject, a set of questions was defined in collaboration with the project's steering committee. To what degree we have managed to find literature answering the questions is summarized at the end of each chapter.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Under arbeidet med den siste utgaven av *Håndbok i brannetterforskning* [1], erfarte Norsk brannvernforening at det var vanskelig å finne dokumentert kunnskap innenfor en rekke temaer. Det var derfor et ønske om å få en bedre oversikt over hva som finnes av forskningsbasert kunnskap innenfor brannetterforskning. Dette forprosjektet er et første skritt mot økt kunnskap og økte forskningsaktiviteter innenfor fagfeltet. Forprosjektets målsetting har vært å kartlegge status for forskningen på utvalgte temaer innenfor brannetterforskning, som er beskrevet i kapittel 1.2.

1.2 Arbeidsbeskrivelse

Vi har kartlagt og sammenfattet tilgjengelig kunnskap innenfor brannetterforskningsfeltet, samt vurdert kvaliteten til de kildene som er brukt som grunnlag. Noen kilder er for eksempel fagfellevurdert, slik tilfellet er i vitenskapelige publikasjoner. For andre kilder kan påstander og konklusjoner være litt mer usikre, og da har vi vurdert om det er behov for mer arbeid innenfor spesifikke områder.

Det er gjennomført søk i aktuelle litteraturdatabaser for nasjonale og internasjonale publikasjoner, og i annen relevant faglitteratur, som bøker og rapporter. Utvalgte relevante forskningsinstitusjoner og fagmiljøer er også kontaktet for å undersøke status innenfor de aktuelle temaene. Følgende prioriterte emner er undersøkt:

- Brennbare væsker
- Antennelse ved gnister, glør og varme partikler
- Batterier
- Selvantennelse

Innenfor hvert emne var det i samarbeid med styringskomiteen satt opp en liste med spørsmål som vi ville prøve å besvare gjennom studien. I hvilken grad vi har funnet svar på spørsmålene, er oppsummert i slutten av hvert kapittel.

2 Brennbare væsker

2.1 Innledning

Ildspåsettere bruker ofte brannfarlige væsker, eller andre hjelpemidler, som tennbriketter eller stearinlys, for å starte en brann. Hensikten kan være å lage en stor brann på kort tid, slik at det påtente objektet blir totalskadet. I noen tilfeller er hensikten at skadene skal være hærverk, være forsøk på forsikringssvindel eller dekke over en annen kriminell handling. Spørsmålene vi forsøker å besvare her er:

1. Hvor lang tid kan det brenne før brennbar væske ikke lar seg identifisere gjennom kjemisk analyse og bruk av hund?
2. Hvor lang tid tar det før brennbar væske ikke lar seg identifisere gjennom bruk av hund eller kjemisk analyse av prøver tatt fra områder der det ikke har brent i og utenfor brannrommet?
3. Hvor lang tid tar det før søl av brennbar væske på for eksempel klær ikke lar seg identifisere?
4. Hvor lang tid tar det før en brannhund ikke lenger kan markere brennbar væske?
5. Når blir spor av brennbar væske borte som følge av vær og vind?
6. Gir noen av de etablerte metodene for påvising av brennbar væske mulighet for falsk positiv tolkning grunnet kontaminering av smeltet plast?
7. Finnes det publisert dokumentasjon av metode for stadfesting av brennbare væsker ved hjelp av UV-lys og kamera?
8. Finnes det publisert dokumentasjon av alternative metoder for stadfesting av brennbare væsker?

Bruk av tennbriketter og stearinlys ved ildspåsettelse skal inkluderes i besvarelsen av spørsmålene ovenfor.

2.2 Faktorer som har betydning for å finne spor etter brennbar væske

DeHaan [2] referer i sin artikkel «The Arson Set» til forsøk utført av Loscalzo i 1977 [3], der bensin ble helt på ulike underlag. Bensin ble identifisert ved hjelp av gasskromatografi 24 timer etter brannen. På jordsmonn var bensin identifiserbar etter 162 timer. I sammendraget til DeHaans referanse står det imidlertid at bensin ikke var identifiserbar etter en forbrenning på 20 minutter, verken på tregolv eller teppe, til tross for at prøvetakingen skjedde umiddelbart etter at brannen var sløkket. På jordsmonn derimot, var bensin identifiserbar etter 20 minutters forbrenning.

Det ser ut som om disse forsøkene kun omfattet brann i den brennbare væsken og underlaget, og at de ikke inkluderte de sekundære effektene av brannen i rommet, slik som påvirkningen av andre brennbare materialer eller effekten av sløkkevann. Dette er noe som henholdsvis kan forverre og forbedre muligheten av å finne spor etter brennbar væske. Sløkkevann vil bare forbedre denne muligheten hvis det er benyttet brennbare væsker som ikke er vannløselige, slik som bensin eller diesel.

Viktige faktorer som påvirker muligheten for å identifisere brennbar væske

Hvorvidt brennbar væske lar seg identifisere eller ikke, vil være avhengig av mange faktorer [4]:

1. Brannens varighet og intensitet
2. Slokkeinnsats og mengden slokkevann
3. Type brennbar væske
4. Mengde brennbar væske
5. Mengde og type av andre brennbare materialer involvert i brannen
6. Arrangement av brennbare materialer, og graden av spredning av brennbar væske
7. Ventilasjonsforhold
8. Bakterier i underlaget (for eksempel i golvbelegg)

I tillegg vil andre faktorer kunne ha betydning, som hvor lang tid det har gått siden brannen ble slokket, og vær- og vindforhold.

Borusiewicz et al. [4] har eksperimentelt studert effekten av faktorene 2, 3, 5, 6 og 7 på listen over, med hensyn til muligheten av å identifisere brennbar væske i branner som ikke medførte overtenning. De fant at den faktoren som hadde størst innflytelse var *type materialer ellers i brannrommet*. Deretter var det *arrangement av brennbare materialer og graden av spredning av brennbar væske* som hadde størst innflytelse på muligheten av å identifisere brennbar væske. De andre faktorene var (rangert etter avtagende betydning): *typen brennbar væske, brannens varighet og ventilasjonsforholdene*.

I denne studien ble det understreket at en brennbar væske som er utskilt fra brannrestene i en branntomt, som regel vil være svært forskjellig fra den opprinnelige brennbare væsken. Dette skyldes prosessene som skjer i løpet av en brann, som for eksempel fordampning og pyrolyse fra andre materialer som blander seg med den utskilte væsken. Dette kan skape store forstyrrelser når man skal analysere og tolke måleresultatene av prøver fra en branntomt. I artikkelen trekkes det følgende konklusjoner med hensyn til muligheten for å identifisere brennbar væske:

Kjemiske spor etter brennbar væske

På teppe fant man lett kjemiske spor etter brennbare væsker, unntatt flyktige brennbare væsker, uavhengig av brannens varighet. Med flyktige, brennbare væsker menes brennbare væsker med flammepunkt lik eller under romtemperatur ($\leq 23\text{ °C}$). På trevirke med lav densitet ble brennbar væske funnet i kun noen få prøver. På kartong ble ikke brennbare væsker detektert etter den samme forbrenningstiden. Noen plastmaterialer som for eksempel kan finnes i tepper, hadde en tendens til å slutte å brenne før de ble fullstendig oppbrent. Det innerste sjiktet fikk ikke tilstrekkelig lufttilførsel fordi det dannet seg et sjikt av tett forkullet materiale. Dermed ble brennbar væske (unntatt de mest flyktige) funnet i brannrestene, uavhengig av tiden mellom antennelse og prøvetakingen. Andre materialer, slik som trematerialer og kartong, brant fullstendig opp, og brennbar væske lot seg dermed ikke påvise.

Lufttilførsel

Forsøkene viste at forandring i lufttilførselen ikke hadde særlig betydning for muligheten til å finne spor etter brennbare væsker.

Betydning av blindprøver og rengjøring

Resultatene viste tydelig betydningen av å benytte blindprøver, det vil si prøvemateriale uten tilsatt brennbar væske. Blindprøvene gjorde det mulig å bestemme når brennbar væske ikke kunne påvises. Ved å ta blindprøver, ble falske, positive funn av brennbar væske eliminert.

Slokkeinnsats og mengde slokkevann

Slokkevann kan forsegle brennbare væsker som ikke er vannløselige. Slike rester av brennbare væsker kan bli liggende på en brannomt relativt lenge etter at brannen er slokket. Når det gjelder alkoholer og andre vannløselige brennbare væsker derimot, vil slokkevann i høy grad kunne redusere muligheten for å detektere disse, fordi de vil bli tynnet ut og vasket bort av slokkevannet.

Ettersom dette var laboratorieforsøk i liten skala, ble det påpekt at de ovennevnte funnene kunne være spesielle for disse småskalaforsøkene. De samme forholdene vil kanskje ikke være til stede i fullskala branner, hvor det kan være en vesentlig større påvirkning fra brann i andre materialer i tillegg. Det ble imidlertid konkludert med at disse forsøkene burde kunne si noe om hvilke faktorer som har størst betydning for muligheten av å finne spor av brennbare væsker etter branner som ikke har gått til overtenning. Dette vil være branner som slokkes i en tidlig fase av brannen, enten på grunn av aktiv slokkeinnsats, eller som følge av underskudd på brensel eller luft. Slike branner vil trolig stort sett ha de samme forbrenningsbetingelsene som i disse småskalaforsøkene.

I 1998–1999 gjennomførte SINTEF NBL en eksperimentell studie [5] hvor vi undersøkte mulighetene for å finne visuelle og kjemiske spor etter brennbar væske etter brann. Dette studiet er nærmere beskrevet i avsnitt 2.6. Faktorer som type brennbar væske, type golvbelegg, graden av sekundære brannskader og bruk av slokkevann ble undersøkt. Det ble funnet relativt tydelige kjemiske eller visuelle spor etter brennbar væske i nesten 80 % av forsøkene.

I fire forsøk ble det tatt prøver for gasskromatografi (GC), både umiddelbart etter brannen, og en dag etter forsøket. Det ble gjort positive funn av brennbar væske i alle prøver som ble tatt umiddelbart etter forsøket, både i senter og i utkant av væskedammen. I prøvene som ble tatt dagen etter, ble det påvist brennbar væske i tre av de fire forsøkene. Disse forsøkene indikerer at sannsynligheten for påvisning av kjemiske spor etter brennbar væske ved GC avtar noe hvis prøvetakingen skjer en dag etter brannen. Disse forsøkene inkluderte i høy grad effekten av sekundærbrannen i rommet, men ikke andre materialer i brannrommet enn den brennbare væsken og golvbelegget. Brann i andre materialer i brannrommet kan i høy grad redusere muligheten for å påvise brennbar væske ved hjelp av GC.

2.3 Mulighet for falsk påvisning av brennbar væske

Gasskromatografi er i dag den klart mest benyttede metoden til påvisning av brennbar væske på en brannomt. Det er velkjent at tolkningen av resultatene fra GC-analyser i høy grad kan kompliseres av pyrolyseprodukter fra forbrenning av syntetiske materialer. Ved pyrolyse av slike materialer kan det dannes flyktige komponenter som er kjemisk lik enkelte komponenter i kjente brennbare væsker.

Forsøk med vanlige materialer i boliger

Dette problemet blir spesielt viktig i situasjoner hvor det er lite brannrester igjen. I slike tilfeller kan de genererte pyrolyseproduktene føre til mistolking og til en falsk, positiv indikasjon på at det er benyttet brennbar væske. Fernandes et al. [6] har undersøkt disse problemstillingene nærmere ved hjelp av brannforsøk, der det er anvendt ulike brennbare væsker og forskjellige typer materialer som er vanlig forekommende i boliger. Analysene ble gjennomført ved å benytte "Automated Thermal Desorber-GC-Flame Ionization Detector (ATD-GC-FID) og massespektrometri (ARD-GC-MS).

Hensikten var å undersøke om forbrenning av vanlige materialer ville produsere pyrolyseprodukter som kan forveksles med vanlig brukte brennbare væsker. Det ble gjennomført forsøk med materialer som ble inndelt følgende fire grupper:

1. Trykksaker (aviser, magasiner)
2. Golvbelegg (golvtepper, gulvbord)
3. Lim
4. Overflateprodukter (gipsplater, kryssfinér, tapet, maling, lakk)

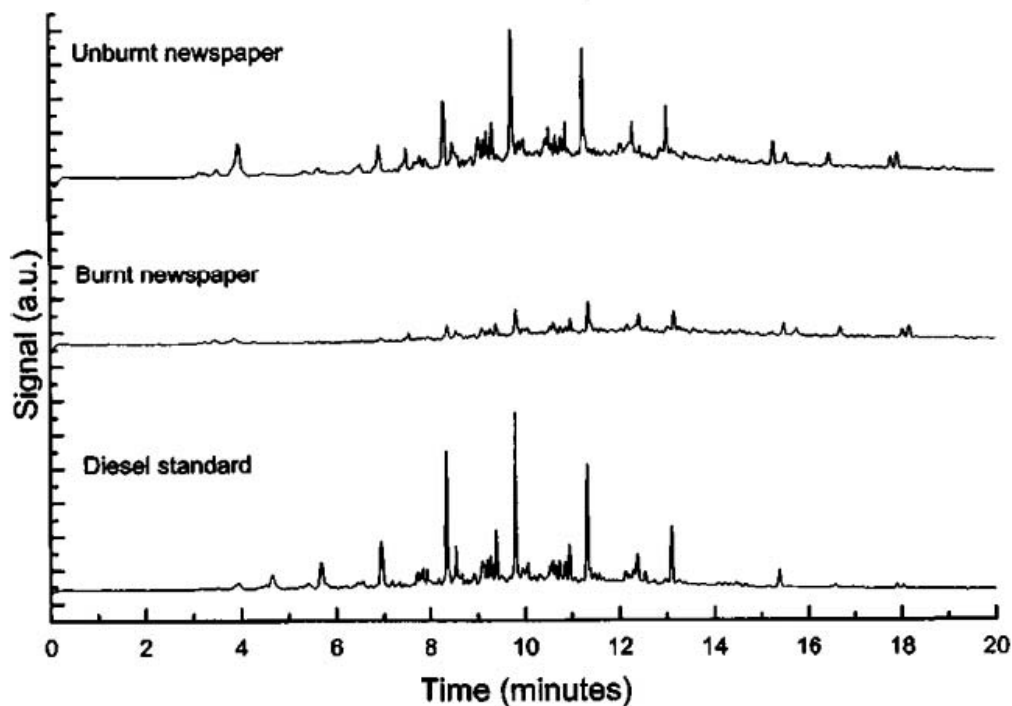
Disse materialene ble montert i et rom på samme måte som produktene vanligvis brukes. Både nye og gamle materialer ble benyttet. Materialene ble antent ved hjelp av en bunsenbrenner. Forsøk med nye og en måned gamle prøvestykker ble gjennomført, for å undersøke graden av avdamping av flyktige stoffer fra prøvene i løpet av en måned.

Fernandes et al. konkluderer med at selv om nylig behandlede produkter avgir flyktige komponenter som kan være en kilde til forstyrrelser, vil kontrollprøver hjelpe til å eliminere slik bakgrunnsstøy i de brente prøvene. Eventuelle flyktige stoffer som finnes i brente prøver bør imidlertid ikke overses, spesielt ikke hvis det blir påvist toluen. Dette fordi toluen kan forveksles med malingsfortynner, som ofte består av kun én hovedkomponent. Man har imidlertid ikke alltid kontrollprøver tilgjengelig. Eventuelle flyktige stoffer kan i tillegg feiltolkes som vanlige brennbare væsker for ildspåsettelse.

Trykksaker (aviser og magasiner)

Figur 2.1 viser spektrene fra GC-analyse av ubrente og brente aviser, og av diesel. Det er en klar likhet mellom spektrene til ubrente aviser og diesel. Et GC-spektrum som likner på spekteret for diesel kan derfor føre til en konklusjon om at diesel er benyttet som et hjelpemiddel til ildspåsettelse, dersom samme type ubrente aviser ikke er tilgjengelig som kontrollprøver.

Tilsvarende GC-spektrum fra én måned gamle aviser viste derimot ikke særlig likhet med GC-spekteret til diesel. En måned var altså tilstrekkelig til at alle flyktige stoffer i trykksverten var forsvunnet. Fernandes et al. konkluderte med at det er viktig å registrere datoen på avisen, hvis mulig. Det ble også konkludert med at man bør være forsiktig med å trekke konklusjoner hvis avisen er mindre enn en måned gammel.



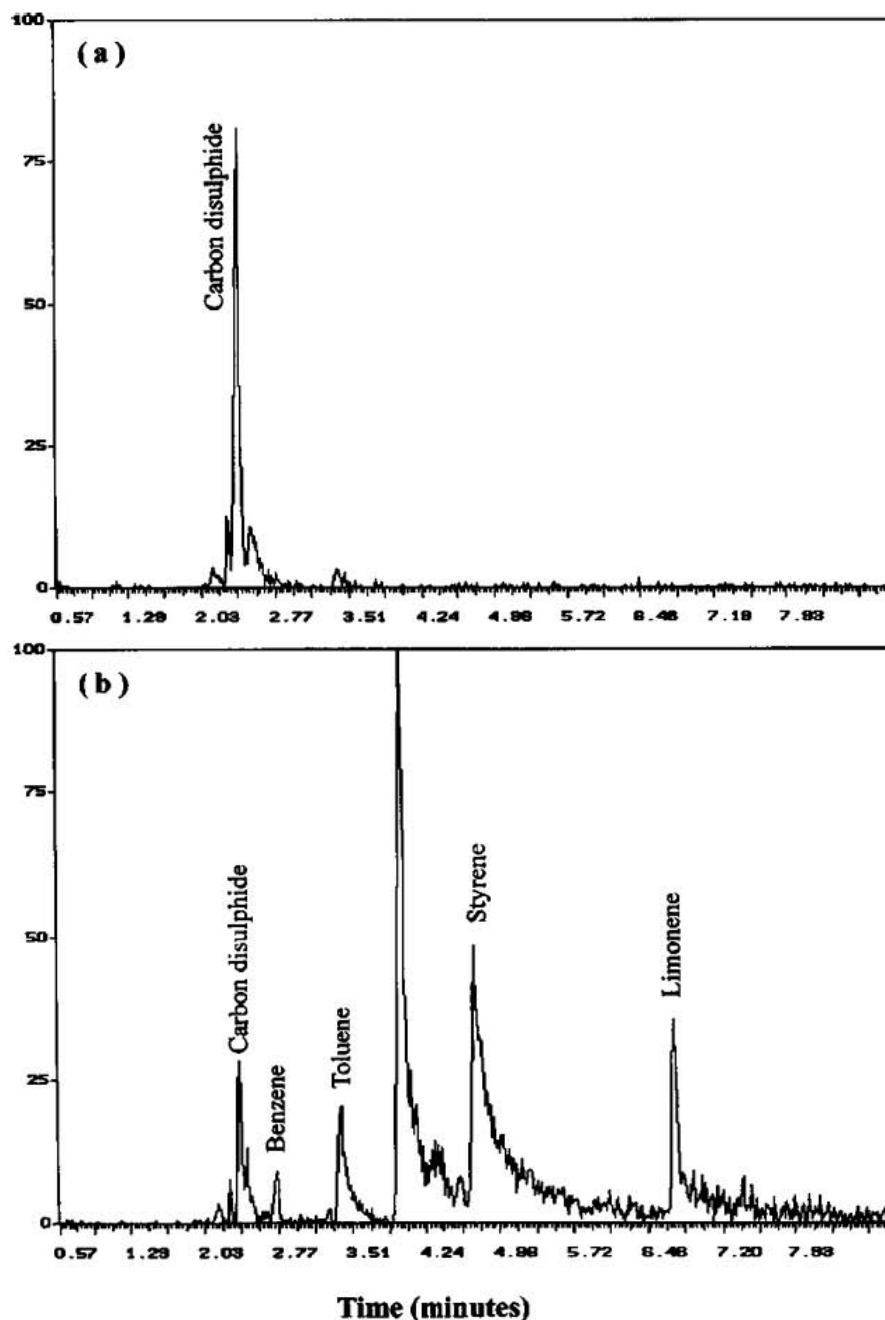
Figur 2.1: ATD-GC-FD kromatogram av en fersk avvis før og etter brann, samt for diesel [6].

Golvtepper

Fernandes et al. [6] fant at golvtepper laget av polypropylen (PP), nylon og ull utviklet toluen under forbrenning. Toluen er også en viktig komponent i malingsfortynnere. Den målte konsentrasjonen av toluen fra golvtepper var imidlertid ikke så høy at den kunne indikere at det var brukt brennbar væske. Til forskjell fra nylon- og ullteppe, medførte forbrenning av PP-teppe at det også ble produsert pyrolyseprodukter som limonen og benzen (se Figur 2.2). Selv om benzen er en bestanddel i bensin, og limonen er en brennbar terpen, er det ifølge Fernandes et al. ikke vanlig å bruke slike produkter i forbindelse med ildspåsettelse. Det ble konkludert med at funn av disse stoffene ikke burde medføre en falsk, positiv konklusjon på at brennbar væske var blitt benyttet.

Golvteppe med lim

Av de fire typene lim som ble testet (hvitt lim (uspesifisert), PVC klebestoff, kontaktlim og tapetlim), var det bare kontaktlimet som inneholdt komponenter som finnes i brennbare væsker som ofte er benyttet i forbindelse med ildspåsettelse. Dette var benzen, heptan, toluen, etylbenzen og m-xylen. Som vist i Figur 2.2, var disse komponentene tilstede i golvteppet både før og etter brannen. For et golvteppe som var en måned gammelt, påviste man bare de tre komponentene benzen, heptan og toluen. Dette skulle tilsi at et prøvestykke av eldre golvtepper inneholder færre flyktige komponenter enn nye golvtepper. Brukte golvtepper har derfor lavere sannsynlighet for å forårsake forstyrrelser i GC-analyser av brannrester.



Figur 2.2: ATD-GC-MS kromatografi-spekter av et polypropylenteppe og polstring av polypropylen (a) før og (b) etter brann. Golvteppe var festet med lim [6].

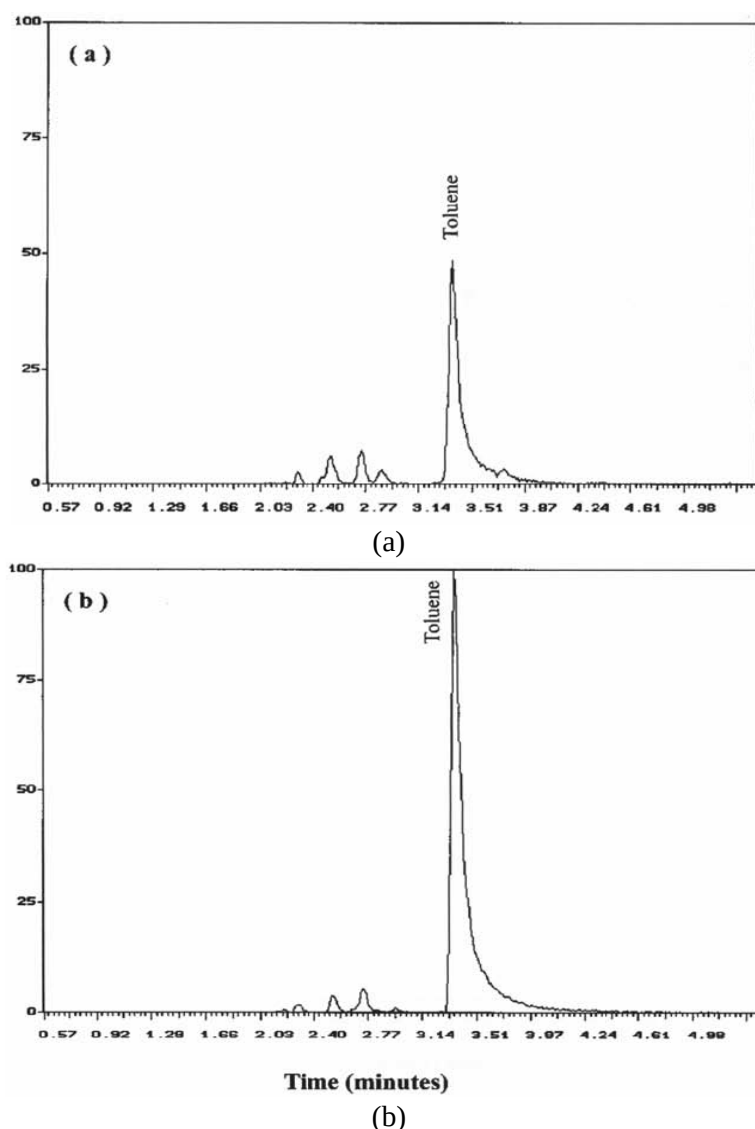
Lakk, malingsspray og skosverte

Gjenstander som nylig er overflatebehandlet med lakk, malingsspray og skosverte inneholder også komponenter som er vanlig å finne i brennbare væsker som ofte er benyttet i forbindelse med ildspåsettelse. Det ble understreket at man bør være spesielt oppmerksom vedrørende forekomsten av lakk og skosverte i bevismaterialet, fordi lakk inneholder toluen og xylen, noe som kan forveksles med enkelte løsningsmidler og bensin. Likeledes, kan parafiner (C_9 - C_{11}) i skosverte bli forvekslet med terpentinolje. GC-analyse av en måned gamle gjenstander som var overflatebehandlet med lakk, malingsspray og emulsjonsmaling var sammenlignbare med tilsvarende nylig overflatebehandlede gjenstander, bortsett fra at mengden flyktige komponenter både i de ubrente og brente gjenstandene var redusert. Dette indikerer at forstyrrelser i GC-analyse er mindre sannsynlig i gjenstander som var minst en måned gamle i forhold til nye gjenstander. Brannetterforskere bør i slike tilfeller dokumentere alle spesielle forhold

på brannstedet der de enkelte bevisgjenstandene ble sikret. Dette kan gi supplerende informasjon i tillegg til resultatene fra laboratorieanalysene.

Malt murpuss

Spor etter flyktige komponenter, spesielt toluen, kan man også finne i murpuss malt med emulsjonsmaling (se Figur 2.3). Funn av toluen kan føre til feilaktig falsk, positiv konklusjon, hvis dette blir sikret som bevis og ikke sammenlignet med en prøve av ikke brannskadet murpuss av samme type. En mulighet er å utsette et ikke-brannskadet prøvestykke for brann, og deretter sammenligne GC-spekteret med spekteret for bevismaterialet.



Figur 2.3: ATD-GC-MS kromatografi-spekter av murpuss malt med emulsjonsmaling (a) før og (b) etter brann [6].

Golvbelegg, tapet, ullteppe, etc.

Almirall og Furton [7] har gjennomført forsøk med golvtepper av nylon, polyester og ull, samt med syntetiske golvbelegg («synthetic floor Brand A – E»). Disse materialene ble analysert både før og etter brann under kontrollerte betingelser. Prøvestykkene ble plassert i 3,8 liters (1 gallon) malingspann. Spannene ble før forsøkene varmet opp til ca. 200 °C i 4-8 timer, for å fjerne eventuelle forurensende, flyktige stoffer.

Brannforsøkene ble gjennomført ved å antenne prøvematerialet i spannet. Prøvestykket brant i 2 minutter, eller inntil ca. 2/3 av materialet var forkullet. Brannen i materialene ble slokket på to måter, enten ved å spraye 10 ml vann på prøvestykket, eller ved å legge lokk på spannet. 35 forskjellige golvbelegg ble brent under kontrollerte betingelser og slokket som forklart over. Prøvestykkene ble deretter analysert ved GC-MS-analyse.

Mange av forbindelsene som oppsto enten ved forbrenning eller ved pyrolyse, var også komponenter som man finner i brennbare væsker som ofte brukes i forbindelse med ildspåsettelse. Det ble imidlertid understreket at kromatografi-spekteret ved bruk av slike væsker var temmelig forskjellig fra spektrene for de brannpåkjente prøvematerialene i denne studien. Til tross for dette, bør man være klar over at GC-MS-analyseresultater fra disse produktene kan forveksles med vanlige brennbare væsker brukt til ildspåsettelse, spesielt i de tilfellene hvor mengden av den brennbare væsken er liten. Det ble også understreket at det er viktig å ta kontrollprøvestykker av samme materiale som ikke inneholdt brennbar væske.

2.4 Påvisning av spor etter brennbare væsker ved UV-lys og kamera

Å påvise spor etter brennbar væske med UV-lys og kamera er beskrevet på flere nettsider om brannetterforskning, og på nettsider til forhandlere av slikt utstyr. Vi har imidlertid ikke funnet artikler som beskriver forskning som omhandler dette temaet.

Fordeler og begrensninger med metoden ble imidlertid presentert på Mid-Atlantic Association of Forensic Scientists årsmøte i 2006 [8]. I presentasjonen var det vist eksempler fra forsøk med ulike typer brensel og materialer. Konklusjonene i presentasjonen er at UV-lys kun er anvendelig for å detektere bensin og diesel. Metoden påvirkes ikke av vann, men forbrenningen av materialet påvirker synligheten ved bruk av UV-lys. Metoden skal være nyttig for små mengder brennbar væske og for påvisning lang tid etter at den brennbare væsken ble tilsatt materialet.

2.5 Alternative analysemetoder

Sandercock [9] har publisert en artikkel som omfatter en grundig gjennomgang av vitenskapelig litteratur i perioden 2001-2007 vedrørende nye metoder for påvisning av brennbar væske i brannrester, samt etterforskning på branntomter generelt. Artikkel-forfatteren har gjennomgått 333 litteraturreferanser. Disse omhandler blant annet følgende to hovedområder, med undertema:

1. Laboratorieanalyse av brennbar væske
 - o Ny litteratur for laboratoriet
 - o Generelt om analyse av brennbar væske
 - o Teknikker for prøvetaking og oppbevaring av prøver
 - o Gasskromatografi
 - o Andre analysemetoder
 - o Analyse av brennbar væske, nye produkter og andre materialer
 - o Tolkning av måledata
 - o Kjemiske fingeravtrykk
 - o Overføring og oppbevaring av brennbare væsker
 - o Forurensning og forstyrrelser fra bakgrunnen i prøver fra branntomten

2. Etterforskning av branntomt og generell brannetterforskning
 - o Ny brannlitteratur for brannetterforskere
 - o Generell brannetterforskning på branntomten
 - o Skog- og lyngbranner
 - o Overtenning og backdraft ved rombranner
 - o Modellering og simulering av branner
 - o Branner med elektrisk årsak
 - o Branner i kjøretøy
 - o Selvantennelse
 - o Bruk av hund på branntomten
 - o Bærbart utstyr for bruk på branntomten.
 - o Innsamling og oppbevaring av bevis og branntekniske spor på branntomten
 - o Retrospektiv gjennomgang av branner og brannstatistikk
 - o Brannstifterens psykologi

Prøvetaking og utskillelse

Det understrekes av Sandercock at blant teknikker for prøvetaking og utskillelse av brennbare væsker fra prøver fra branntomten, så er «Solid Phase Micro-Extraction» (SPME) den metoden som er rådende i dag, og som anbefales brukt. Absorberende midler, slik som Tenax TA[®] og Carbotrap 300[®] blir også vurdert som meget nyttige absorbenter for brennbare væsker.

Påvisning og identifisering av brennbar væske

Når det gjelder gasskromatografi (GC), trekkes det fram teknikker som «Gas Chromatography-Isotope Ratio Mass Spectrometry» (GC-IRMS), som kan ha stort potensiale ved bestemmelse av spor etter brennbar væske.

Videre nevnes det at GC-MS-MS (todimensjonal MS-analyse) er en lovende teknikk for bestemmelse av bensin i brannrester ved høy bakgrunnsstøy (forstyrrelser fra andre pyrolyseprodukter og fordampete produkter fra andre materialer som har kondensert på bevismaterialet). Denne teknikken blir brukt for å øke selektiviteten og følsomheten for brennbare væsker. Det er i denne sammenhengen også utviklet et bibliotek for gjenkjennelse av kromatografiske spektrere for kjente brennbare væsker som brukes i forbindelse med ildspåsettelse, samt for andre vanlig materialer på branntomten som kan medføre forurensning av måleresultatene. Denne teknikken ble blant annet benyttet til å detektere alkylbenzen, naftalen og antracen i brannrester som hadde blitt tilsatt bensin.

Sandercock [9] omtaler også todimensjonal gasskromatografi (GC × GC) som en meget lovende teknikk. Teknikken har fått stor oppmerksomhet i de siste årene. I en GC × GC-analyse gjennomgår hele prøvestykket en todimensjonal utskilling ved at alle komponentene blir separert, først på grunnlag av kokepunktet, og deretter på grunnlag av polariteten til de enkelte komponentene. Det refereres blant annet til litteratur som beskriver analyser av bensin, diesel og andre brennbare væsker ved hjelp av denne metoden.

Brannhund

Sandercock understreker at det ikke er tvil om at noe er så effektivt som trent brannhund for deteksjon av brennbare væsker, men at det kan være flere ulemper ved bruk av slike hunder. En ulempe er for eksempel at hunder blir slitne etter ca. 20 minutter på en branntomt. Tretthet og utmattelse medfører at den gode luktesansen til hundene svekkes. De må i slike tilfeller fjernes fra branntomten for å hvile.

Videre kan hunden være syk, eller den kan være avhengig av å ha en bestemt ledsager. Selv de best trente hundene kan bli overveldet av ståheien i forbindelse med en stor branntomt, noe som også vil begrense deres effektivitet. I tillegg er det svært kostbart og

tidkrevende å ha godt trente hunder tilgjengelig til enhver tid. På grunn av de høye kostnadene for brannhunder, kan de ikke benyttes overalt på en branntomt. Man må blant annet være forsiktig slik at hunden ikke blir skadet.

Sniffer (hydrokarbondetektor) og PID («Photo Ionisation Detectors»)

En PID (fotoionisasjonsdetektor) er en type gassdetektor som kan måle flyktige organiske forbindelser og andre gasser i konsentrasjoner fra noen få ppb (parts per billion = 0,001 ppm) til 10 000 ppb. PID er en effektiv og relativt billig detektor, som kan gi øyeblikkelige avlesninger, samt at den kan holdes i kontinuerlig drift [10].

Baldwin [10] påpeker at PID kan være et godt tilleggsverktøy, som kan benyttes under etterforskningen på en branntomt. Slikt utstyr kan være et supplement til, eller en erstatning for, en brannhund.. Slikt utstyr har lenge vært tilgjengelig, men det har vært en rask utvikling og forbedring av teknologien i de senere år.

En PID-detektor benytter en høyfrekvent lyskilde i det ytre ultrafiolette området for å produsere ioniserte forurensninger i luftprøver. Når prøver av hydrokarboner blir ionisert på denne måten, vil de frie elektronene trekkes til elektroden. Den resulterende forandringen i strømstyrken blir forsterket og registrert. Dette utstyret er vanligvis ganske følsomt, og er relativt selektivt for hydrokarbondamp. En PID-detektor antas å være opptil ti ganger mer følsom enn flammeionisasjonsdetektorer (FID). Fuktighet og høy temperatur kan imidlertid påvirke måleresultatene. Naturlig forekommende hydrokarboner i brannrestene kan også gi falskt positiv resultat, men ikke oftere enn noe annet utstyr.

Man kjenner også tilfeller der en sniffer feilaktig har påvist brennbar væske der en med sikkerhet visste at det ikke hadde vært brennbar væske [4]. Dette skyldes at en sniffer også kan gi positivt utslag på generelle pyrolysegasser fra brannen. I en "varm" branntomt vil det fortsatt være en viss produksjon av pyrolysegasser etter at brannen er slukket. Disse gassene kan gi positive utslag ved bruk av sniffer, selv om de ikke stammer fra brennbar væske. En sniffer kan også unnlate å gi utslag på steder der brennbar væske er påvist ved hjelp av gasskromatografi. Dette gjelder spesielt for lite flyktige væsker med høy fordampningsvarme, slik som diesel.

Positivt utslag på snifferen er ikke avhengig av hvor mye brennbar væske det eventuelt er igjen i golvbelegget, men av konsentrasjonen av væskedamp i luftvolumet like over golvbelegget, der hvor snifferen suger til seg luft. Konsentrasjonen av brennbar væskedamp i dette området er avhengig av væskens flyktighet. Lite flyktige væsker som diesel, er derfor vanskelig å detektere, fordi slike væsker medfører for lav avdamping i området like over golvet. Dette til tross for at golvbelegget likevel kan inneholde relativt store mengder av den lite flyktige brennbare væsken.

Til tross for at moderne PID-detektorer har nesten like høy følsomhet som hunder, er slike detektorer, i likhet med brannhunder, ikke i stand til å skjelne mellom ulike hydrokarbonvæsker. De er derimot i stand til å detektere konsentrasjoner av hydrokarboner som vil være typisk i brannrestene på en branntomt.

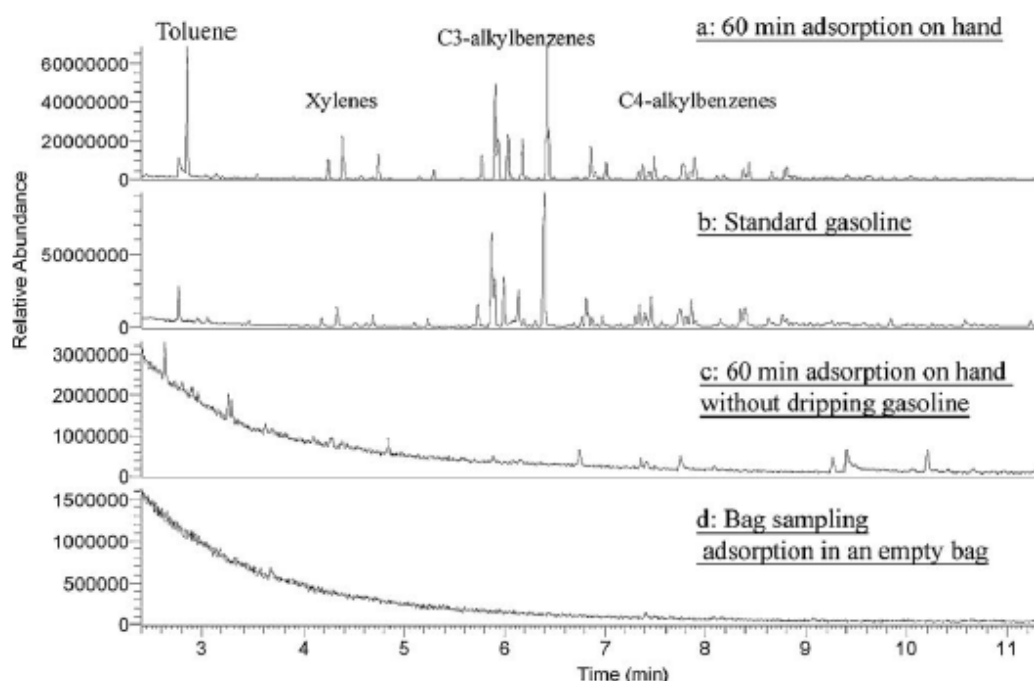
Påvisning av bensin på hendene til mulige brannstiftere

Darrer et al. [11] beskriver en metode ved bruk av spesielle plasthansker for å sikre spor etter bensin på hendene til personer som er mistenkt for ildspåsettelse. Denne teknikken har den fordel at den er enkel å bruke, og man trenger ikke personell med spesiell kunnskap for å utføre arbeidet. Hanskene av PVC eller lateks inneholder talkumpulver, som har vist seg å være et ideelt medium for oppsamling av rester etter bensin. Den mistenkte bør ha hanskene på i minimum 20 minutter, og deretter må de legges i en

damptett pose. Dsendes hanskene til et laboratorium for deteksjon av brennbar væske ved hjelp av gasskromatografi (GC).

Muller et al. [12] ved politiet i Israel har publisert en lignende metode for deteksjon av bensin på hendene til en mistenkt for ildspåsettelse. Ifølge artikkelen har man funnet spor etter bensin i 80 % av tilfellene hvor brennbar væske er blitt benyttet. Det ble benyttet remser av aktivt trekull for å absorbere spor etter brennbar væske på hendene. Denne metoden inkluderer også en svak oppvarming av hendene til 45 °C, noe som medførte en betydelig forbedring av evnen til å detektere spor etter bensin. Bensinen blir skilt ut fra trekullremsene ved hjelp av diklormetan og analysert ved hjelp av GC-MS-analyse.

Figur 2.8 viser TIC-adsorbsjon («Total Ion Chromatography») ved romtemperatur i løpet av 60 minutter. Adsorbsjonen startet 60 minutter etter at 50 µL bensin ble dryppet på hendene. Toluene, C2-, C3- og C4-alkylbensen kan klart ses i diagrammet.

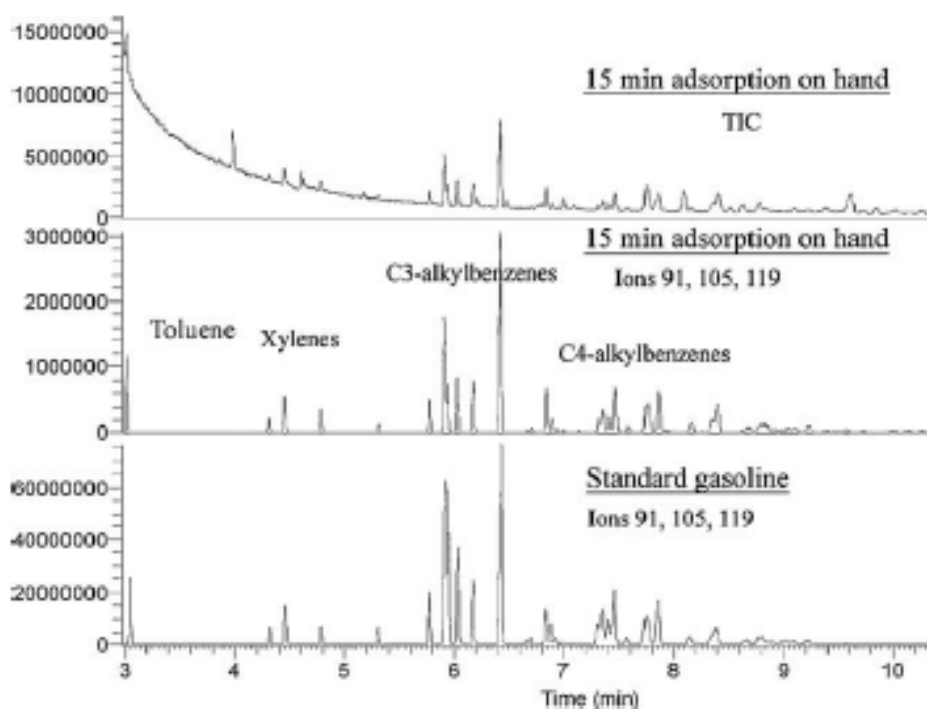


Figur 2.4: TIC-diagram: (a) Etter adsorbsjon i løpet av 60 minutter uten oppvarming av hendene ved til 45 °C. (b) Standard bensin. (c) Blindprøve – 60 minutter adsorbsjon uten bensin. (d) Blindprøve – Prøvetaking ved å plassere remse av aktivt trekull i en tom plastpose i 60 minutter [12].

Trekullremsen ble også plassert på hendene i en varighet på 15, 60, 120 og 180 minutter (absorbsjonstid), én time etter at 50 µL bensin ble dryppet på hendene. Ved 15 minutters absorpsjonstid ble det konkludert med at diagrammet var for dårlig til å kunne konkludere med tilstedeværelsen av bensin, men på grunnlag av EIC-diagram i Figur 2.9 kunne man ifølge Muller et al. [7] imidlertid skjelne profilen til bensin. Disse ion-diagrammene gjør en i stand til å fokusere på profilene til den typiske massespektrografen til bensin, og det tillater utelukkelse av fremmede materialer i TICen som ikke har noe med bensin å gjøre.

Det bemerkes at oppvarming av hendene til 45 °C medførte et lett ubehag for personene som deltok i forsøkene. Adsorbsjonsgraden av bensin i trekullremsene økte betydelig ved å utsette hendene for en slik lett oppvarming. Det ble konkludert med at det var en markert forbedring av resultatene når eksponeringstiden for adsorbsjonsmaterialet økte for eksempel til 60, 120 og 180 minutter. Videre fant man at å benytte plastposer var bedre enn å benytte plasthansker.

Det ble konkludert med at selv 3 timer etter at en svært beskjeden mengde bensin ble dryppet på hendene til en forsøksperson, var det mulig å detektere bensin ved å benytte passiv absorpsjon ved aktivt trekull, og deteksjonen av bensin ble betydelig forbedret ved oppvarming av hendene ved til 45 °C.



Figur 2.5: TIC- og EIC-diagram («Extracted Ion Chromatogram» «Ions of 91, 105, 119») etter 15 min. absorpsjon på hendene. Under: EIC-diagram av bensin. Muller et al. [12].

2.6 SINTEF/Kripos-prosjektet «Bestemmelse av branntekniske spor etter bruk av brennbar væske»

2.6.1 Forsøksoppsettet og forsøkene

I 1998-1999 hadde SP Fire Research (den gang SINTEF NBL), Kripos og Trondheim politikammer et samarbeidsprosjekt kalt "Bestemmelse av spor etter brennbar væske" [5]. Prosjektet hadde som målsetting å klargjøre hvilke visuelle og kjemiske spor man kan forvente å finne etter brann i brennbare væsker på golvbelegg, avhengig av type brennbar væske og golvbelegg. I prosjektet ble også forskjellige branntekniske faktorer undersøkt, slik som graden av sekundære skader forårsaket av overtenning, effekten av sløkking og tid mellom brann og prøvetakingen. Med *kjemiske spor* menes her rester av brennbar væske identifisert ved hjelp av gasskromatografi.

De ulike brennbare væsker, brennbare faste materialer og golvbelegg som ble testet under forsøkene er vist i Tabell 2-1 under.

Tabell 2-1 Ulike testparametere som ble undersøkt i forsøkene i prosjektet "Bestemmelse av branntekniske spor etter bruk av brennbar væske" [5].

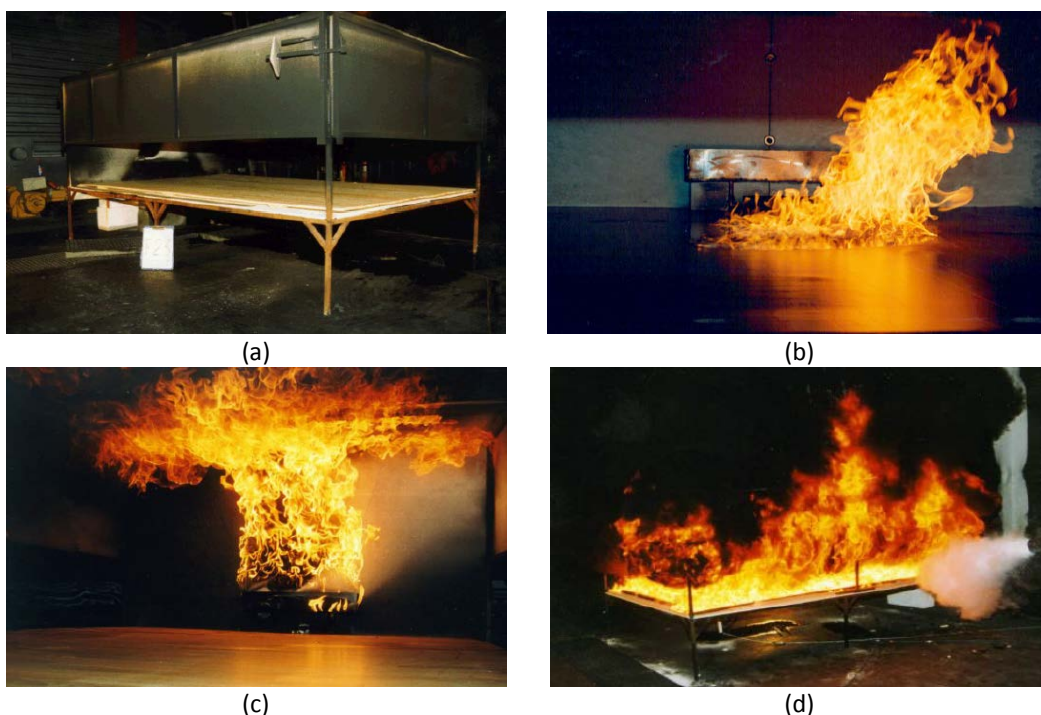
Brennbare væsker:	Brennbare faste materialer:	Golvbelegg:
• Rødsprit • White spirit • Bensin • Diesel	• Bomull • Akryl • Skumplast	• Vinyl (tykkelse 1,1 og 1,8 mm) • Filtteppe (tykkelse 3,3 mm) • Teppe (tykkelse 9 mm inkl. 5 mm luv) • Ubehandlet furu (tykkelse 12 mm)

Figur 2.6 viser bilder fra et av forsøkene med rødsprit.

2.6.2 Forsøkene

Det ble gjennomført nitten forsøk med primærbrann i fire typer brennbar væske på fire typer golvbelegg. I tillegg ble prøvematerialene utsatt for sekundærbrann. Sekundærbrannen var en gassbrann med effekt i området 60-140 kW, som skulle simulere at brannen i væsken på golvet hadde spredt seg og ført til overtenning i brannrommet. Gassbrannen skulle gi en varmepåkjønning mot golvet tilsvarende som fra et overtent rom. Videre ble det gjennomført fem forsøk med kun brennbare faste materialer (gardin og skumplast) på golvbelegg, samt fire referanseforsøk med bare sekundærbrann.

Den brennbare væsken ble antent med en håndholdt propanbrenner. Forsøkene ble avsluttet ved at brannen ble slokket med CO₂-apparat. Alle forsøksmaterialene i første forsøksserie ble tilført vann etter at brannen var slokket. Figur 2.6 viser bilder fra et av forsøkene.

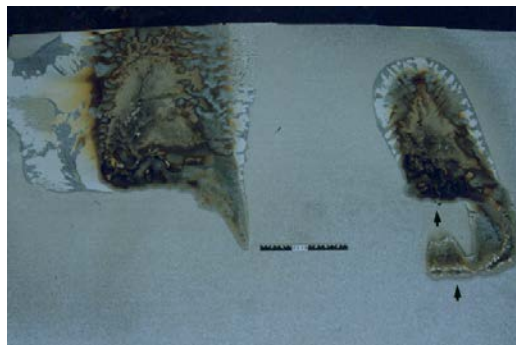


Figur 2.6: Bilde av forsøksriggen (a) like før start av et forsøk med 3 dl rødsprit på golvbelegg, (b) like etter antennelse rødspriten, (c) kun sekundærbrannen med maksimal effekt, og (d) etter fullt utviklet brann i golvbelegget, idet slokking med CO₂ startet [5].

Figur 5.5 viser hvordan brannen utviklet seg, og de resulterende sporene i golvbelegget. Figur 5.6 viser i detalj de visuelle sporene i golvbelegget etter brannen.



Figur 2.7: Bilder av brannutviklingen i løpet av forsøkene og sporene etter brennbar væske og faste materialer (skumplast og akrylgardin) [5]).



(a) Brannutviklingen etter 90 sekunder ved 2 x 1,5 dl white spirit. Golvteppet etter en brann uten overtenning. Pilene angir retningen på vindtrekken, samt tydelige skillelinjer mellom brente og ikke brente områder



(b) 2 x 3 dl bensin på golvteppe, hvor den nærmeste mengden er lagt som en lunte mot retning til vindtrekken (mot høyre). Full brannutvikling i golvbelegget og sporene etter brannen. Pilene viser til lunta.



(c) Brannen i white spirit slokner av seg selv etter 55 minutter, uten at all white spirit er brent opp.

(d) Pil 1 viser området hvor skumplast hadde ligget på furugolv. 2 viser til brannrester etter brann i en hengende akrylgardin som hadde falt ned før overtenning av brannrommet.

Figur 2.8: Bilder av visuelle spor etter brennbar væske på forskjellige typer golvbelegg [5].

Muligheten av å finne spor etter brennbar væske

I femten av totalt nitten forsøk ble det funnet relativt tydelige visuelle spor og/eller kjemiske spor etter brennbar væske, det vil si i nesten 80 % av forsøkene. Disse forsøkene har dermed vist at en primærbrann ved hjelp av 3 dl brennbar væske kan etterlate seg relativt tydelige visuelle eller kjemiske spor på golvbelegg. Dette til tross for at flere av brannene medførte fullt utviklet brann i golvbelegget, noe som til en viss grad kan medføre at de visuelle sporene blir visket ut, og at mye brennbar væske vil fordampe og forsvinne fra arnestedsområdet.

Antenneligheten av de fire brennbare væskene

3 dl bensin, og 3 dl rødsprit var begge lette å antenne, slik at væskene brant vedvarende. White spirit og spesielt diesel var derimot vanskelig å antenne. White spirit ble antent lokalt, men brannen døde ut etter kort tid. Diesel lot seg derimot ikke antenne i det hele tatt. Ved å legge tørkepapir som en veke i dieseldammen ble diesel imidlertid lett antent.

2.6.3 Bruk av ”Sniffer”

I forsøkene ble det anvendt en sniffer-modell (tidligere omhandlet i kapittel 2.5) som ble brukt på slutten av 1990-tallet. Slikt utstyr har vært lenge tilgjengelig, og det har vært en utvikling og forbedring av teknologien siden disse forsøkene ble gjennomført. Dette gjelder spesielt med hensyn til følsomheten, som nå begynner å bli nesten like god som følsomheten til en brannhund ifølge Baldwin [10].

Det ble påvist spor etter brennbar væske ved hjelp av sniffer i alle de fire forsøkene hvor sniffer ble anvendt. Det ble også påvist brennbar væske ved gasskromatografi i disse forsøkene. Det var altså ingen av de undersøkte stedene på golvbelegget hvor en feilaktig påviste brennbar væske ved bruk av sniffer. Det var heller ikke steder på golvbelegget hvor en ikke kunne påvise brennbar væske med sniffer, hvor brennbar væske i ettertid ble påvist ved hjelp av gasskromatografi.

I et av forsøkene ble altså diesel benyttet som brennbar væske, og den ble påvist ved hjelp av snifferen. I dette forsøket ble det ikke utviklet full brann i golvbelegget, bare 30-40 % av golvbelegget ble brannskadet.

2.6.4 Betydningen av tilførsel av sløkkevann

Avdamping av rester av den brennbare væsken etter slokking er noe som skjer temmelig raskt i en relativt varm branntomt. Dette gjelder særlig hvis bensin eller andre flyktige væsker er blitt anvendt ved ildspåsettelse [5]. Ettersom hydrokarboner ikke er vannløselige, blir de ikke så lett vasket bort under sløkkearbeidet. For ikke-vannløselige brennbare væsker kan sløkkevann virke forseglende, og dermed i høy grad forhindre fordampingen.

I situasjoner hvor ikke vannløselige brennbare væsker trekkes inn i overflaten til porøse materialer, kan sløkkevann ha en tendens til effektivt å hindre avdamping på grunn av nettopp vannets forseglende effekt i porøse materialer og overflater. Vannet lukker inne ikke-vannløselige væsker i porene i materialet. Vannløselige brennbare væsker som sprit, aceton og enkelte løsemidler, blir derimot effektivt vasket ut av porøse materialer under brannsløkkingen. Forsøkene våre viste at det var lettere å påvise kjemiske spor etter white spirit enn etter rødsprit, spesielt i forsøk der det var påført sløkkevann.

2.6.5 Konklusjoner fra studien

På grunnlag av forsøkene ble det trukket følgende konklusjoner med hensyn til muligheten til å finne spor etter brennbar væske:

Spor generelt

- Visuelle og/eller kjemiske spor etter brennbare væsker ble funnet i 80 % av forsøkene.
- Mulighetene for å påvise kjemiske spor ved gasskromatografi var trolig minst like gode som mulighetene for å finne entydige visuelle spor etter brennbar væske.

Visuelle spor

- Visuelle spor kan kun indikere at brennbar væske er anvendt, og gi anvisning om hvor prøver for videre gasskromatografiske undersøkelser bør tas. Generelt bør man utvise stor aktsomhet ved å anvende visuelle spor alene som holdepunkter eller bevis for at en brann er påsatt ved hjelp av brennbar væske. Eventuell bruk av brennbar væske bør verifiseres ved hjelp av gasskromatografisk analyse.
- Visuelle spor etter brann i faste materialer som har brent på ubehandlet furugolv, for eksempel skumplast, kan feiltolkes som spor etter en brennbar væske.
- På vinylbelegg var det mulig å påvise visuelle spor etter brennbar væske, dersom de sekundære brannskadene ikke ble for omfattende.
- En primærbrann ved hjelp av bensin og diesel (og papir) forårsaket betydelig mer distinkte visuelle spor enn rødsprit, som igjen forårsaket mer distinkte visuelle spor enn white spirit.
- På golvteppe, på ubehandlet furu, samt til en viss grad på golvbelegg av filt, oppstår det ikke nødvendigvis entydige visuelle spor etter overtenning i brannrommet, dersom væsken ikke er påført i et spesielt mønster eller som en lunte.
- De visuelle sporene var mer tydelige på vinylbelegg enn på golvteppe.

Kjemiske spor

- Vi fant kjemiske spor etter brennbare væsker på steder man ikke skulle forvente å finne slike spor, som for eksempel i senter av brannen på golvet. Selv om det ble anvendt relativt små mengder brennbar væske, og brannen i golvbelegget var mer eller mindre fullt utviklet som følge av blant annet sekundærbrannen i rommet, var det likevel fullt mulig å påvise brennbar væske ved gasskromatografi.
- Det er i senter av væskebrannen det er størst sannsynlighet for å påvise kjemiske spor etter brennbar væske i golvbelegg som effektivt trekker til seg den brennbare væsken. Dette gjelder ikke for golvbelegg som ikke trekker til seg væsken effektivt, for eksempel vinyl og ubehandlet furu. Her kan det påvises brennbar væske i utkanten av væskebrannen.
- Man kan også påvise kjemiske spor utenfor væskedammen, spesielt når det er brukt white spirit. White spirit som ikke brant, hadde en tendens til å bevege seg vekk fra sekundærbrannen i rommet.
- Generelt var det lettere å påvise kjemiske spor i golvbelegg som trakk til seg den brennbare væsken (golvteppe og filtbelegg), enn i golvbelegg som ikke trakk til seg væsken (vinyl og ubehandlet furu).
- Fullt utviklet brann i golvbelegget reduserte i første rekke mulighetene av å finne visuelle spor.

- 24 timers tidsforsinkelse i prøvetakingen medførte at påvisningen av kjemiske spor ved hjelp av gasskromatografi i forhold til prøvetaking umiddelbart etter at brannen ble slokket, sank fra 100 % til 75 %.
- ”Sniffer” virker å være et godt egnet verktøy i forbindelse med åstedsundersøkelser av branntomter, relativt kort tid etter brannen. Sniffer anbefales først og fremst som et hjelpemiddel til å bestemme de steder som egner seg best for prøvetaking for gasskromatografi.
- Slokkevann kan redusere mulighetene for å påvise kjemiske spor etter brennbar væske. Dette gjelder først og fremst for vannløselige brennbare væsker, slik som rødsprit eller etanol. Når det gjelder ikke-vannløselige brennbare væsker, kan slokkevannet forsegle væsken, noe som vil hindre avdamping.

2.7 Oppsummering

I dette avsnittet oppsummeres det hvorvidt vi har greid å besvare spørsmålene som ble stilt i kapittel 2.1. Basert på denne oppsummeringen presenteres det tema man bør se nærmere på.

Spørsmål:

1. *Hvor lang tid kan det brenne før brennbar væske ikke lar seg identifisere gjennom kjemisk analyse og bruk av hund?*
2. *Hvor lang tid tar det før brennbar væske ikke lar seg identifisere gjennom bruk av hund eller kjemisk analyse av prøver tatt fra områder der det ikke har brent i og utenfor brannrommet?*
3. *Hvor lang tid tar det før søl av brennbar væske på for eksempel klær ikke lar seg identifisere?*
4. *Hvor lang tid tar det før en brannhund ikke lenger kan markere brennbar væske?*
5. *Når blir spor av brennbar væske borte som følge av vær og vind?*

Resultater:

For disse spørsmålene har vi ikke funnet pålitelig litteratur som gir gode svar. Ut i fra de referansene vi har funnet, kommer det frem at det er mange faktorer som påvirker muligheten for å kunne påvise bruk av brennbar væske i ulike materialer, og at tid etter brann er kun én av mange.

Spørsmål 6:

Gir noen av de etablerte metodene for påvising av brennbar væske mulighet for falsk positiv tolkning grunnet kontaminering av smeltet plast?

Resultater:

Innenfor temaet falsk positiv tolkning på grunn av smeltet plast er det funnet flere referanser, og det er også presentert metoder for å redusere denne risikoen.

Spørsmål 7:

Finnes det publisert dokumentasjon av metode for stadfesting av brennbare væsker ved hjelp av UV-lys og kamera?

Resultater:

Når det gjelder bruk av UV-lys og kamera som en metode for å påvise bruk av brennbar væske, er det ikke funnet pålitelige forskningsartikler. Imidlertid finnes det flere nettsider som promoterer denne metoden, men hvilket grunnlag disse sidene baserer seg på er ukjent.

Spørsmål 8:

Finnes det publisert dokumentasjon av alternative metoder for stadfesting av brennbare væsker?

Resultater:

Det er funnet flere referanser som presenterer ulike alternative metoder for stadfesting av bruk av brennbare væsker.

Det er ikke funnet noen referanser som har studert bruk av tennbriketter og stearinlys i sammenheng med de nevnte spørsmålene. Dette bør undersøkes nærmere i fremtidige forskningsprosjekter.

3 Brann som følge av gnister, glør og varme partikler

3.1 Innledning

Spørsmål man skal forsøke å besvare er:

1. Hva må til for at en varm partikkel (størrelse, temperatur) skal antenne faste materialer som blant annet tekstiler og byggematerialer?
2. Hva må til for at en varm partikkel (størrelse, temperatur) skal antenne olje- og spritbaserte væsker?
3. Hva skjer med RIP-sigaretter dersom de tildekkes?

I dette avsnittet omtales tre typer antennelseskilder:

- Flyvebranner
- Varme partikler av ubrennbar materiale og gnister
- Ulmende sigaretter

En flyvebrann er definert som *varme partikler som transporteres i luften og faller ned og antenner brennbare materialer. Antennelse av brann på annet sted enn primærbrannområdet, som følge av at et varmt nok materiale med tilstrekkelig energi forflytter seg fra primærbrannen* [13].

Flyvebranner kan være partikler av brennbar materiale der det foregår en forbrenningsprosess i selve partikkelen, for eksempel glødende biter av trevirke, barnåler etc., men en flyvebrann kan også være en varm ubrennbar partikkel, for eksempel av metall eller mineralull.

Ved aktiviteter som sveising og kutting med vinkelsliper dannes det gnister, det vil si glødende partikler. Hvor stor evne disse partiklene har til å antenne brennbar materiale, avhenger av en rekke faktorer:

- Det brennbare materialet
- Partikkelens temperatur
- Partikkelens størrelse
- Partikkelens varmekapasitet
- Hvor godt partikkelen blir termisk isolert i det brennbare materialet

Temperaturen på slike partikler kan være svært høy, og langt over antennelsestemperaturen for de fleste brennbare materialer. For partikler av stål kan temperaturen nå 1400 °C [14]. Den praktiske brannfaren med hensyn til gnister fra mekaniske operasjoner er imidlertid begrenset ved at partiklene er relativt små, og inneholder lite energi, selv om temperaturen er høy. Partiklene avkjøles raskt, og starter brann kun dersom forholdene er optimale, som for eksempel når de havner i løs, tørr bomull eller i en eksplosiv atmosfære. Større partikler vil holde på varmen lengre, men vil ofte ikke oppnå kritisk høye temperaturer.

3.2 Antennelse av trevirke

Det er ikke funnet mye publisert informasjon om antennelse av trevirke med gnister eller glør. I en artikkel der kunnskapsstatus med hensyn til antennelse av trevirke gjennomgås, stadfester Babrauskas at det finnes lite eksperimentelle data tilgjengelig for antennelse på

grunn av varme legemer [15]. Han konkluderer imidlertid med at antennelse er mulig under overraskende milde eksponeringer, det vil si flyvebranner på noen få gram.

En artikkel fra Australia omhandler antennelse av trebroer ved gnistregn fra skogbranner [16]. Artikkelen tar for seg antennelse når glør fraktes med vinden og samler seg i sprekker og spalter i brokonstruksjoner av trevirke, og omfatter en kartlegging av tjue trebroer som ble antent i to forskjellige skogbranner i henholdsvis 1983 og 1985. I dette scenariet er det typisk at en konstruksjon antennes flere steder samtidig. Det blir påpekt at aldret trevirke øker sannsynligheten for slik antennelse. Artikkelen beskriver tester der antennelse med glør fra brent trevirke er undersøkt, både i laboratorium og i feltforsøk med en bro som var omlag femti år gammel. Størrelsen på glørne ble ikke bestemt. Det ble gjort forsøk med spalter på henholdsvis 0 - 5 mm og 10 - 25 mm.

Noen funn fra denne artikkelen:

- Broer antennes vanligvis der vertikale og horisontale flater møtes, og glør faller ned i sprekker og spalter.
- Eksperimenter bekrefter at trevirke i broer kan antennes ved små opphopninger av glør i sprekker eller spalter.
- Antennelse starter med ulmebrann som utvikler seg videre, hjulpet av vind og høy temperatur (fra skogbrann).
- Ulmebrann utvikler seg raskest der trevirket er gammelt, oppsprukket og tørt.
- Hjørner av trebordene blir antent først.
- Det ble ikke observert ulmebrann i forsøkene med de smaleste spaltene.
- Det ble observert ulmebrann i fire av ni forsøk med ubehandlet trevirke og spaltebredde på 10-25 mm.
- Behandling med flammehemmende løsning eller svellende maling kan redusere sannsynligheten for antennelse, men ikke eliminere den helt.
- Overflatebehandling med et beskyttende sjikt, som for eksempel maling, kan redusere sannsynligheten for antennelse, ved at sprekker tettes igjen. Slik behandling krever imidlertid inspeksjon og vedlikehold.

Ved National Institute of Standards and Technology (NIST) i USA er det utført en forsøksserie for å undersøke under hvilke forhold glødende flyvebranner kan antenne vanlige bygningsmaterialer [17]. I forsøkene undersøkte NIST om brennende biter av furu, plassert i vinkelen mellom henholdsvis to kryssfinerplater og sponplater, førte til ulmebrann ved ulik vinkel mellom platene. Furubitene var formet som sylindre med høyde 76 mm og diameter 10 mm. Forsøk ble utført med vindhastigheter på 1,3 m/s og 2,4 m/s. Ved 1,3 m/s oppsto det ikke ulmebrann i noen av forsøkene. Ved vindhastighet 2,4 m/s oppsto det ulmebrann i alle forsøkene når vinkelen mellom platene var 60°. Ved en vinkel på 90° og vindhastighet 2,4 m/s oppsto det ulmebrann i noen tilfeller og i andre ikke. Ved en vinkel på 135° oppsto det ikke ulmebrann i noen av forsøkene.

I en tidligere artikkel fra NIST, blir det konkludert med at viktige forhold som bestemmer muligheten for antennelse ved flyvebrann, er tettheten på "gnistregnet" (fluksen), størrelsen på flyvebrannpartiklene og vindhastigheten [18]. Ulike treslag kan ha ulik sannsynlighet for antennelse.

I 2011 ble det avholdt en workshop ved NIST med tittel *Workshop for Urban and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires: A Workshop to Explore Future Japan/USA Research Collaborations* [19]. En av presentasjonene dreide seg om antennelse av cellulosematerialer ved varme metallpartikler som avgis ved lysbuer i høyspentledninger, og som føres med vinden. Det var utført eksperimentelle forsøk for å undersøke hvordan slike partikler kan føres med vinden, og hvilke temperaturer de har når de lander. Forsøkene ble utført i vindtunnel der stålkuler med ulik temperatur og ulik diameter

landet i henholdsvis oppmalt cellulose og barnåler, og eventuell brannutvikling ble observert. Det ble konkludert med at sannsynlighet for antennelse avhenger av både temperatur og av partikkelstørrelse. For cellulose ble det påvist ulmebrann ved partikkeldiameter 3 mm og temperatur 1100 °C. For barnåler var det nødvendig med partikkeldiameter 8 mm for å oppnå antennelse ved 1100 °C. Når partiklene hadde diameter på 19,1 mm, ble det observert ulmebrann i cellulosematerialet ved en partikkeltemperatur på 550 °C.

3.3 Antennelse av brennbart støv

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) i Tyskland har undersøkt utvikling av ulmebrann i beholdere med fire ulike typer støv (fint og grovt støv av kork, bøk og kakao) [20]. Bulkdensiteten varierte fra 59 kg/m³ (fint korkstøv) til 382 kg/m³ (støv av bøk). Porselenskuler med diameter fra 25 til 40 mm ble varmet opp i en ovn til 1200 °C, og plassert midt i beholderen med støv. Porselenskulen blir omtalt som et *inert varmt legeme*, fordi den ikke er involvert i reaksjonen på annen måte enn ved varmeoverføring til materialet i beholderen. Det ble ikke observert ulmebrann ved temperaturer under 489 °C, mens det ble observert ulmebrann ved starttemperatur på 503 °C. Utviklingen av ulmebrannen pågikk i bortimot 10 timer i enkelte av forsøkene, og det var ikke mulig å observere temperaturøkning fra utsiden av beholderne før forbrenningsfronten nådde overflaten. Minste diameter på ansamlingen av det brennbare materialet for å oppnå ulmebrann ved et *inert varmt legeme* er antatt å være over 10 mm.

3.4 Antennelse av biologisk materiale

I USA er det mange tilfeller der man mistenker at skyting med rifle er kilden til skogbranner [21]. USDA Forest Service har derfor undersøkt hvilket potensiale riflekuler har til å antenne organisk materiale. Ulike typer patroner og materialer (kobber, stål og kombinasjoner av disse) i kulene ble brukt i forsøkene, der det ble skutt mot en stålplate. Fragmenter fra kulene falt fra stålplaten ned i en eske med ovnstørket torv. I tre tester ble det brukt treull som organisk materiale. Totalt ble det avfyrt 433 skudd i forsøkene. De kompakte kobberkulene ga størst prosentandel fragmenter i forhold til opprinnelig masse (85 %), og også de største fragmentene. Den minste andelen fragmenter (35 %) ble målt for kuler med blykjerne og kobberkappe, og disse fragmentene var også de minste i undersøkelsene.

IR-kamera og temperaturfølsom maling indikerte at temperaturen på kulefragmenter var mellom 550 °C og 800 °C. Antennelsene ble detektert visuelt som områder med ulming i torven, og i noen tilfeller kunne det gå flere minutter fra skuddet til ulmingen ble observert. Kompakte kuler av kobber og kuler med stålkerne og stålkappe førte jevnlig til antenner, mens en type kule med blykerne og kobberkappe ikke antente materialet i esken. I fem tilfeller førte fragmenter fra samme kule til flere antenner. Selv små fragmenter var i stand til å starte en antennelse.

Undersøkelsen konkluderte med at kulefragmenter ble raskt avkjølt, men at de har potensiale til å antenne organisk materiale, spesielt hvis det er finfordelt, tørt, og nær den harde flaten som kulen først treffer.

Antennelse av brennbart materiale eksponert for varme partikler av aluminium er undersøkt ved University of California Berkeley i USA [22]. Fire ulike typer brensel ble undersøkt, alle plassert på et underlag av sand:

- cellulose i smale remser
- cellulose i pulverform
- blanding av strå fra bygg, hvete, havre og gress
- blanding av strå fra bygg, hvete, havre og gress i pulverform

Aluminiumspartikler med diameter 2 til 8 mm ble varmet opp til temperaturer mellom 575 °C og 1100 °C og sluppet ned i de ulike brenslene. Disse partiklene er sammenliknbare med partikler produsert ved sveising, eller når det oppstår utilsiktet kontakt mellom kraftledninger. Flammebrann og tilfeller uten antennelse ble registrert visuelt. Antennelse av ulmebrann ble ikke undersøkt.

Resultatene viste at cellulose antente ved lavere temperaturer enn gressblanding, noe som forklares med at lignin og en mer kompleks struktur i gressblanding hemmer antennelse. Brensel i pulverform antente lettere enn brensel i form av strå og remser. Dette forklares med at geometrien er viktig, og at tynnere brensel antennes lettere enn samme brensel i tykkere form. Et annet resultat var at forskjellen i antennelsestemperatur for de ulike materialene var mindre for de små aluminiumspartiklene enn for de større partiklene. Dette kan skyldes at energien som er nødvendig for å antenne alle de fire brenseltypene er liten. Hvis temperaturen på en partikkel er høy (som for de minste partiklene), kan antennelsen ses på som en pilotantennelse, og dermed mindre avhengig av typen brensel. De store partiklene antente brenselet ved lavere temperaturer, og denne antennelsen kan anses som en spontan antennelse i et varmt punkt. En slik form for antennelse vil være avhengig av type brensel og geometri.

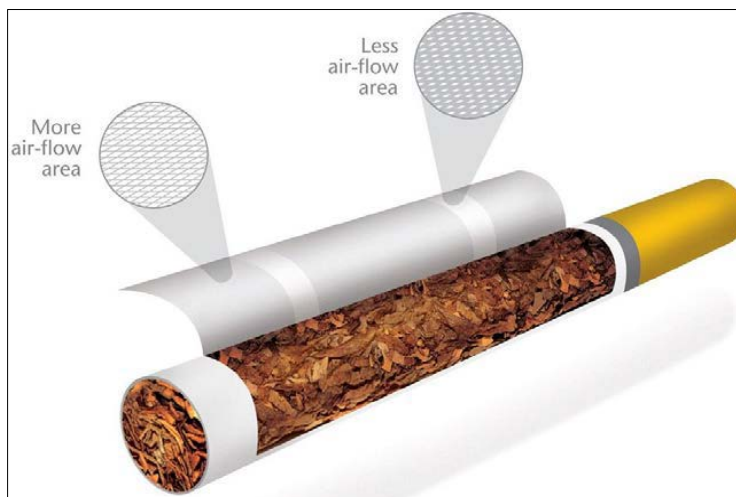
3.5 Antennelse ved sigaretter

3.5.1 RIP-sigaretter

Fra 17. November 2011 ble det innført krav om at alle sigaretter solgt innenfor EU og EØS skal være såkalte RIP-sigaretter (RIP = Reduced Ignition Propensity). Disse er konstruert for å slokne av seg selv når man legger dem fra seg. Slike sigaretter er utviklet for å redusere sannsynligheten for antennelse av stoppede møbler og madrasser, som representerer en stor andel av brannårsakene i dødsbranner i mange land.

I 2011 ble det ifølge Hall [23] estimert at brannvesen i USA rykket ut til ca. 90 000 branner som hadde sin årsak i røyking. Disse brannene forårsaket ca. 540 døde, 1640 personskader og skader på eiendom for ca. 621 millioner dollar. I USA antar man at RIP-sigaretter er den viktigste årsaken til antall døde i slike branner er redusert med 30 % i perioden 2003-2011. I 2003 hadde ingen stater i USA innført påbud om RIP-sigaretter. I slutten 2011 var RIP-sigaretter påbudt i alle stater. I 2010 ble Finland det første landet i EU som innførte kravet om RIP-sigaretter.

Den vanligste metoden for å konstruere RIP-sigaretter, er å anvende tynne papirbånd på innsiden av sigarettpapiret, som fungerer som ett slags «fartshump». Disse båndene begrenser hastigheten for forbrenningen i sigaretten, og reduserer luftgjennomtrengningen til sigarettgloen, noe som gjør at sigaretten lettere slokner av seg selv. Figur 3.1 viser et eksempel på en typisk sammensetning av selvslukkende sigaretter.



Figur 3.1: Eksempel på vanlig sammensetning av selvslukkende sigaretter. Tynne papirbånd plasseres på innsiden av sigarettpapiret, og når gloen når ”fartshumpen”, avtar hastigheten på ulmingen og oksygentilgangen, noe som medfører at sigaretten slokner av seg selv. (Figur: National Institute of Standards and Technology [23]).

3.5.2 Egenskaper ved tradisjonelle sigaretter

Egenskaper ved kommersielt tilgjengelige sigaretter (ikke såkalte RIP-sigaretter) [24]:

- Vekt: 0,6 - 1,1 g
- Diameter: 7,8 - 8,1 mm
- Lengde: 60-100 mm
- Varighet på ulming: 11 – 18 minutter, uavhengig av lengde på sigarettene
- Varmeavgivelse for sigarett som ikke røykes: 4-6 W
- Maksimal varmekraft fra en ulmende sigarett til overflaten den ligger på er 50 til 60 kW/m²

En ulmende sigarett oppfører seg annerledes når den ligger på et underlag enn når den brenner omgitt av luft. Temperaturen i kjernen av sigaretten er lavere når den ligger på et underlag enn når den er omgitt av luft, men denne lavere temperaturen vedvarer over lengre tid. De aller fleste sigaretter oppfører seg på samme måte, men det er enkelte sigaretter som ser ut til å ha lavere sannsynlighet til å antenne underlaget [25].

I en amerikansk studie ble sammenhengen mellom type sigaretter, røykere og brannrisiko undersøkt [26]. 11 egenskaper ved sigarettene ble undersøkt, og følgende 4 egenskaper ble vurdert å ha betydning for om det oppsto brann eller ikke:

- **Filter:** det er mindre sannsynlig at en filtersigarett antenner en brann enn en sigarett uten filter.
- **Lengde på filter:** sannsynligheten for antennelse avtar med økende lengde på filteret.
- **Porøsitet:** sannsynligheten for antennelse øker med økende porøsitet.
- **Emballasje:** sannsynligheten for antennelse er større for sigaretter i myk pakning enn hard pakning, fordi dette kan føre til at sigarettene oftere har skader som kan påvirke sannsynligheten for å utvikle ulmebrann.

I en annen amerikansk studie undersøkte man forbrenningsegenskapene til tobakk og sigarettpapir i maskinfremstilte sigaretter og i selvrullede sigaretter [27]. Resultater:

- Fabrikkfremstilte sigaretter med vanlig papir: 120 av 120 sigaretter brant helt ut før de sløknet.
- RIP-sigaretter: 29 av 40 sigaretter brant helt ut. 11 sløknet tidligere.
- Selvrullede sigaretter: Ingen av de 360 som ble testet brant helt ut.

Artikkelen konkluderer med at sigarettpapiret er avgjørende for om sigaretten ulmer helt ut eller ikke, og at papir for selvrullede sigaretter gir stor sannsynlighet for at sigaretten sløkner av seg selv før den er oppbrent.

Kombinasjonen av lav tetthet på tobakk, redusert omkrets på sigarettene og lav permeabilitet på sigarettpapiret har vist seg å gi merkbar reduksjon i sannsynligheten for antennelse [28].

En annen undersøkelse rapporterer imidlertid at egenskaper ved sigaretter, slik som porøsitet til sigarettpapiret, omkrets, hvor tett tobakken er pakket og forbrenningshastighet, ikke har stor betydning for potensialet for antennelse av møbeltrekk [29]. Antennelse av møbler ved ulmende sigarett er i større grad avhengig av egenskaper til tekstilet og geometriske forhold.

3.5.3 Ulmebrann i stoppete møbler

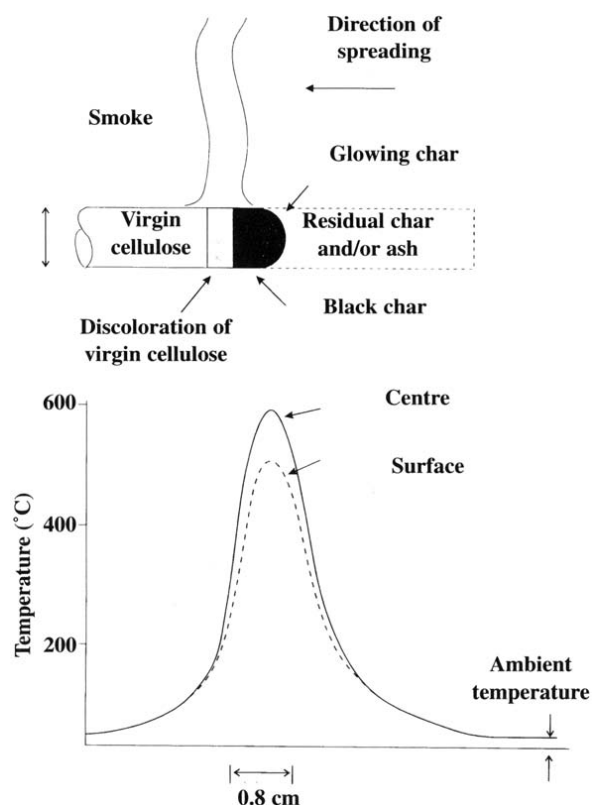
Mekanismene for antennelse av materialer og møbler ved sigaretter, ulmeprosessen og overgangen til flammebrann er beskrevet i en artikkel av Holleyhead fra 1999 [30]. Det er utført mye forskning på dette området, spesielt på 1980- og 90-tallet, og hensikten med forskningen har vært å utvikle mer brannsikre møbler. Parallelt har det også vært utført forskning for å utvikle sigaretter med mindre sannsynlighet for å antenne "standardmaterialer", såkalte RIP-sigaretter.

I Norge er det forskriftskrav om at stoppete møbler skal kunne motstå antennelse av en ulmende sigarett [31]. Dette kravet blir tilfredsstilt av de aller fleste stoppete møbler uten behov for å bruke flammehemmere i verken trekk eller stoppemateriale.

Varmeutvikling er en forutsetning for at det skal oppstå brann. Når en ulmende sigarett antenner et fast materiale, er det ulmebrannen som overføres til det faste underlaget.

Ulmning er en forbrenningsprosess uten flammer, der det faste materialet forkulles og brytes ned, og der det utvikles røyk. Ulmebrann kan foregå i porøse, faste materialer, og den avgir varme (eksoterm prosess). Ulmebrann kan kun foregå i materialer som forkuller, men det kan ikke utvikles ulmebrann i alle materialer som forkuller.

En ulmende sigarett er vist skjematisk i Figur 3-3. I figuren ser vi at temperaturen på overflaten av reaksjonsområdet i sigaretten (svart felt) er bortimot 100 °C lavere enn i senter av området. Vi ser også at de høye temperaturene er konsentrert i et område med liten utstrekning, 0,8 cm i henhold til figuren.



Figur 3-2: Skjematisk beskrivelse av stabilt ulmende sigarett [30].

Materialer som kan ulme har det til felles at de er sammensatt av fibre eller partikler, og dermed er forholdet mellom overflate og volum stort. Den løse strukturen gir muligheter for luftgjennomstrømning og diffusjon av gasser, og den store (interne) overflaten gir gode muligheter for oksidasjon. Dette gjør at mange slike materialer kan underholde en ulmebrann, og gjør at noen av dem kan antennes ved en ulmende sigarett. Sigarettene er i seg selv et ulmende cellulosebasert brensel, og kan starte ulmebrann i enkelte materialer før hele sigarettene har ulmet opp. Polyuretanskum er et av materialene som kan underholde en ulmebrann.

Ulmebraannen kan etter en stund gå over til en flammebraann. Mekanismene for overgangen er diskutert, men en forklaring kan være en økning i lufttilførsel på grunn av trekkforhold, eller fordi det ulmende materialet kollapser. Tiden det tar fra ulmingen starter til det eventuelt oppstår flammebraann, avhenger av faktorer som type materialer, materialeegenskaper, geometri og ventilasjon, og kan variere mye fra tilfelle til tilfelle.

Følgende forhold vil avgjøre om et materiale vil kunne antennes av en ulmende sigarett:

- Type materiale
- Form på materialet (fiber, partikler, kompakt, tykkelse)
- Termiske egenskaper (varmekapasitet, varmeledningsevne)
- Temperatur i sigarettens forbrenningssone
- Kontakten mellom sigarett og underlag
- Mengde aske på sigarettene (mye aske isolerer varme)

Det er bare materialer av fibre med cellulose som hovedkomponent som kan antennes av en ulmende sigarett. Eksempler på tekstiler av cellulose er bomull, blandingstekstiler med

bomull, lin, rayon og viskose. Andre materialer danner ikke et tilsvarende kullholdig lag når de brenner, og ulmebrannen kan derfor ikke overføres fra sigaretten til materialet.

Mykt polyuretanskum brukes mye i stoppete møbler. PUR-skum har evnen til å ulme, men det er lite sannsynlig at materialet kan antennes direkte av en ulmende sigarett. Noen typer er i stand til å ulme isolert, mens andre er avhengig av kontakt med en ulmende kilde, som ulmebrann i et kraftig møbeltrekk [32].

På begynnelsen av 1990-tallet ble det gjennomført et stort forskningsprosjekt der brennbarheten av stoppete møbler ble undersøkt, det såkalte CBUF-prosjektet (Combustion Behaviour of Upholstered Furniture) [33]. Stoppete sofaer og lenestoler med 20 ulike materialkombinasjoner ble blant annet testet med ulmende sigarett i henhold til den europeiske standarden EN 1021-1. Denne standarden er også publisert som en norsk standard, NS-EN 1021-1[34]. Standarden spesifiserer at tennkilden skal være en utildekket ulmende sigarett (ikke RIP-sigarett).

Materialkombinasjonene som ble testet omfattet trekk og stoppematerialer i ulike kvaliteter, deriblant tre stoler med trekk av ikke-flammehemmet ullstoff, og en med trekk av flammehemmet ullstoff. Med flammehemmet mener vi her at stoffet er behandlet med flammehemmende kjemikalier. Stoppematerialet i alle disse stolene var skum som skal kunne motstå en moderat brannpåkjenning uten å bli antent. Ingen av de tjue materialkombinasjonene ble antent i disse testene. Dette gjaldt også møbler med materialkombinasjoner som er regnet som svært brennbare, som for eksempel en stoppet lenestol med polyestertrekk på polyeterskum.

3.5.4 Hva betyr møbeltrekket for antennelse?

Ull

Ull er et tekstil som forkuller under forbrenning [24]. Temperaturen for antennelse av ull varierer i litteraturen, dette skyldes at temperaturen er bestemt gjennom bruk av ulike tester og ulike ulltekstiler. For pilotantennelse (antennelse med flamme eller gnist) varierer rapportert antennelsestemperatur fra 224 til 319 °C. Ull er et av de materialene som har høyest motstand mot antennelse ved eksponering for ulmende sigarett, og motstanden øker med vekten på tekstilet [25],[35]. Ull blir ansett som en type fiber med innebyggete flammehemmende egenskaper på grunn av de komplekse kjemiske og fysiske strukturene, og på grunn av den kjemiske sammensetningen [36].

Noen tekstiler kan bestå av en blanding av ullfibre og fibre av andre materialer. Brannegenskapene til en slik blanding vil avhenge av mengdeforholdet mellom de ulike fibertypene, og av strukturen til tekstilet.

En kraftig og slitesterk ulltekstil vil være tett vevet og relativt kompakt, og dette gjør at slike tekstiler vil ha stor motstand mot antennelse.

Tekstiler av cellulosefiber og termoplaster

Kjemisk sammensetning, det vil si innholdet av alkalimetaller og alkaliske kationer, av et tekstil er viktig for om det kan bli utviklet ulmebrann i tekstilet [37]. For cellulosebaserte tekstiler er innholdet av natrium- og kaliumioner en viktig grunn til at det kan utvikle seg ulmebrann i dem. Kaliumioner finnes naturlig i bomull, mens natrium blir tilsatt gjennom fargeprosesser.

Fibertypen i møbeltrekket er avgjørende for sannsynligheten for at det skal oppstå ulmebrann ved eksponering for ulmende sigarett [38]. Møbler med trekk av bomullstekstil (cellulosebasert) er mer tilbøyelig til å utvikle ulmebrann enn møbler med

trekk laget av termoplastfibre (for eksempel polyester og polyamid). For stoppete møbler med trekk av cellulosebaserte fibre blir sannsynligheten for å utvikle ulmebrann høyere når flatevekten av trekket øker. Møbeltekstiler av termoplast har bedre motstand mot antennelse ved ulmende sigarett enn cellulosebaserte, særlig gjelder dette for tyngre tekstiler. Dette skyldes sannsynligvis at termoplasten vil smelte og trekke seg vekk fra varmekilden (sigaretten), mens et cellulosebasert tekstil vil forkulle, noe som er en forutsetning for at ulmebrannen skal kunne utvikle seg videre i tekstilet.

I en undersøkelse av 500 ulike møbeltrekk med eksponering for ulmende sigarett, var 141 av de 145 møbeltrekkene som ble antent cellulosebaserte [39]. 355 av trekkene ble ikke antent.

I en annen undersøkelse ble 50 ulike cellulosebaserte møbeltrekk testet med 4 ulike typer sigaretter [40]. Det ble konkludert med at de fleste tekstilene som antente var uavhengig av hvilken type sigarett de ble eksponert for. Tekstiler som lett antennes av ulmende sigaretter har en rekke fellestrekk [40],[41]:

- I hovedsak laget av cellulosefibre (bomull, rayon, blanding av disse, lin).
- Relativt høy flatevekt (g/m²).
- Inneholder nok natrium eller kalium til å underholde en ulmeprosess.

Brukte tekstiler

Effekten av tilsmussing av 66 ulike brukte møbeltrekk med tanke på muligheten for antennelse ved ulmende sigarett er blitt undersøkt [42],[43]. Møbeltrekkene i forsøkene var i gjennomsnitt 15 år gamle, og besto av cellulosebaserte tekstiler, syntetiske tekstiler og tekstiler med kombinasjoner av cellulose og syntetiske fibre. Tilsmussing førte ikke til økning i sannsynligheten for antennelse, men økte derimot motstanden mot antennelse.

3.5.5 Hva skjer med RIP-sigaretter dersom de tildekkes?

RIP-sigaretter har en mindre tilbøyelighet til å forårsake brann. Ifølge teststandarden EN 16156 for slike sigaretter så er det opp til 25 % sannsynlighet for at en slik sigarett kan brenne ut i sin fulle lengde [44]. Ettersom man på grunnlag av erfaring ikke kan utelukke at vanlige sigaretter kan forårsake brann dersom de tildekkes, kan man heller ikke utelukke at en RIP-sigarett vil gjøre det. Den eneste forskjellen er at sannsynligheten for at det skal skje, trolig er vesentlig redusert i forhold til vanlige sigaretter.

Brannforsøk med RIP-sigaretter ved SP i Sverige

Til tross for at de fleste sigaretter som selges sannsynligvis er av selvslukkende type, viser brannstatistikk at sigaretter fortsatt forårsaker et stort antall dødsbranner. Det finnes ingen markedskontroll der myndigheter kontrollerer at sigaretter som selges innen EU faktisk er selvslukkende. SP Fire Research i Sverige har gjennomført et prosjekt for å kontrollere om sigaretter som selges på svenske markedet virkelig er selvslukkende [45]. De tre sigarettmerkene som ble valgt ut for testing i henhold til EN 16156, oppfylte alle kravene for RIP-sigaretter med god margin. Det ble også gjennomført branntester med disse RIP-sigarettene og med konvensjonelle sigaretter. Ulike kombinasjoner av materialer i stoppete møbler ble testet i henhold til den europeiske standarden EN 1021-1, som er en metode for å undersøke om stoppete møbler antennes av en ulmende sigarett [34]. I henhold til standarden legges sigaretten på møbelet uten å dekkes til av annet materiale. I undersøkelsen ble det imidlertid også gjennomført tester der sigarettene ble dekket til med tekstil av henholdsvis polyester, akryl, ull og bomull.

I forsøkene ulmet 68 % av de utildekkete RIP-sigarettene i sin fulle lengde. I flere tilfeller oppstod det også ulmebrann i tøy og stoppemateriale. Det ble konkludert med at prøvningsmetoden som bestemmer om et sigarettmerke er selvslukkende, samsvarer dårlig med virkeligheten. Videre ble det konkludert med at ettersom en stor andel av sigarettene ulmer i sin fulle lengde, så er det en viss risiko for antennelse, avhengig av kombinasjonen av materialer i møbeltrekk og stopping. Forskerne mener at forsøkene styrker påstanden om at kombinasjonen av møbeltrekk, stoppemateriale og testkonfigurasjon sannsynligvis har større effekt med hensyn til antennelse enn om det anvendes en RIP-sigarett eller konvensjonell sigarett som tennkilde [46].

3.5.6 Antennelse av andre materialer med sigaretter

ATF Fire Research Laboratory i USA har utført mange undersøkelser av muligheter for antennelse ved eksponering for ulmende sigarett, og antennelse av papir er et av temaene som er undersøkt. I et prosjekt ble antennelse av 15 ulike typer vanlig forekommende cellulosebaserte materialer ble undersøkt i 77 eksperimenter [47], hver med 50 enkeltforsøk, som til sammen omfattet 3 850 ulmende sigaretter. Konklusjonen var at sannsynligheten for å oppnå flammebrann var svært avhengig av type materiale brukt som brensel, og av geometrien. Andre statistisk signifikante parametere var lufthastighet og type sigarett. Av de 63 objektene der det oppsto flammebrann, varierte tiden til antennelse fra 65 til 960 sekunder.

3.6 Hva må til for at en varm partikkel skal antenne olje- og spritbaserte væsker?

3.6.1 Generelt om antennelse av brennbare væsker

Før man begynner å lese om antennelse av brennbare væsker, kan det være nyttig å sette seg inn i betingelsene for at brennbare væsker skal antenne og fortsette å brenne. Følgende prosesser må ifølge Kanury [48] finne sted før at antennelse av den brennbare væsken kan skje:

1. Fordampning av den brennbare væsken
2. Blanding av væskedamp med luft
3. Antennelse av blandingen av væskedamp og luft

Når brennbar væske antennes, er det ikke væsken som antennes og brenner, men væskedampen som damper av fra væskeoverflaten, som igjen blandes med luft i et bestemt forhold (innenfor nedre og øvre eksplosjonsgrense for væsken). Først må tilstrekkelige mengder av brennbar damp produseres fra væskeoverflaten som et resultat av temperaturen til væsken, slik at konsentrasjonen av brensel damp i luft er minst lik nedre eksplosjonsgrense. Fordampning øker med økende væsketemperatur. Videre må dampen blandes med en oksidant, det vil i praksis si oksygen i luft, og temperaturen til blandingen av damp og luft må være høy nok til at det oppstår en selvaksellerende oksidasjon, som fører til spontan antennelse. Alternativt må det tilføres en tennkilde (flamme eller gnist), som lokalt kan øke temperaturen i blandingen opp til antennessetemperaturen.

Fordampning

Til forskjell fra faste brenslers vil væskebrenslers fordampe uten noe forandring i den kjemiske strukturen til brenselmolekylene, og den brennbare væsken vil vanligvis ikke etterlate noen form for rester. Hvor lett en brennbar væske kan produsere damp ved oppvarming, blir vanligvis betegnet med væskens flyktighet eller fordampningsvarmen. En væske er meget flyktig, hvis damptrykket er høyt ved en gitt temperatur, samt at fordampningsvarmen er lav.

Blanding av brensel damp og luft

Blanding av brensel damp og luft er vanligvis avhengig av følgende forhold:

- hastigheten på den omgivende luften
- graden av turbulens induisert av vind og oppdriftskrefter
- molekylvekten til brensel dampen i forhold til luft

Hvor raskt damp og luft blandes øker med hastigheten på den omgivende luften, graden av turbulens og avtagende molekylvekt til brenselet.

Antennelse av blandingen av damp og luft

Væskedampen må blandes med luft innenfor et visst konsentrasjonsområde, det vil si mellom *nedre og øvre eksplosjonsgrense*. Utenfor disse grensene vil konsentrasjonen av brennseldampen i luft være henholdsvis for lav (for mager) eller for høy (for fet) til at den brennbare dampen kan antennes og brenne. For de fleste brennbare væsker og gasser utgjør eksplosjonsgrensene et temmelig snevert område. For bensin er for eksempel dette området 1,1 – 7,6 % og for propan 2,1 – 9,5 % i luft, ifølge NFPA 325 [49]. Hydrogen, acetylen og CO er blant de få stoffene som har temmelig vide eksplosjonsgrenser, henholdsvis: 4 – 75 %, 2,5 – 100 % og 12,5 – 74 % [49].

3.6.2 Flammepunktet til en brennbar væske

I noen tilfeller vil flammen spre seg raskt gjennom blandingen av damp og luft over væskeoverflaten, og deretter slokne (et såkalt «flash»). Den laveste temperaturen på den brennbare væsken hvor dette er mulig, kalles *flammepunktet* (engelsk: «flash point»).

Hvis fordampningen fra væskeoverflaten derimot blir større, for eksempel på grunn av høy temperatur, slik at avdampingen fra væskebrenselet øker, kan flammen i den brennbare væsken bli vedvarende. Temperaturen som medfører at det oppstår en vedvarende brann i væsken, kalles *antennelsestemperaturen*. Forskjellen mellom antennelsestemperatur og flammepunkt varierer temmelig mye avhengig av væskebrenselet, men antennelsestemperaturen ligger vanligvis 20-40 °C over flammepunktet.

Brennbare væsker klassifisert etter flammepunktet. Uttrykket *høyt flammepunkt* blir brukt for å angi brennbare væsker med flammepunkt over omgivelsestemperaturen eller lagringstemperaturen, mens *lavt flammepunkt* betegner væsker med flammepunkt under omgivelsestemperaturen eller lagringstemperaturen. Væsker med lavt flammepunkt representerer en stor brannrisiko ved omgivelsestemperaturen, ettersom dampen over væskeoverflaten meget lett kan antennes med en gnist, glo, flamme eller en varm overflate.

Situasjoner hvor flammepunktet har liten betydning

Flammepunktet har imidlertid liten eller ingen betydning når den brennbare væsken blir spredt som en spray. Brennbar væske i form av dråper eller tåke er vesentlig lettere antennbar enn samme væske samlet i en beholder eller et kar. I slike tilfeller kan væsken antennes ved omgivelsestemperaturen, som kan ligge vesentlig under flammepunktet.

Det samme gjelder også når brennbar væske er sugd opp i porøse materialer (klær, filler, isolasjon etc.). Et eksempel er lampeolje, som har et flammepunkt godt over omgivelsestemperaturen, men som lett lar seg antenne når oljen er sugd opp i en veke. Årsaken til at brennbare væsker lar seg antenne, selv om temperaturen ligger godt under flammepunktet for væsken, er at brenselet får mye større kontaktflate i forhold til luften.

Tabell 3.1 viser egenskaper til noen kjente brennbare væsker.

Tabell 3-1: Noen egenskaper til vanlige brennbare gasser og væsker (NFPA 325 [49]).

Navn	Nedre eksplosjonsgrense (i vol.-% i luft)	Øvre eksplosjonsgrense (i vol.-% i luft)	Flammepunkt °C	Spontan- antennelse- temperatur
Aceton	2,6–3	12,8–13	-17	465 - 485 [2]
Acetylen	2,5	100	(gass)	305
Ammoniakk	15	28	11	651
Karbon-monoksid	12	75	-191 (gass)	609
Diesel	0,6	7,5	>62	210
Etanol	3–3,3	17		363
• 96 %			17	
• 60 %			22	
• 50 %			24	
• 40 %			26	
• 30 %			29	
• 20 %			36	
Bensin*	1,4-1,5	7,4-7,6	-38 - -45	280-456
Heptan	1,05	6,7	-4	204 - 215
Hydrogen	4/18,3	75/59	(gass)	500 - 571
Isopropanol	2[4]	12	12	398 - 399 ; 425
Parafin	0,6–0,7	4,9–5	>38	210
Metan/natur-gass	4,4	15–17	(gass)	580
Metanol	6–6,7	36	11	385 - 455
White spirit	0,7	6,5	38–43	258
Propan	2,1	9,5–10,1	(gass)	480
Styren	1,1	6,1	31–32,2	490
Toluen	1,2–1,27	6,75–7,1	4,4	480 - 535

*Verdiene kan variere betydelig for forskjellige kvaliteter av bensin [49]. Det vil si om det er snakk om sommer- eller vinterbensin, og av oktantall.

3.6.3 Hva må til for at en varm partikkel skal antenne en brennbar væske eller gass?

Følgende to krav må være oppfylt for at en varm partikkel skal kunne antenne brennbare væsker:

1. Temperaturen på den brennbare væsken må være minst like høy som flammepunktet.
2. Partikkelen må avgi en viss minimum energi.

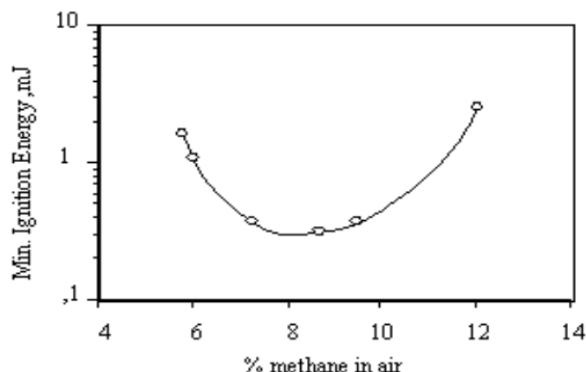
Antennelsestemperaturen

Det er bare når temperaturen på væsken er minst like høy som antennelsestemperaturen at væsken er i stand til å avgi tilstrekkelig med væskedamp, slik at konsentrasjonen av væskedampen er lik nedre eksplosjonsgrense for væsken, og væsken kan antennes og brenne med vedvarende flamme.

Minimum antennelsesenergi

Når temperaturen til den brennbare væsken er over flammepunktet, vil det dannes en antennebar blanding av væskedamp og luft like over væskeoverflaten. For å kunne antenne denne blandingen, kreves en tennkilde med tilstrekkelig energi. Minimum antennelsesenergi avhenger av konsentrasjonen av væskedampen i luft, forutsatt at

konsentrasjonen er mellom eksplosjonsgrensene til den brennbare væsken, samt av type brennbar væske. Figur 3.4 viser minimum energi for antennelse avhengig av konsentrasjonen av metan i luft. Den laveste verdien oppnås ved en støkiometrisk konsentrasjon på ca. 8 % metan i luft.



Figur 3.3: Minimum energi for antennelse av en blanding av metan og luft [50].

Statisk elektrisitet

Som det fremgår av Figur 3.4 over, så skal det en svært liten energikilde til for å antenne væskedampen som er innenfor eksplosjonsgrensene. Det snakk om bare noen få mJ. En gnist forårsaket av statisk elektrisitet vil være tilstrekkelig til å antenne brennbare væsker.

Et eksempel på dette er beskrevet av Pidoll et al. [51]. Hvis man låser påfyllingspistolen under fylling av bensin på bilen, kan det skje antennelse av bensindampen som kommer ut av påfyllingsåpningen på en bil, slik som Figur 3.5 viser. I tanken og i påfyllingsrøret vil det, bortsett fra i tilfelle ekstremt kaldt vær, være en konsentrasjon av bensindamp over øvre eksplosjonsgrense for bensin (7,6 %). På utsiden vil konsentrasjonen være under nedre eksplosjonsgrense, bortsett fra et område i nærheten av påfyllingsåpningen. Her vil konsentrasjonen av bensindamp være innenfor eksplosjonsgrensene (1,1-7,6 % [49]). Hvis det oppstår en gnist i dette området, vil bensindampen antennes.

Brannen beskrevet i Figur 3.5 oppsto fordi sjåføren låste påfyllingspistolen, før vedkommende satte seg inn i bilen igjen under tanking. Da vedkommende kom ut av bilen på nytt, for å avslutte påfyllingen, antente bensindamp som kom ut av påfyllingsåpningen av statisk elektrisitet. Dette skyldtes sannsynligvis at sjåføren var blitt ladet med temmelig høy statisk elektrisk ladning når vedkommende satt i bilen, med klær og setetrekk av kunstfiber.



Figur 3.4: (a) Sjåføren starter påfylling av bensin, låser påfyllingspistolen og setter seg inn i bilen igjen. (b) Sjåføren går ut av bilen etter å ha ventet på at bensinfyllingen ble ferdig. (c) Sjåføren tar i pistolen og antenner blandingen av bensindamp og luft ved statisk elektrisitet. (d) Det står kraftige flammer ut av påfyllingsåpningen på bilen [52].

Ifølge Babrauskas [52], kan en person bli ladet med så høy statisk elektrisk ladning som opptil 15 kV, skjønt verdier på 5 – 8 kV er mer typisk. Grunnen til at det ikke skjedde noen antennelse da sjåføren åpnet bensinlokket, var at den statiske elektrisiteten ble fullstendig utladet da vedkommende tok i bensintanklokket av metall eller berørte bilen. Da sjåføren kom ut av bilen igjen, var vedkommende fulladet med statisk elektrisitet, som ble utløst idet hun tok i bensinpistolen, og antennelse av bensindampen kunne dermed skje.

Hva bestemmer om antennelse skjer som en eksplosjon eller som en brann?

Hvis antennelsen skjer relativt raskt, vil det stå flammer ut av bensinrøret, som i tilfellet vist i Figur 3.5. Dette fordi konsentrasjonen av bensindamp raskt synker til under nedre eksplosjonsgrense med økende avstand fra påfyllingsåpningen. Antennelsen kan imidlertid skje som et relativt kraftig «flash», men neppe som en eksplosjon.

Hvis man tømmer bensin utover golvet i et rom, vil bensinen raskt fordampe. Bensindampen, som er temmelig flyktig, kan i dette tilfellet blande seg med luft slik at man får en blanding innenfor eksplosjonsgrensene. Ved antennelse vil det dermed kunne oppstå en relativt kraftig eksplosjon. Eksplosjonen vil bli kraftigere jo nærmere konsentrasjonen av bensindamp er støkiometrisk blanding. En slik eksplosjon vil kunne knuse vinduene i rommet, og forårsake en etterfølgende kraftig brannutvikling i brannrommet.

Hvis rommet er relativt lite og tett, kan det derimot hende at det kun oppstår en svak eksplosjon. Dette skyldes at luftmengden er for begrenset til å forårsake en kraftig eksplosjon med etterfølgende brann i brannrommet.

Minimum temperatur til en varm overflate eller partikkel for antennelse av brennbar væske

Tabell 3.1 viser spontanantennelsestemperaturen («Auto Ignition Temperature» eller AIT) til noen kjente brennbare væsker og gasser. Temperaturen til den varme partikkelen må minst være lik spontanantennelsestemperaturen til den brennbare væsken. Sannsynligvis må den ligge betydelig over denne temperaturen (jf. antennelse av brennbar væske på varme overflater).

Babrauskas [53] påpeker at verdiene som oppgis for AIT i litteraturen er bestemt ved bruk av en testmetode med svært ideelle forhold, som gir temmelig teoretiske og lave verdier for AIT for brennbare væsker og gasser. Hvis den varme flaten danner et lukket volum, vil antennelsen skje omtrent ved AIT, men dette er relativt sjeldent. I virkeligheten skjer spontanantennelse ved en vesentlig høyere temperatur når en brennbar væske drypper ned på en varm og fri overflate. Babrauskas [53] hevder at dette skjer ved en temperatur som ligger minimum 200 °C over AIT.

Colwell et al. [54] rapporterer om forsøk som viste at bensin først antente på varme, horisontale flater (for eksempel på eksosmanifolden til biler), da temperaturen på disse overflatene overskred 750 °C. Dette er en temperatur som er vesentlig høyere enn oppgitte verdier for AIT for bensin på 280-456 °C (jf. Tabell 3.1).

Zakharevich et al. [55] har gjennomført forsøk med antennelse av bensin ved hjelp av stålpartikler med høy temperatur (sylindere med 6 mm diameter og 5 mm høyde). Partiklene ble sluppet ned i et kar med 40 mm høyde og 50 mm diameter, og antennelse skjedde først når temperaturen på partikkelen var 1080 °C.

Minimum temperatur til en varm overflate for antennelse av brennbar gass

Varmer overflater kan også utgjøre en fare hvis det oppstår en gasslekkasje. Ungut et al. [56] har funnet at spontanantennelse av forskjellige blandinger i luft av metan, naturgass, propan og butan på en overflate av varmt, rustfritt stål, skjedde ved temperaturer (i grader Kelvin) som var 1,5 til 1,75 ganger høyere enn rapporterte spontanantennelsestemperaturer. Følgende temperaturer var nødvendige for å antenne gassen, avhengig av type brennbar gass:

- Butan: 1081 - 1264 K
- Propan: 1110 - 1127 K
- Naturgass: 1152 - 1227 K
- Metan: 1209 - 1223 K

Det understrekes at resultatene primært gjelder for de aktuell eksperimentelle forholdene, og at resultatene bør brukes med forsiktighet. Det påpekes en mulig innflytelse av andre parametere som kan påvirke spontanantennelsestemperaturen.

Kanury [48] oppgir at for en familie av brensler (oljeprodukter), gjelder følgende når brenselets molekylvekt øker (for eksempel for tyngre brennbare væsker, slik som diesel):

- en markant økning i kokepunktet
- en liten reduksjon i fordampningsvarmen
- en tydelig økning i flammepunktet
- en moderat og uregelmessig reduksjon i nedre eksplosjonsgrense
- en merkbar reduksjon i AIT

Det fremgår for eksempel av Tabell 3.1 at bensin, som har vesentlig lavere molekylvekt enn diesel, har betydelig lavere flammepunkt og høyere AIT enn diesel, noe som skulle bekrefte noen av de ovennevnte punktene.

3.7 Oppsummering

I dette avsnittet oppsummeres det hvorvidt vi har greid å besvare spørsmålene som ble stilt i kapittel 3.1.

Spørsmål 1:

Hva må til for at en varm partikkel (størrelse, temperatur) skal antenne faste materialer som blant annet tekstiler og byggematerialer?

Resultater:

Det er funnet litteratur som beskriver forskning om hva som må til for at en varm partikkel skal kunne antenne faste materialer som trevirke, brennbart støv og biologisk materiale.

Spørsmål 2:

Hva må til for at en varm partikkel (størrelse, temperatur) skal antenne olje- og spritbaserte væsker?

Resultater:

Her har vi først gitt generelle forklaringer om antennelse av brennbare væsker, herunder er det forklart hva en væskes flammepunkt har å si for antennelse. Videre ble det presentert forskning som omhandler hva som må til at en varm partikkel skal kunne antenne olje- og spritbaserte væsker.

Spørsmål 3:

Hva skjer med RIP-sigaretter dersom de tildekkes?

Resultater:

Innledningsvis er det redegjort for egenskaper ved tradisjonelle sigaretter og RIP-sigaretter, og hvordan disse kan antenne en ulmebrann i møbler. Videre redegjøres det for forskning som sammenligner tradisjonelle sigaretter med RIP-sigaretter og deres evne til antenne et underliggende materiale.

Litteraturen innenfor antennelse af faste materialer ved varme partikler er svært begrenset, og det er flere områder der det er behov for ytterligere kunnskap. Et eksempel er antennelse av trevirke ved varme partikler, for eksempel i forbindelse med varme arbeider.

4 Brann i batterier

4.1 Generelt

Problematikken rundt branner forårsaket av batterier kommer stadig mer i fokus, nasjonalt og internasjonalt, spesielt med tanke på den stadig økende bruken av litiumbatterier i forbindelse med mobiltelefoner, bærbare datamaskiner, hybridbiler, el-biler, etc. Batteriene brukes i alt fra lommelykter og PCer til biler og større ferger. Brann i batterier har vist seg å være vanskelige å slukke.

I tillegg til å gi en oversikt over forskningsfeltet både når det gjelder brannstart og slukking av brann i batterier, skal vi forsøke å besvare følgende spørsmål:

1. Hvorfor oppstår branner i batterier?
2. Hvilke spor finnes i batteriet etter en brann, og kan man se hva som er primærskader og sekundærskader?
3. Hvorfor oppstår utblåsning av batteriet, og hvilke spor etterlater dette?
4. Hva sier standarder og evt. regelverk om interne sikringsmekanismer i batterier?

4.2 Batterityper

Det finnes to hovedgrupper av batterier:

- Primærbatterier – engangsbatterier
- Sekundærbatterier – oppladbare batterier

Primærbatteriene kjennetegnes ved at omformingen av kjemisk energi til elektrisk energi foregår ved en ikke-reversibel prosess. Sekundærbatterier (akkumulatorer) er batterier der den kjemisk-elektriske energiomformingen er reversibel, slik at batteriet kan lades opp gjentatte ganger etter utladning. Innenfor hver av disse hovedgruppene inngår det mange forskjellige batterityper.

Primærbatterier - engangsbatterier

Primærbatteriene er ofte små batterier som blir benevnt som AA, AAA, C, og D-batterier, samt 9V-batteri. Disse benevnelsene brukes også om oppladbare batterier.

Batteristørrelsen kan variere fra bilbatterier til vanlige 1,5 V tørrcellebatterier, som gir likestrøm. Batterier på 6 og 9 V består egentlig av 4 eller 6 tørrcellebatterier à 1,5 V. Slike lave spenninger vil vanligvis ikke forårsake brann, men de kan utgjøre en tennkilde under visse omstendigheter, hvor energien kan konsentreres i et lite tverrsnittsareal i en tynn leder. Man kan for eksempel antenne lett antennelige materialer ved å kortslutte batteripolene på 1,5 V og 9 V batteri ved hjelp av stålull eller andre elektrisk ledende materialer.

På grunn av at polene på et 9 V batteri er så nær hverandre, utgjør slike batterier en brannfare hvis man ikke isolerer batteripolene. Slike batterier kan utgjøre en tennkilde hvis de blir kastet i en søppelbøtte, sammen med annet metall (stålull, nål, spiker, aluminiumsfolie, binders, andre batterier) og annet lett brennbart materiale.

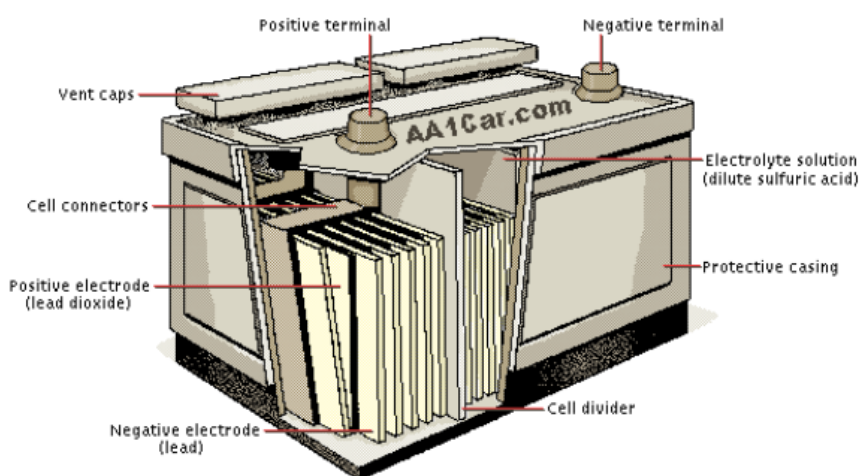
Metallgjenstanden kan kortslutte polene på 9 V batteriet, og dermed forårsake en såpass stor strømgjennomgang og varmgang i metallgjenstanden, at dette medfører antennelse av brennbare materialer i søppelbøtten.

Sekundærbatterier – oppladbare batterier

Sekundærbatterier blir også kalt akkumulatorer. Det finnes flere forskjellige kjemiske oppbygginger for akkumulatorer. De mest brukte er:

- Pb – Blybatterier, 2,1 V per celle
- NiCd – Nikkel-kadmium, 1,2 V per celle
- NiMh – Nikkel-metallhydrid, 1,2 V per celle
- Litium-ion – 3,6 V per celle

Mens Pb-, NiCd- og NiMh-batterier har en vannbasert elektrolytt, har litium-ion-batterier en elektrolytt som består av en blanding av brennbare, organiske karbonater (etylenkarbonat eller dietylenkarbonat) og litium-ioner. Figur 4.1 viser komponenter i et blybatteri for biler.



Figur 4.1: Viktige komponenter til et blybatteri (negativ og positiv pol, positiv elektrode (blydioksid) og negativ elektrode (blyplate), elektrolytt (fortynnet svovelsyre) [57].

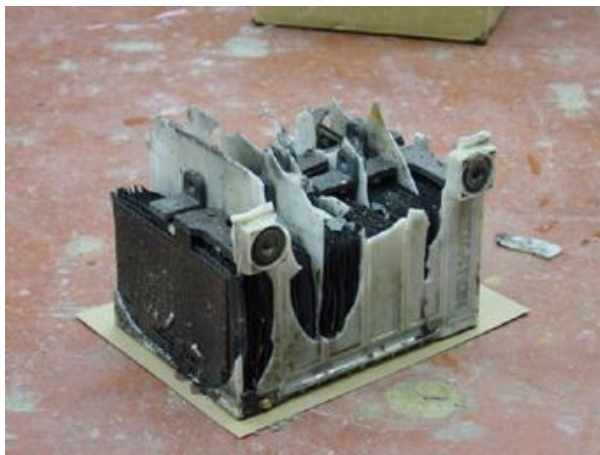
4.2.1 Blybatterier

Blybatterier er robuste, og er i dag hovedsakelig brukt til motorstart for transportmidler som bil, båt, fly og motorsykkel. Antennelsesfaren i forbindelse med elektriske batterier kan i følge Babrauskas [53] være:

- Frigjøring av brennbare gasser som kan medføre eksplosjon
- Tilførsel av elektrisk energi for antennelse av brann
- Antennelse og brann i selve batteriet

Eksplasjon i blybatterier

Når et batteri blir ladet, gir det fra seg hydrogengass. Dette kan føre til en eksplosjon hvis det blir akkumulert en eksplosiv blanding av knallgass (for eksempel i motorrommet), og en gnist utløses nær batteriet. Varmentviklingen kan medføre at de indre og ytre delene av batteriet smelter, mens trykket fra hydrogengassen kan medføre at hele batteriet kan sprekke og kollapse helt. Idet batteriet sprekker, kan hydrogengassen antenne, noe som vil resultere i eksplosjon (se Figur 4.2).



Figur 4.2: Et blybatteri som har vært utsatt for eksplosjon [57].

I løpet av ett år (1993-1994) ble 2280 skader på grunn av eksplosjon i batterier i motorkjøretøyer rapportert i USA[58]. Aktivitetene som førte til disse eksplosjonene i bilbatterier er vist i Tabell 4.1.

Tabell 4-1: Aktiviteter som medførte brann i forbindelse med 2280 eksplosjoner i blybatterier i biler i løpet av ett år (1993-1994) i USA[58].

Aktivitet	%
Lading av batteri	31
Tilkobling, sikring og stramming av kabler	26
Bruk av startkabler	19
Sjekking av væsknivå eller påfylling av vann	19
Ukjent	5

Et vanlig scenario ved eksplosjon er at startkablene blir feilmontert ved at den positive polen blir koblet til den negative polen på det andre batteriet. Det kan i slike tilfeller oppstå kortslutning i batteriet. Det kan også oppstå et enormt strømstøt mellom de to batteripolene, noe som kan føre til at de to batteriene blir raskt oppvarmet, og at det dermed produseres store mengder hydrogengass i det oppladete batteriet.

En slik feilmontering er imidlertid ikke nødvendig for at en eksplosjon skal finne sted. Noen ulykker med eksplosjon i batteriet har skjedd også når kjøretøyet ikke var i bruk, og tilsynelatende uten årsak. Babrauskas [53] hevder at langtidslagring av batterier gjør en eksplosjon i batteriet mer sannsynlig. Dette kan også skje hvis startkablene kortsluttes, eller ved at batteriet blir skadet i en kollisjon.

Hydrogengass har et stort eksplosjonsområde (hydrogen kan antennes når det er i 4-75 % blanding med luft). Hydrogengass kan lett antennes av en lavenergikilde, for eksempel statisk elektrisitet. Hydrogen vil imidlertid vanligvis ikke kunne bli antent av en varm overflate, slik som eksosmanifolden på grunn av for høy antennelsestemperatur (500 °C [49]). I praksis må temperaturen på eksosmanifolden være vesentlig høyere enn spontanantennelsestemperaturen (AIT) for at hydrogengassen skal kunne bli antent (jf. avsnitt 3.6.3)

Eksplosjon av blybatteri kan være forårsaket av at batteriet ble oppladet med en uvirksom battericelle, eller ved at batteriet ble ladet opp for raskt. I begge tilfellene kan vannet i batteriet ha blitt elektrolysert i for høy grad til H₂ og O₂. Dette kan heve den indre temperaturen i batteriet, slik at blyplatene bøyer seg. Dermed kan blyplatene

komme i kontakt med hverandre, slik at det produseres gnister. I verste fall kan det oppstå en kraftig kortslutning, med eksplosjon av batteriet som resultat. Gnister kan også bli produsert hvis nivået av elektrolytten i batteriet kommer under nederste del av blyplatene.

4.2.2 Litium-ionbatterier

Litium-ionbatterier har de senere årene blitt den dominerende ladbare batteritypen for både elektronisk utstyr (mobiltelefoner, bærbare PCer, nettbrett, verktøy osv.), og de brukes i økende grad som energibærer innen transport. Dette skyldes den høye energitettheten til disse batteriene. De har et høyere forhold mellom energi og vekt enn nikkelceller, og det gir dem høyere kapasitet ved lav spenning. I motsetning til nikkel-kadmiumbatterier (NiCd), regnes de ikke som miljøfarlig avfall, og kan kastes i restavfallet. Figur 4.3 viser oppbygning av en litium/mangandioksid knappecelle.

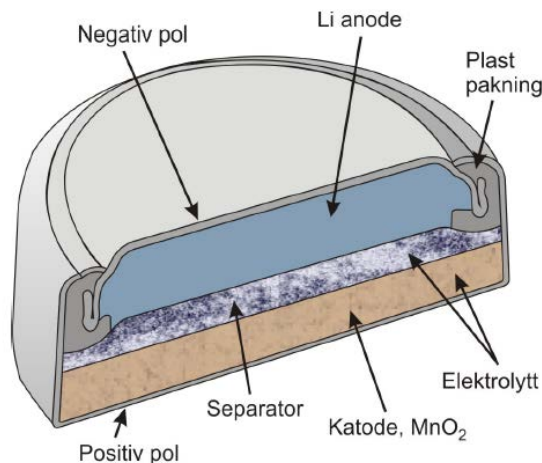
En typisk litium-ion celle består av følgende komponenter [59]:

1. Positiv elektrode (katode) av litiummanganoksid (LiMnO_2), (LiNiCoO_2 brukes også)
2. Negativ elektrode av karbon
3. Separator
4. Elektrolytt som ionetransportør

Elektrolytten består av en blanding av brennbare, organiske karbonater (etylenkarbonat eller dietylenkarbonat) og litium-ioner. Separatoren forhindrer kontakt mellom elektrodene i en celle. Den består vanligvis av porøs polyetylen, polypropylen eller en sammensetning av polyetylen-/polypropylenfilmer med tykkelse i området 10-40 μm .

Det er rapportert om visse sikkerhetsmessige problemer tilknyttet slike batterier. På grunn av begrenset størrelse og den høye energitettheten, har det skjedd eksplosjonsaktige reaksjoner ved feilaktig bruk eller på grunn av feil på produktet, ofte med kortslutninger og overoppheting som resultat.

Mens energitettheten til de tradisjonelle batteriene med vannbasert elektrolytt ligger fra 30 til 80 Wh/kg, inneholder et typisk litium-ionbatteri (sekundærbatteri) ca. 100 til 200 Wh/kg. Litium-ionbatteriene (primærbatteri) har en typisk varmekapasitet på ca. 1 kJ/(K·kg), mens vannbaserte batterier har minst dobbelt så høy varmekapasitet. For en gitt energiavgivelse blir følgelig temperaturstigningen dobbelt så høy i et litium-ionbatteri som i et vannbasert batteri. Fordi litium-ionbatterier har betydelig høyere spesifikk energi enn de fleste andre batterityper, er i følge Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) også de største sikkerhetsutfordringene knyttet til disse[60]. Høye temperaturer i batteriet er, som det vil bli diskutert senere, en av største utfordringene knyttet til litium-ionbatteriet.



Figur 4.3: Oppbygning av en litium/mangandioksid knappcelle (FFI [60]).

Litium-ionbatterier har et spenningsområde fra 3,0 V (utladet batteri, det vil si 0 % «State Of Charge» (SOC)) til 4,2 V (fullt oppladet eller 100 % SOC). På grunn av en relativt flat utladningsprofil til litium-ionbatterier, vil spenningen på batteriet vanligvis være ca. 3,6–3,7 V. Li-ion er ikke egnet som AAA, AA, C og D-batterier, ettersom cellene har høyere spenning enn 1,5 volt.

Litium-ion-celler er meget følsomme for skader når spenningen går utover det «tillatte» spenningsnivået. Utladning til under 3,0 V kan forårsake degradering av elektrodene, og dermed til en utladning under produsentens spesifikasjoner for lavspenning. Dette blir ofte kalt for *overutladning*. Repeterende overutladning kan føre til feil i battericellene og overoppheting av battericellen.

Lading over produsentens spesifikasjoner blir omtalt som *overladning*. Siden overladning kan føre til en voldsom og overoppheting, er det laget flere beskyttelsesinnretninger i battericellene eller batteripakkene for å hindre slik overladning. Rask degradering av elektrodene kan skje ved overladning, som er oppladning til en spenning betydelig over 4,2 V (for eksempel over 5 V).

Hyppigheten av branner i litium-ionbatterier

Det eksisterer neppe noe tall for hvor mange branner som forårsakes av litium-ionbatterier hvert år. Siden litiumbatteriene ble introdusert på slutten av 70-tallet, er det ifølge FFI [60] rapportert en rekke branner og eksplosjoner med årsak i slike batterier over hele verden. Til tross for det faktum at litiumbatteriene har blitt betydelig sikrere og bedre i årene som har gått, har antallet rapporterte branner ikke gått ned. Dette skyldes sannsynligvis den enorme økningen i bruken av slike batterier.

Sannsynligheten for at det skal oppstå brann i et litium-ionbatteri er imidlertid svært lav. Wang et al. [61] rapporterer om sannsynlighet mellom 10^{-7} til 10^{-6} . Likevel har slike hendelser vakt stor bekymring blant forbrukerne og myndigheter, noe som ved flere eksempler har medført omfattende og kostbare tilbakekallinger av batterier. Eksempelvis tilbakekalte Acer 27 000 batterier i USA i 2007 [62].

4.3 Feil i batterier som kan medføre brann

Feil i forbindelse med litium-ionbatterier kan være både feil som utvikler energi og feil som ikke utvikler energi. Sistnevnte feiltype kan være tap av kapasitet, økning av den

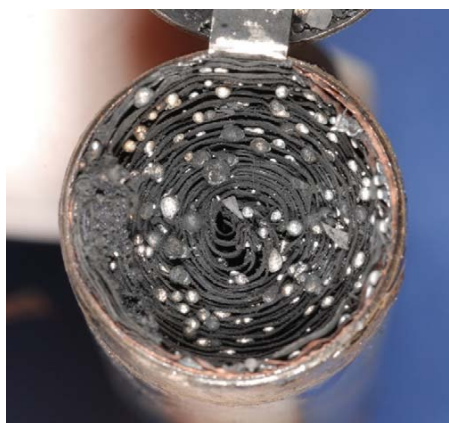
indre impedansen, lekkasje av elektrolytt, med etterfølgende uttørking og svelling av battericellen. Noen av disse feilene kan være et resultat av aldring av cellene.

Feil som utløser energi, kan føre til en overoppheting, som fortsetter av seg selv («thermal runaway») i en av cellene i batteriet. Jo mer energi en celle har lagret, jo større vil energiutviklingen bli. En annen grunn til at energiutviklingen kan bli stor, er at cellene inneholder en brennbar elektrolytt. Det er altså ikke bare lagret energi i cellene i form av potensiell, kjemisk energi, men det er også lagret betydelige mengder kjemisk energi i form av brennbar elektrolytt. Blybatterier, NiCd- og Ni-MH-batterier har derimot en vannbasert elektrolytt ifølge Mikolajczak [59].

Den indre temperaturen i cellen øker

En overoppheting av en battericelle skjer både ekstern oppvarming og som følge selvoppvarming på grunn av eksoterme, kjemiske reaksjoner i den oksyderende positive elektroden og den reduserende, negative elektroden. Dette kan føre til at temperaturen i elektrolytten kommer opp i området 70-90 °C. Når en celle har kommet opp i dette temperaturområdet, har den termiske stabilitetsgrensen til batteriet blitt overskredet, og overopphetingen vil starte. Den verste overopphetingen skjer ifølge Mikolajczak hvis cellen er fulladet (100 % SOC) eller overladet [59]. Figur 4.5 viser en sylindrisk litium-ioncelle (en såkalt 18650-celle) som har vært utsatt for overoppheting, der både aluminium i cellen og separatoren i cellen har smeltet.

Dersom temperaturen lokalt i cellen blir høy nok, kan oksidasjonsmiddelet reagere med brenselet direkte, og energien avgis som varme svært raskt [60]. Vanligvis er litiummetallet beskyttet av et tynt belegg av litiumsalter. Belegget er en isolator for elektroner, men det er en leder for litiumioner. Dersom litium smelter, kan belegget ødelegges og metallet reagere direkte med elektrolytten. På grunn av metallens lave tetthet, kan det også flyte opp i cellen og kortslutte cellen. Litium smelter ved 180 °C. Polypropylen og polyetylen, som begge benyttes mye i separatorer, smelter ved enda lavere temperatur, noe som også kan resultere i en intern kortslutning i cellene. Eksperimentelt ser man at eksplosjoner i litium-ionbatterier er vanlig, dersom celletemperaturen bringes over smeltepunktet til litium.



Figur 4.4: En litium-ioncelle som har gjennomgått en overoppheting. Størknede perler av aluminium er synlig (Mikolajczak [59]).

Utblåsning av batterier

Det indre trykket i cellen kan øke på grunn av at den oppvarmete elektrolytten, som har gjennomgått en overoppheting, både vil fordampe og dekomponere. Katodematerialet kan også dekomponere og avgi gass, noe som medfører trykkøkning. Dette kan føre til svelling av de prismeformede cellene hvis batteriet ikke har en ventileringsmekanisme, eller den ikke har fungert. Sylindriske celler har en utblåsningsmekanisme som aktiveres

når det indre trykket i cellen blir tilstrekkelig høyt. Gassen i cellene som ventileres, kan i slike tilfeller antenne i det celleinnholdet blir slynget ut, noe som kan føre til at det oppstår brann.

Feil ved litium-ionbatterier som medfører så kraftig overoppheting at det resulterer i brann i batteriet, kan være forårsaket av forskjellige ytre krefter. Dette kan være ytre branneksposering eller annen varmeksposering, mekanisk skade, eller det kan skyldes problemer i forbindelse med lading, utlading, feil i sikringssystemer, eller indre feil i battericellen. Slike feil kan også skyldes produksjonsfeil. Disse ytre belastningene kan inndeles på følgende måte ifølge Mikolajczak [59]:

- Termisk årsak
- Mekanisk årsak
- Elektrisk årsak
- Dårlig elektrokjemisk design
- Produksjonsfeil

4.3.1 Termisk årsak

Den mest direkte måten å overskride den termiske stabilitetsgrensen til litium-ionbatterier (70-90 °C), er å utsette en battericelle for en ytre varmekilde. En slik akutt eksponering av battericellen for høye temperaturer, kan lett føre til overoppheting («thermal runaway») av cellen. Hvis en elektrisk feil i en enkeltcelle i en batteripakke medfører overoppheting av cellen, kan cellen forårsake termisk påkjenning av en eller flere naboceller, og dermed forårsake overoppheting også av nabocellene. Således kan en overoppheting forplante seg gjennom hele batteripakken, og til slutt resultere i brann [59].

En intern feil i en av cellene i batteripakken til en bærbar PC kan forårsake at overopphetingen forplanter seg til resten av batteripakken. Hvis derimot varmeoverføringen mellom cellene i batteripakken blir begrenset ved at cellene er godt separert eller isolert fra hverandre, kan denne forplantningen forhindres [59].

4.3.2 Mekanisk årsak

Mekanisk skade av en battericelle kan føre til kortslutning av elektrodene, noe som kan føre til lokal overoppheting i cellen, som igjen kan føre til en overoppheting av hele batteripakken. Mekanisk skade kan både føre til at overoppheting skjer relativt raskt, eller det kan skje lenge etter at den mekaniske belastningen fant sted, dersom batteriet fortsatt blir brukt og oppladet gjentatte ganger. Det kan spesielt inntreffe overoppheting i skadde batterier ved gjentatte oppladninger [59].

Det er etablert teststandarder som angir minimum toleranser en battericelle skal kunne tåle med hensyn til sammenklemming eller mer konsentrert klemming på et punkt på cellen, for eksempel ved hjelp av en nål- eller spikerlignende gjenstand. Disse omtales nærmere i kapittel 4.3.7.

Mekanisk skade som skjer på *elektrodene*, har betydelig større sannsynlighet for å forårsake feil og overoppheting enn skade på sidene av batteriet. Hvis den mekaniske påkjenningen medfører at batteriskallet penetreres av for eksempel en spiker, kan det oppstå kortslutning og overoppheting av battericellen. Skadde batterier bør settes i karantene eller overvåkes nøye, dersom de brukes etter at de har vært utsatt for mekanisk skade [59].

4.3.3 Elektrisk årsak

Det flere elektriske årsaker som kan føre til overoppheting av batterier. Her vil vi i første rekke omtale følgende årsaker [59]:

1. Overlading
2. Ytre kortslutning
3. Overutlading

1. Overladning

Overladning av litium-ionbatterier kan forårsake betydelig degradering av både anoden og katoden. Dette kan føre til overoppheting i battericellen. Jo høyere overladingen er, jo mer sannsynlig er det at det oppstår kraftig varmgang i cellene. Både lading med for høy elektrisk spenning og for stor strømstyrke, kan forårsake overladingsfeil [59].

Alvorlig overlading skjer ikke ofte, siden elektronisk utstyr som regel har en beskyttelsesmekanisme mot overlading. I sjeldne tilfeller hender det imidlertid at for eksempel produksjonsfeil kan resultere i at overladingsbeskyttelsen ikke fungerer. Slike feil kan også forårsakes av at personer har gjort inngrep i elektronisk utstyr [59].

2. Ytre kortslutning

Etterforskning av flere tilfeller av batterier som har blitt overopphetet under transport, har vist at utilstrekkelig innpakking av battericellene er en viktig årsak til kortslutning av batteriet. Kortslutning vil medføre ekstremt høy strømgjennomgang og varmeutvikling i batteriet. Hvis temperaturstigningen blir vesentlig høyere enn 150 °C, kan separatorene smelte fullstendig og forårsake kontakt mellom anode og katode. Dette kan føre til at det oppstår brann i batteriet i løpet av kort tid [59].

3. Overutlading

Overutlading av litium-ionbatterier til nærmere 0 V (i stedet for ca. 3 V) vil ikke medføre overoppheting, men kan forårsake innvendig skade på elektrodene og strømkumulatoren ved at kobberet går i oppløsning, særlig når battericellen blir ladet på nytt. Når batteriet blir oppladet neste gang, kan denne skaden medføre overoppheting og brann [59].

4.3.4 Dårlig elektrokjemisk design

Testing av battericeller vil sikre at de er feilfrie som nye, men i noen sjeldne tilfeller kan aldring av batterier resultere i uventet degradering av en komponent i battericellen. Dette kan for eksempel være at elektrodene, separatorene eller elektrolytten kan resultere i feil som fører til overoppheting. Vanligvis skyldes dette at bruksbetingelsene ikke er blitt forstått og tilstrekkelig tatt hensyn til når battericellene ble planlagt og produsert. Dette bør ifølge Mikolajczak [59] skje ved at det utføres en feilanalyse av batterisystemet i forhold til bruksbetingelsene.

4.3.5 Produksjonsfeil

De aller fleste kommersielt tilgjengelige batterier og batteripakker har en robust utførelse, og er ikke beheftet med problemer i forbindelse med konstruksjonen. Slike produkter går

gjennom en rekke tester med hensyn til transport, lagring og forhold med tanke på interne elektriske feil. Batterier er konstruert for å hindre forventet mekanisk, termisk og elektrisk påkjenning som forklart foran. Likevel skjer det en gang i blant at det oppstår overoppheting i batterier. Hoveddelen av slike feil batterier er forårsaket av interne feil relatert til produksjonsfeil [59].

Det er ifølge Mikolajczak [59] et stort antall feil som kan oppstå under produksjonen av batteriene, og som kan føre til overoppheting. For eksempel kan det oppstå feil i battericellens råmaterialer, i belegget på elektrodene, forurensninger introdusert i produksjonsprosessen og feilmonterte, feilplasserte eller skadete komponenter. Det er blitt observert overoppheting i forbindelse med forurensning av elektrolytten. Videre kan det oppstå skade på elektrodene, som for eksempel feilinnstilling av elektrodene, utvekster og belegg på elektrodene etc. Slike interne feil i en battericelle kan føre til kortslutning i cellen.

Alvorlige produksjonsfeil vil vanligvis oppstå meget tidlig i batteriets levetid. Slike feil har en tendens til alltid å oppstå under lading av batteriet. Produsenter av batterier utfører derfor en rekke repeterende tester før de sender fra seg batteriene, for å unngå at slike feil skal oppstå hos forbrukeren [59].

4.3.6 Faktorer som påvirker effekten av feil i batterier

Effekten av en batterifeil vil i høy grad være avhengig av den totale energien lagret i batteriet [59]. Alvorligheten av en potensiell overoppheting kan reduseres ved å redusere den lagrede kjemiske energien. Dette kan gjøres ved å redusere volumet av elektrolytten, eller bytte ut den brennbare elektrolytten med en ubrennbar elektrolytt. Man kan også redusere den elektriske energien ved å redusere ladningen, fra 100 % til et lavere nivå, f. eks. 50 %. Man kan også oppnå dette ved å isolere eller separere battericellene.

Selv batterier som er mindre enn bilbatterier kan eksplodere av seg selv. 9 V alkaliske batterier har for eksempel eksplodert i bagasje om bord på fly [59]. Eksplosjon i batterier skjer vanligvis som følge av at batteripolene blir kortsluttet. Litium-ion-batterier kan eksplodere på grunn av for høy gassutvikling inne i batteriet.

4.3.7 Sikringsmekanismer

For å unngå at batterifeil eller brukerfeil i forbindelse med litium-ionbatterier medfører et sikkerhetsproblem, er celler og batterier ifølge FFI [60] som oftest utstyrt med en eller flere sikringsmekanismer:

- *Sikkerhetsventil:* Dette er ofte bare en svekkelse av batterihus eller lokk som medfører åpning når det innvendige trykket overskrider en viss grense. Ved en riktig konstruert ventil fjernes flyktige komponenter fra cellen før varmeavgivende, kjemiske reaksjoner kan finne sted. En ventilerer er ikke ønskelig, ettersom gassene er både korrosive og giftige, men er å foretrekke fremfor en eksplosjon som har et langt større skadepotensiale [63]
- *Trykkbryter:* Dette er en mekanisk sikring som bryter strømmen dersom innvendig trykk overskrider en viss grense.
- *Sikringer:* Vanlig smeltesikring som brytes dersom strømmen overskrider en satt grense. Polymersikring som brytes når motstanden øker kraftig, noe som

medfører temperaturstigning over en viss maksimumstemperatur (vanlig maksimumstemperatur er 93 °C).

- *Shunt diode*: Noen celletyper har den egenskapen at de kan eksplodere dersom de overutlades, som for eksempel når batteripolene feilkobles slik at celledspenningen reverseres. For å hindre dette, settes en diode i parallell med cellen. Dioden begrenser da reversspenningen til ca. 0,3 V.
- *Serie diode*: Noen primærceller (engangs batterier) har den egenskapen at de kan eksplodere dersom de lades. For å hindre dette, monteres en diode i serie med cellen. I en seriekobling er det tilstrekkelig med bare en diode i strengen.
- *Elektronisk cellebeskyttelse*: De fleste ladbare litium-ionbatterier kan ødelegges dersom de overutlades (typisk under 2,5 V) eller lades opp over en viss spenning (typisk over 4,3 V). For å hindre dette, kan man legge elektronikk inn i cellene for å hindre overladning (som også kan lede til brann), overutladning og overstrøm (kortslutning), som i enkelte tilfeller kan resultere i brann.
- *Separator*: En «shut-down»-separator har den egenskapen at porene i separatoren lukkes over en viss temperatur, noe som medfører at cellens indre motstand stiger kraftig.

Batterier er underlagt EUs produktsikkerhetsdirektiv, som gir generelle krav til sikkerhet for forbrukerprodukter av ulike slag [64]. Hensikten med direktivet er at alle forbrukerprodukter på markedet innenfor EU og EØS skal være sikre. Den norske produktkontrollloven er hjemlet i produktsikkerhetsdirektivet [65]. Loven stiller blant annet krav til aktsomhet for alle som produserer, innfører, omsetter, bruker, eller på annen måte behandler produkter som kan ha betydning for forbrukeres sikkerhet. §3 b gir kriterier for vurdering av sikkerheten ved forbrukerprodukter og forbrukertjenester. Forbrukerprodukter anses å være sikre når de er i overensstemmelse med nasjonal standard som oppfyller kravene i harmonisert standard. Dersom harmonisert standard ikke foreligger, eller der denne ikke er dekkende for det aktuelle produktet, skal produktets sikkerhet vurderes ved særlig å ta hensyn til nasjonale standarder, retningslinjer fra EU-kommisjonen, regler for god praksis for produktsikkerhet som gjelder på det aktuelle området, det gjeldende tekniske utviklingsnivå og det sikkerhetsnivå som med rimelighet kan forventes av brukeren.

Standardene UL1642 og IEC 62133 [66] og IEC 60086-4 [67] og -5 [68] er standarder for sikringsmekanismer og krav til batteribeholder for henholdsvis alkalibatterier og andre ikke-syreholdige batterier, litium-ionbatterier og batterier med vannbasert elektrolytt. Innholdet i de tre sistnevnte er oppsummert nedenfor.

IEC 62133 er en standard som definerer test- og akseptkriterier for sikkerhet ved bruk av oppladbare, alkaliske batterier, eller andre batterier uten syrebasert elektrolytt. Standarden sier at batterier innenfor denne kategorien skal designes på en slik måte at de ikke bare er sikre under korrekt bruk, men også under sannsynlige former for feilbruk. Med at batteriene skal være sikre, menes det at de ikke skal begynne å brenne, eksplodere, lekke elektrolytt, slippe ut gasser, avgi høye temperaturer eller revne. Dette setter krav til batteriets oppbygging.

For å dokumentere at batteriene oppfyller dette kravet, er det en rekke tester batteriene må gjennomgå. Standarden deler testene inn i to grupper: tester som belyser batteriets sikkerhet ved korrekt bruk, og ved sannsynlig feilbruk.

Tester som belyser sikkerheten ved korrekt bruk er:

- Kontinuerlig lading med lav spenning
- Vibrasjon
- Batterihusets integritet ved langtids varmepåvirkning
- Temperaturvariasjoner

Tester som belyser sikkerheten ved sannsynlige former for feilbruk er:

- Feilinstallasjon av batteriet
- Ekstern kortslutning
- Fritt fall
- Mekanisk støt
- Høye temperaturer
- Knusing av battericeller
- Lavt, eksternt lufttrykk
- Overlading
- Tvungen utlading

For de fleste testene er akseptkriteriet at batteriet ikke skal begynne å brenne eller eksplodere. I noen tester er det også et krav om at batteriet ikke skal lekke. For testen hvor batterihuset blir utsatt for langtids varmepåvirkning, er kravet at en eventuell deformering av batterihuset ikke skal eksponere noen av battericellene.

IEC 60086-4 er en standard som definerer test- og akseptkriterier for sikkerhet ved bruk av engangs litiumbatterier. Det påpekes at det finnes ulike typer litiumbatterier, noe som påvirker batterienes sikkerhet. Alle litiumbatterier må imidlertid ha sikkerhetsfunksjoner som hindrer stor temperaturøkning og intern trykkoppbygging som kan føre til at batteriet revner. Også denne standarden deler tester inn i de samme kategoriene som overnevnte standard: tester som belyser batteriets sikkerhet ved korrekt bruk, og ved sannsynlig feilbruk.

Tester som belyser sikkerheten ved korrekt bruk er:

- Lavt, eksternt trykk (simulering av flytransport)
- Temperaturvariasjoner
- Vibrasjon
- Mekanisk støt

Akseptkriteriet for disse testene er at batteriet ikke skal lekke, slippe ut gasser, kortslutte, revne, eksplodere eller begynne å brenne under testene.

Tester som belyser sikkerheten ved sannsynlige former for feilbruk er:

- Ekstern kortslutning
- Mekanisk støt
- Knusing av battericeller
- Unormal lading (reversert spenning)
- Overutlading
- Tvungen utlading
- Fritt fall
- Høye temperaturer
- Feilinstallasjon av batteriet

For disse testene er det ulike akseptkriterier. Oppsummert går akseptkriteriene ut på at det ikke skal forekomme høye temperaturstigninger i batteriet, det skal ikke revne, slippe ut gasser, eksplodere eller å begynne å brenne i et gitt tidsrom etter testen.

IEC 60086-5 er en standard som definerer test- og akseptkriterier for sikkerhet ved bruk av engangsbatterier med vannbasert elektrolytt. Også denne standarden deler tester inn i de samme kategoriene som overnevnte standard: tester som belyser batteriets sikkerhet ved korrekt bruk, og ved sannsynlig feilbruk.

Tester som belyser sikkerheten ved korrekt bruk er:

- Lagring av batteri som er delvis utladet
- Mekanisk støt ved transport
- Vibrasjon under transport
- Temperaturvariasjoner

Akseptkriteriet for disse testene er at batteriet ikke skal lekke (gjelder ikke for sistnevnte test), eksplodere eller begynne å brenne under testene.

Tester som belyser sikkerheten ved sannsynlige former for feilbruk er:

- Feilinstallasjon av batteriet
- Ekstern kortslutning
- Overutlading
- Fritt fall

Akseptkriteriet for disse testene er at batteriet ikke eksplodere eller begynne å brenne under testene.

4.4 Oppsummering

I dette avsnittet oppsummeres det hvorvidt vi har greid å besvare spørsmålene som ble stilt i kapittel 4.1.

Spørsmål 1:

Hvorfor oppstår branner i batterier?

Resultater:

I kapittel 4 er det blitt redegjort for ulike mekanismer som kan føre til brann i batterier.

Spørsmål 2:

Hvilke spor finnes i batteriet etter en brann, og kan man se hva som er primærskader og sekundærskader?

Resultater:

Når det gjelder hvilke spor som finnes i batterier etter en brann, og om man kan skille mellom primær- og sekundærskader basert på visuelle spor, er det ikke funnet noen litteratur. Dette bør undersøkes i videre forskning.

Spørsmål 3:

Hvorfor oppstår utblåsning av batteriet, og hvilke spor etterlater dette?

Resultater:

Det er funnet og gjengitt litteratur som beskriver hvilke mekanismer som fører til utblåsning av batterier. Det er også gitt beskrivelse av hvilke visuelle spor som kan finnes på en battericelle som har hatt utblåsning.

Spørsmål 4:

Hva sier standarder og evt. regelverk om interne sikringsmekanismer i batterier?

Det er oppsummert hva regelverk og tre ulike standarder sier om batterisikkerhet med tanke på brann.

5 Innspill fra politidistriktene om tema man bør se nærmere på

I forbindelse med denne studien ble det sendt ut en forespørsel til politidistriktene for å kartlegge hvilke brannetterforskningsrelaterte tema de føler de mangler kunnskap om. Mange av innspillene vi fikk spriket, med det var likevel enkelte tema som gikk igjen. I tillegg til temaene og spørsmålene som er behandlet tidligere i rapporten, var det et ønske om å se nærmere på selvantennelse som fenomen, og hvilke forutsetninger som må ligge til grunn for at dette skal oppstå.

5.1 Selvantennelse

5.1.1 Generelt

Det finnes eksempler på at enkelte brennbare materialer kan begynne å brenne uten vesentlig tilførsel av varme eller gnister utenfra. Dette går under betegnelsen *selvantennelse*. Dette skyldes at materialet i seg selv, for eksempel på grunn av en kjemisk eller biologisk prosess, utvikler varme, og varmen akkumuleres i materialet til antennelsestemperaturen nås. Denne formen for antennelse skjer når stoffer reagerer med luft og eventuelt fuktighet i luften, samt i noen tilfeller i forbindelse med bakterier.

I DSBs brannstatistikk er selvantennelse inndelt i følgende underårsaker [69]:

- **Biologisk årsak**
Dette er en varmetvikling som skriver seg fra bakterier. Den er alltid avhengig av fuktighet. Et eksempel er høy som er berget inn i regnvær. Er fuktigheten i høyet over 20 %, vil det foregå en «pusteprosess» i høyet, som fører temperaturen over 30 °C. Her overtar bakteriene. De kan videre øke temperaturen helt opp mot 60 °C.
- **Fysisk årsak**
Eksempler:
 - Pyrofortrevirke, det vil si tre som gjennom oppvarming over lang tid er blitt tørt, sprøtt, porøst, oksygenrikt og dermed meget lett antennelig; også tilsvarende opptak av oksygen i trekull eller steinkull.
 - Ikke avkjølte trefiberplater som legges i stabler rett fra produksjonen.
- **Kjemisk årsak**
Eksempler:
 - Oksidasjon i tørrede oljer eller fett som er sugd opp i tekstiler, sagflis eller lignende.
 - Karbid, kalsium brent, ulesket kalk eller lignende som kommer i direkte kontakt med vann.
 - Natrium, kalium, gult fosfor eller lignende som kommer i kontakt med luft.
 - Slipestøv fra golv som er lakkert med linolje.

Selvantennelse (engelsk: «spontaneous combustion») er ifølge DOE Handbook [70] antennelse av et brennbart materiale forårsaket av akkumulering av varme, som følge av oksidasjonsreaksjoner. DOE har en alternativ og videre inndeling av fenomenet selvantennelse.

Branner som forårsakes av selvantennelse skyldes følgende mekanismer:

- Selvoppvarming
- «Pyroforisitet»
- Hypergoliske reaksjoner

Spontan oppvarming er en langsom oksidasjon av et materiale som medfører at temperaturen til materialet øker, uten noe ytre varmetilførsel. Dette skjer med oksidering av hydrokarboner, som for eksempel tørrede oljer, kull og enkelte løsningsmidler.

Pyroforisitet («pyrophoricity») er stoffer som antenner spontant ved eksponering for luft. Selv om det eksisterer pyrofore væsker og gasser, er de fleste pyrofore materialer metaller.

En *hypergolisk reaksjon* beskriver et materiales evne til å antenne eller eksplodere ved kontakt med luft eller vann, slik som hvitt fosfor. Slike materialer og oksidasjonsmiddelet må oppbevares hver for seg, fordi de reagerer spontant når de kommer i kontakt. Hypergolisk drivstoff benyttes for eksempel i romfartøyer.

For branner i bygninger vil selvantennelse som skyldes relativt langsom selvoppvarming, være den eneste formen for selvantennelse som er aktuell. I dette kapittelet vil vi heretter kun omtale denne formen for selvantennelse. Selv om det i enkelte tilfeller er nødvendig med fysiske eller biologiske prosesser i starten (opptil 70-90 °C), er det alltid oksidasjonen av materialet som forårsaker den selvakselererende varmeutviklingen («thermal runaway»), som til slutt fører til selvantennelse og brann.

5.1.2 Hyppigheten av selvantennelse i Norge

Av alle norske bygningsbranner som ble etterforsket av politiet for å stadfeste brannårsaken og som blir rapportert inn til DSB, skyldes 3-4 % selvantennelse. Tabell 5.1 viser totalt antall branner i 2007 og 2008 som skyldes selvantennelse, og hvordan disse brannene fordeles på de tre forannevnte prosessene som forårsaker selvantennelse [71].

Tabell 5-1: Prosentandelen av bygningsbrannene i Norge i 2007 og 2008 som skyldtes selvantennelse totalt, fordelt på de tre prosessene som kan forårsake selvantennelse (DSB [71]).

Prosess som forårsaker selvantennelse	2007		2008	
	Antall tilfeller	I % av alle bygningsbranner	Antall tilfeller	I % av alle bygningsbranner
Biologisk årsak	4	0,22	6	0,33
Fysisk årsak	16	0,87	15	0,83
Kjemisk årsak	21	1,14	29	1,60
Annet	17	0,93	21	1,16
Sum:	58	3,16	61	3,92

Av tabellen fremgår det at det er ca. 60 branner bygninger i Norge som skyldes selvantennelse, og det er de kjemiske prosessene alene som forårsaker de fleste brannene av denne typen. SP Fire Research (den gang SINTEF NBL) har tidligere gjennomgått tilfellene med selvantennelse i DSBs brannstatistikk [72]. Her ble det funnet at det var mange misforståelser og hyppig feilkategorisering av underårsakene for selvantennelse. Dette skyldes trolig manglende forståelse av fenomenene som forårsaker selvantennelse.

Som det vil bli nærmere gjennomgått i neste avsnitt, er branner som har selvantennelse som årsak, nesten alltid branner som starter i inne i *porøse materialer*, som samtidig har relativt store volum. Så lenge brannen foregår dypt inne i materialet, vil lufttilgangen være svært begrenset. Brannen foregår da som en ulmebrann uten flammer. Når ulmebrannen etter hvert får økt tilgang til oksygen, kan brannen da gå over til en fullt utviklet flammebrann. Det opprinnelige materialet på arnestedet for ulmebrannen vil som regel være mer eller mindre konsumert av ulmebrannen og den etterfølgende flammebrannen. Det kan i slike tilfeller være svært vanskelig å finne arnestedet og forstå brannårsaken. Det er derfor grunn til å anta mange av brannene som skyldes selvantennelse, ikke blir oppdaget. Dermed kan andelen av brannene som skyldes selvantennelse sannsynligvis være vesentlig større enn de 3-4 prosentene angitt i Tabell 5.1.

5.1.3 Nødvendige betingelser for selvantennelse

Følgende fem faktorer må være tilstede for at denne formen for selvantennelse i et brennbart materiale skal finne sted [72]:

1. Det må finne sted en oksidasjonsprosess inne i materialet, som utvikler varme.
2. Det selvantennelige materialet må ha en viss minimumstemperatur for at oksidasjonen og varmeutviklingen skal være tilstrekkelig effektiv. Enkelte materialer (for eksempel celluloseprodukter) må ha en temperatur på 70-100 °C for at oksidasjonen skal bli tilstrekkelig effektiv. De biologiske og fysiske prosessene er i enkelte tilfeller en betingelse for å oppnå denne temperaturen. Når denne temperaturen er oppnådd, tar oksidasjonen over og bringer temperaturen opp til antennelsestemperaturen.
3. Det selvantennelige materialet må være relativt finfordelt og porøst. Materialer i form av pulver, fiber, strå etc. er ideelle materialer for selvantennelse. Siden selvantennelse skyldes en oksidasjonsprosess som foregår på overflaten av materialet, er det viktig at overflaten (kontaktflate for oksidering) av materialet er størst mulig i forhold til volumet av materialet. Porøse materialer har stor overflate i forhold til volumet. Oksidasjonen og dermed varmeutviklingen i materialet er tilnærmet proporsjonal med overflatearealet av materialet.
4. Materialet må være isolerende og ha lav varmeledningsevne. Siden varmen som utvikles ved oksidasjon av materialet er temmelig beskjeden i forhold til varmeutviklingen i en brann, må det være gode isolerende forhold, slik at den utviklede varmen akkumuleres og materialet bringes til antennelsestemperaturen. Varmeutviklingen må hele tiden være større enn varmetapet. Når varmen akkumuleres, økes temperaturen, og dermed også varmetapet fra materialet. For at varmeisoleringen skal være tilstrekkelig god, er det som regel nødvendig med relativt store volum av materialet for at selvantennelse skal finne sted. Nødvendig volum avtar med økende omgivelsestemperatur.
5. Ventilasjonen må være svært begrenset. For at en oksidasjonsprosess skal finne sted, må det være en viss lufttilførsel, men den må være svært begrenset, for at ikke ventilasjonsvarmetapet skal bli for stort.

Som det fremgår av de fem punktene over, må mange hårfine betingelser være oppfylt for at selvantennelse skal finne sted. Det skjer sannsynligvis hyppig oksidasjonsprosesser i naturen og i bygninger (kompostbinger, søppelbeholdere etc.), hvor det skjer selvoppvarming, men som flater ut etter en stund, på grunn av at varmetapet fra materialet ved et tidspunkt blir større enn varmeproduksjonen.

Det skjer altså en form for selvoppvarming i materialet. I starten er denne selvoppvarmingen temmelig beskjeden. En tommelfingerregel sier at oksidasjonen og varmeutviklingen fordobles for hver 10 °C temperaturen i materialet øker. Ved et tidspunkt så oppstår det en selvakselererende overoppheting («thermal runaway») i materialet, og som til slutt fører til fullt utviklet flammembrann i materialet. Det skjer som ofte samtidig med at lufttilførselen blir dramatisk forbedret, ved for eksempel at ulmebrannen når overflaten av materialet. Tiden det tar for selvantennelse i materialet finner sted, kan være svært lang (flere timer, dager, uker og til og med flere år), men dette kan også skje i løpet av noen få timer, avhengig av det selvantennelige materialet og omgivelsene.

5.1.4 Ekstern antennelse versus selvantennelse

Babrauskas [53] understreker at selvantennelse er en fundamentalt forskjellig prosess i forhold til vanlig antennelse, som skjer som følge av at en ekstern varmekilde tilføres materialet. En vanlig antenneseprosess skjer på grunn av oksidasjonsreaksjoner i *gassfasen* mellom oksygen og avdampet brensel (pyrolysegasser). Når det oppstår selvoppvarming og ulmebrann i et materiale, skjer oksidasjonen på den innvendige overflaten av materialet. Det er dermed ingen sammenheng mellom hvor lettantennelig et materiale er, og tilbøyelighet til selvantennelse.

Et eksempel på dette er linolje og bensin. Linolje har et flammepunkt i området 224-334 °C, og spontanantennelsestemperatur i området 415-438 °C, mens bensin har flammepunkt på -40 til -45 °C, og en spontanantennelsestemperatur i området 280-456 °C, avhengig av om det er sommer- eller vinterbensin. Linolje må altså varmes opp til ca. 230 °C for at det skal gi tilstrekkelig avdamping, slik at materialet kan antennes. Dette er med andre ord en svært tungt antennelig væske i forhold til bensin. Bensin kan for eksempel antennes på grunn av en gnist forårsaket av statisk elektrisitet (jfr. avsnitt 3.6.3), men bensin kan derimot *ikke* forårsake selvantennelse, slik som linolje er kjent for å kunne gjøre.

5.1.5 Materialer som er i stand til å forårsake selvantennelse

Eksempler på materialer som under visse betingelser har relativt høy tilbøyelighet til selvantennelse [73]:

- Vegetabilske oljeprodukter (olivenolje, soyaolje etc.)
- Tørrede oljer (linolje, teakolje, visse treoljer), malings- og lakkprodukter
- Fiskeolje, fiskemel
- Kornprodukter (i store mengder eller volum)
- Høy (noe fuktig)
- Pyrofort tre
- Metaller i finfordel form (magnesium, titan, kalsium, sink, aluminium etc. De fleste selvantennelige materialer er metaller.)
- Oljetøy
- Filler med tørrede oljer

- Klær, tøy, håndklær som blir tatt ut av tørketrommelen for tidlig og lagt i en stor haug (fuktige og varme).
- Hageavfall
- Sjøppel
- Trepellets
- Slipestøv fra golv lakkert med treolje m.m.

5.1.6 Pyrofort tre («selvantennelig tre»)

Rundt 1900 ble det ifølge Babrauskas [74] rapportert om mange branner i forbindelse med damp- eller varmtvannsrør, som var ført gjennom bygningsdeler av tre. Antennelse ble observert fra tre måneder opptil flere år etter installasjonen av rørsystemene. Disse rørsystemene besto av varmtvannsrør eller lavtrykks dampør, med temperaturer ikke særlig høyere enn 100 °C.

Det ble konkludert med at brannene i forbindelse med varmtvannsrørene sannsynligvis skyldtes langvarig påkjenning av treet ved relativt lav temperatur, forårsaket av varmtvannsrørene. Basert på teorier som tidligere hadde blitt fremsatt av Schwartz [75] vedrørende selvantennelse av høy, ble det hevdet at langvarig og lavtemperatur påkjenning av tre medførte omdannelse av treet til såkalt *pyrofort tre*.

Pyrofort tre er tre som er blitt termisk nedbrutt over lang tid (fra flere måneder til flere år), spesielt ved gode varmeisolerende forhold, fattig på oksygen. Slikt trevirke kan bli reaktivt og lett antennelig. Tre som er blitt sprøtt og tørt, vil bli porøst med stor overflate i forhold til volumet. Dette sikrer effektiv oksidering og kan føre til ulmebrann på overflaten av treet, noe som kan medføre at temperaturen stiger lokalt. Ulmebrannen kan gå over til flammebrann, dersom tilstrekkelig mengde luft blir tilført trevirket [74].

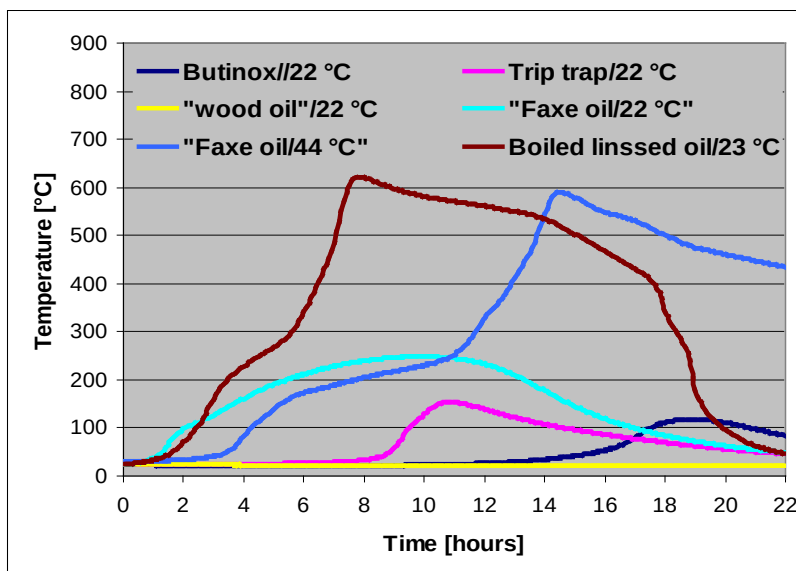
5.1.7 Treolje

I 2005 gjennomførte SP Fire Research et prosjekt der tilbøyeligheten til selvoppvarming og selvantennelse for åtte forskjellige treoljeprodukter (inklusive en olje beregnet for antirustbehandling) ble undersøkt [72]. Ifølge vår analyse av DSBs brannstatistikk, er mange boligbranner forårsaket av filler våte av treolje, som blir kastet i søppelbeholdere, sammen med annet brennbart avfall. I forsøkene ble en fille dynket med treolje pakket inn i mineralull (se bilder av forsøkene i dette avsnittet). Mineralullen ble brukt for å simulere isolerende søppel i en søppelbeholder, hvor en fille med treolje kan bli kastet etter bruk, sammen med mye annet godt isolerende avfall.

Treoljer består vanligvis av tørrede olje og et løsningsmiddel. Før de tørrede oljene kan begynne å oksidere og forårsake selvoppvarming, må oljen fordampes. Denne fordampningsprosessen tar vanligvis noe tid. Derfor kan det ta 20-25 timer før maksimal temperatur blir oppnådd. Forsøkestiden for de 33 forsøkene varierte fra vel 17 timer til over 121 timer .

Figur 5.2 viser resultatene fra forsøk med 6 forskjellige treoljer i testoppsettet beskrevet foran. To av forsøkene resulterte i selvantennelse av fillene etter grovt anslått ca.7 og 14 timer. De andre oljene medførte ingen selvantennelse, kun selvoppvarming til maksimalt 250 °C, før temperaturen flatet ut og deretter avtok til omgivelsestemperaturen. Figur 5.3 viser oppsettet både før og etter forsøket ved 44 °C starttemperatur i fillene.

De to forsøkene som ga selvantennelse viser tydelig betydningen av omgivelsestemperaturen i to ellers like forsøk. Ved å doble starttemperaturen fra 22 til 44 °C, oppnådde man at treoljen selvantente.



Figur 5.1: Resultatene fra 6 forsøk med forskjellige treoljer i det beskrevne testoppsettet (300 ml olje i 3 m² bomullsfille). Teksten over kurvene angir oljetype/og starttemperaturen i fillene hvor mattene ble plassert [72].



a) 3 x 1 m² bomullsfiller dynket med 300 ml treolje ble plassert i hulrommet.



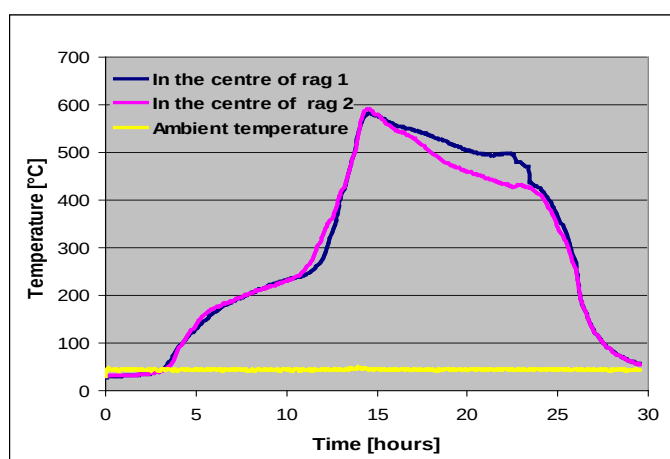
b) Testoppsettet etter den 30 timer lange testen.



c) Brannskadene i Rockwool-matten.



d) Rester av bomullsfillene etter forsøket.



e) Temperaturutviklingen i løpet av testen

Figur 5.2: Forsøk med 3 x 100 ml treolje jevnt dynket i 3 x 1 m² bomullsfiller med 49 °C omgivelsestemperatur og 44 °C starttemperatur i fillene [72].

6 Videre arbeid

6.1 Hva fant vi ikke svar på i forskningslitteraturen

Følgende spørsmål fant vi ikke tilfredsstillende svar på i forskningslitteraturen:

- *Bruk av brennbar væske, tennbriketter og stearinlys ved ildspåsettelse. Hvor lang tid tar det lang tid tar det før spor etter slike hjelpemidler ikke lar seg identifisere?*

Som vi allerede har nevnt så er ikke dette spørsmålet mulig å svare på, siden muligheten av å påvise slike hjelpemidler er avhengig også av mange andre faktorer. Det kan imidlertid være interessant å studere sporene etter bruk av tennbriketter og stearinlys, avhengig av forskjellige parametere, slik som sekundærbrannens intensitet og varighet, type underlag, tidsforsinkelsen for prøvetakingen etc.

- *Hva må til for at en varm partikkel (størrelse, temperatur) skal antenne olje- og spritbaserte væsker?*

Til tross for at vi fant litteratur som konkluderer at temperaturen på en varm partikkel eller overflate må være vesentlig høyere enn spontanantennelsestemperaturen for å få antent brennbare væsker, så er det fortsatt mange ubesvarte spørsmål vedrørende dette. Som for eksempel hvorfor det er vanskelig å få antent bensin med en tent sigarett, når nødvendig energi trolig er mindre enn 1 mJ (jf. Figur 3.4 på side 43).

- *Finnes det publisert dokumentasjon av metode for stadfesting av brennbare væsker ved hjelp av UV-lys og kamera?*

Vi har ikke lyktes i å finne publisert litteratur som dokumenterer en slik metode.

- *Hvilke spor finnes i batteriet etter en brann, og kan man se hva som er primærskader og sekundærskader?*

Vi har ikke funnet noen publikasjoner som gir svar på hvordan man kan skille primærskader fra sekundærskader, hverken i forskningslitteratur eller generelt søk via internett.

6.2 Forslag til videre arbeid

På grunnlag av denne kartleggingen av status for kunnskap innen de aktuelle tema, foreslår vi at man ser nærmere på følgende tema, ikke i prioritert rekkefølge:

1. Bestemmelse av visuelle og kjemiske spor etter bruk av tennbriketter og stearinlys ved ildspåsettelse.
2. Betingelsene (temperatur, størrelse, geometri, energiinnhold etc.) for at en varm partikkel (størrelse, temperatur), sigarett o.l. skal antenne faste materialer (eksempelvis trevirke), og olje- og spritbaserte væsker.
3. Bestemmelse av forskjellen mellom spor etter primær og sekundær brann i batterier.

6.2.1 Spor etter bruk av tennbriketter og stearinlys

Det kan gjennomføres en forsøksserie lik den som ble gjennomført i forbindelse med spor etter brennbar væske i avsnitt 2.6, for å studere bl.a. følgende fenomener:

- Muligheten av å bestemme visuelle og kjemiske spor som stearinlys og tennbriketter etterlater seg i et brannrom, avhengig av:
 - o Sekundærbrannens intensitet, brannpåvirkning og varighet
 - o Andre materialer som kan forårsake forstyrrelser i den kjemiske analysen
 - o Typen underlag (golvbelegg, møbler etc.)
 - o Bruk av slukkevann
 - o Tidsforsinkelsen for prøvetakingen
 - o Type og mengde stearinlys og tennbriketter
 - o Ventilasjon

Lignende forsøk kan også gjøres med andre utradisjonelle typer brennbar væske som man har mistanke om kan brukes i forbindelse med brannstiftelse, slik som for eksempel papir dynket med vegetabiliske eller animalske oljer, maling, lakk etc.

Dette prosjektet vil også inkludere deltagelse fra Kripos sin laboratorieavdeling med hensyn til kjemiske analyser av prøver. Det er også ønskelig med deltagelse fra Kripos i planleggingen av forsøkene, og helt eller delvis i gjennomføringen av forsøkene og tolkning av forsøksresultatene.

6.2.2 Betingelsene for antennelse ved varme partikler

Selv om det ble funnet forskning som viser at nødvendig temperatur til en varm partikkel må være vesentlig høyere enn spontanantennelsestemperaturen til den brennbare væsken, så er det mange ubesvarte spørsmål vedrørende dette. For å få en dypere forståelse av disse betingelsene, foreslår vi følgende aktiviteter i et forskningsprosjekt:

- Gjennomgang og presentasjon av teori vedrørende antennelsesmekanismene for brennbare væsker.
- Eksperimentell studie av betingelsene for antennelse av brennbare væsker ved varme partikler og glør, avhengig av følgende egenskaper til partikkelen:
 - Minimum temperatur og energiinnhold
 - Type gjenstand: varm partikkel, glo, gnist, varm flate, tent sigarett
 - Type brennbar væske (bensin, diesel, etanol, glykol etc.), evt. fast materiale
 - Gjenstandens størrelse
 - Geometri (kule, skive, stift etc.)
 - Væskens temperatur (fra romtemperatur til maksimalt flammepunktet for væsken)
- Lufthastigheten over væskeoverflaten

Tilsvarende kan også betingelsene for antennelse av faste materialer undersøkes. Antennelse av bygningsmaterialer ved varme arbeider, som for eksempel ved arbeid på tak, er et tema der man har behov for mer kunnskap.

6.2.3 Spor etter primær og sekundær brann i batterier

Eksperimentelle forsøk med primær og sekundær antennelse av bærbar PC, verktøy etc. med batteripakke (primært litium-ion batteripakke). Slike forsøk kan gjennomføres for å studere om man kan finne kriterier for å bestemme om brannen skyldes brannstart på grunn av intern feil og overoppheting i batteriet, eller om den skyldes ekstern tilførsel av bar ild, og om batteriet eventuelt er sekundært brannskadet.

Slike forsøk må også inkludere forskjellige grader av sekundære brannskader forårsaket av brannen i brannrommet. Sekundærbrannen kan ødelegge eventuelle spor som kunne ha indikert ildspåsettelse. Forsøksoppsettet benyttet i prosjektet «Bestemmelse av spor på golv etter brennbar væske» vist i avsnitt 2.6 kan benyttes i slike forsøk.

Den brannskadde batteripakken kan studeres avhengig av følgende parametere:

- Brannårsaken (el-feil i batteripakke, tilførsel av bar ild, ekstern brannpåvirkning)
- Den eksterne tennkildens type og intensitet ved tilførsel av bar ild til batteripakken (brennbar væske eller faste materialer)
- Sekundærbrannens intensitet
- Type batteripakke (bærbar PC, batteridrevet verktøy etc.)
- Andre materialer i brannrommet (tekstiler, plastprodukter, møbler, madrass, sengetøy etc.)
- Ventilasjonen

I disse forsøkene vil vi studere hva som skjer med batteripakken i løpet av forsøkene, om det først oppstår brann, utblåsning eller eksplosjon, avhengig av om brannstarten i batteripakken skyldes tilførsel av bar ild, elektriske feil eller om den blir sekundært brannpåvirket. Slike forsøk vil også gi en generelt bedre forståelse av hvordan brannen utvikler seg og de resulterende eksterne og interne brannskadene på batteripakken, avhengig av bl.a. de ovennevnte parametere.

Referanser

- [1] K. Schmidt Pedersen, Ed., *Håndbok i brannetterforskning*, 1st ed. Oslo, Norway: Norsk brannvernforening, 2012.
- [2] J. D. DeHaan, *Kirk's Fire Investigation, The Arson Set*, 6th ed. Upper Saddle River, NJ.: Prentice-Hall, Inc., 2007.
- [3] Loscalzo P.J.; Deforest, P.R. ; Chao, J.M., "Study to Determine The Limit of Detectability of Gasoline Vapor from Simulated Arson Residues," *Journal of Forensic Sciences*, vol. 25, pp. 162–167, 1980.
- [4] Borusiewicz R., Zięba-Palus J., Zadora G, "The influence of the type of accelerant, type of burned material, time of burning and availability of air on the possibility of detection of accelerants traces." *Forensic Science International* 160, 2006.
- [5] Stensaas, J.P., *Bestemmelse av branntekniske spor etter bruk av brennbar væske, SINTEF NBL rapport nr. STF22 A99841*, 1999. 1999.
- [6] Fernandes, M.S., Lau, C.M, and Wong W.C., "The effect of volatile residues in burnt household items on the detection of fire accelerants." Chemical Sciences Section, Forensic Science Division, Government Laboratory, 88 Chung Hau Street, Ho Man Tin. Kowloon, Hong Kong Special Administrative Region, China. Science & Justice., 2002.
- [7] Almirall, J.R., Furton K.G., "Characterization of background and pyrolysis products that may interfere with the forensic analysis of fire debris," *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 71, pp. 51–67, 2004.
- [8] S. Kunkel, "The Limitations and Advantages of Ultraviolet Light Sources in the Detection of Ignitable Liquids at Fire Scenes," presented at the 2006 MAAFS Annual Meeting, 05-May-2006.
- [9] Sandercock, P.M.L, "Fire investigation and ignitable liquid residue analysis – A review: 2001-2007.," pp. 93–110, 2008.
- [10] Baldwin, M.D., "Practical Applications of Hydrocarbon and Photoionization Detection Units in Arson Investigations." Biddeford Police Department Biddeford, Maine, 25-Feb-2015.
- [11] Darrer, M., Jacquemet-Papilloud, J., Delémont, O., "Gasoline on hands: Preliminary study on collection and persistence.," pp. 171–178, 2008.
- [12] Muller, D., Levy, A., Shelef, R., "Detection of gasoline on arson suspects' hands," *Forensic Science International*, vol. 206, no. 1–3, pp. 150–154, Mar. 2011.
- [13] "Kollegiet for brannfaglig terminologi," *Kollegiet for brannfaglig terminologi - Faguttrykk: Flyvebrann*. [Online]. Available: www.kbt.no. [Accessed: 15-May-2014].
- [14] D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics. Third Edition.*, 3rd ed. Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [15] V. Babrauskas, "Ignition of wood: A review of the State of the Art.," *Journal of Fire Protection Engineering*, no. 12, p. 163, 2002.
- [16] V. P. Dowling, "Ignition of timber bridges in bushfires," *Fire safety journal*, vol. 22, no. 2, pp. 145–168, 1994.
- [17] Manzello, SL, Park, S-H, and Cleary, TG, "Investigation on the ability of glowing fire brands deposited within crevices to ignite common building materials," *Fire Safety Journal*, vol. 2009, no. 44, pp. 894–900.
- [18] S. L. Manzello, T. G. Cleary, J. R. Shields, and J. C. Yang, "On ignition of fuel beds by firebrands.," *Fire and Materials*, vol. 30, pp. 77–87, 2006.
- [19] S. L. Manzello, S. Suzuki, and K. Himoto, "Summary of Workshop for Urban and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires: A Workshop to Explore Future Japan/USA Research Collaborations.," National Institute of Standards and Technology, 1128, 2011.

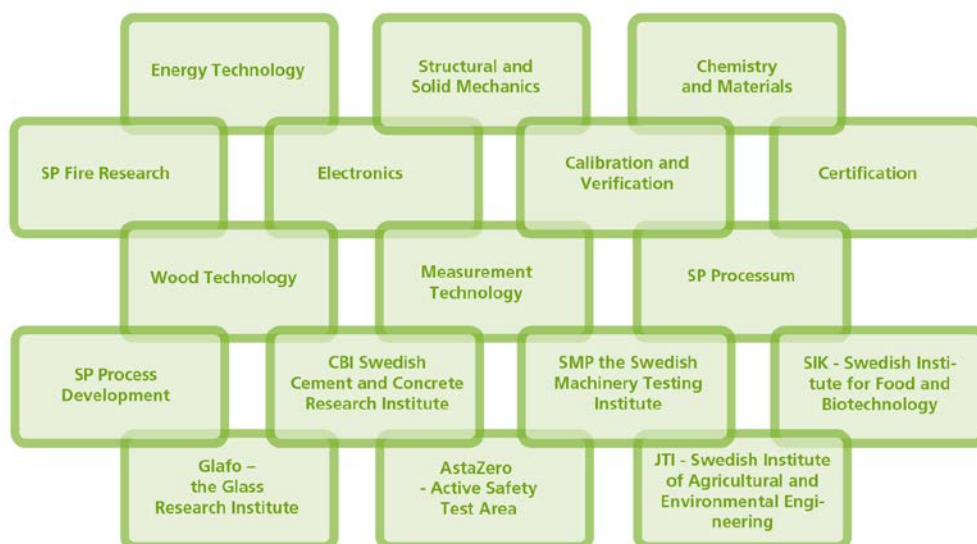
- [20] U. Krause and M. Schmidt, "Propagation of smouldering in dust deposits caused by glowing nests or embedded hot bodies.," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 13, pp. 319–326, 2000.
- [21] S. McAllister, M. Finney, T. Maynard, and I. Grob, "A study of ignition by rifle bullets.," in *Proceedings from Fire and Materials 2015*, San Francisco, USA, 2015, pp. 225–240.
- [22] J. Urban, C. D. Zak, and C. Fernandez-Pello, "Spot fire ignition of natural fuel beds by hot aluminum particles.," in *Proceedings from Fire and Materials 2015*, San Francisco, USA, 2015, pp. 879–888.
- [23] Hall jr., J.R., *The Smoking-Material Fire Problem*. National Fire Protection Association (NFPA). Fire Analysis and Research Division, 2013.
- [24] V. Babrauskas, *Ignition handbook: principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science*. Issaquah, WA: Fire Science Publishers, 2003.
- [25] J. F. Krasny, "Cigarette Ignition of Soft Furnishings - a Literature Review with Commentary," Center for Fire Research, National Bureau of standards, Gaithersburg, USA, 1987.
- [26] M. J. et al Karter, "Cigarette Characteristics, Smoker Characteristics, and the Relationship to Cigarette Fires.," *Fire Technology*, vol. 30, no. 4, 1994.
- [27] M. Laugesen, M. Duncanson, T. Fraser, V. McClellan, B. Linehan, and R. Shirley, "Hand rolling cigarette papers as the reference point for regulating cigarette fire safety," *Tobacco Control*, vol. 12, pp. 406–410, 2003.
- [28] R. G. Gann et al., "The Effect of Cigarette Characteristics on the Ignition of soft Furnishings," Center for Fire Research, National Bureau of standards., Gaithersburg, USA, 1987.
- [29] J. T. Wanna and P. Zelius, "Effect of Cigarette Variables on Ignition Propensity of Various Fabrics.," *Journal of Fire Sciences*, vol. 19, pp. 341–354, 2001.
- [30] R. Holleyhead, "Ignition of solid materials and furniture by lighted cigarettes. A review.," *Science & Justice*, vol. 39, no. 2, pp. 75–102, 1999.
- [31] *Forskrift 1. juli 1999 om antenningelighet av madrasser og stoppede møbler*. 1999.
- [32] Drysdale, "Smouldering Combustion," in *An Introduction to Fire Dynamics, Third Edition*, Chichester, UK.: John Wiley & Sons Ltd, 2011, pp. 331–347.
- [33] B. (ed) Sundström, *Fire Safety of Upholstered Furniture: the final report on the CBUF research programme*. London: Interscience Communications Ltd, 1995.
- [34] Standard Norge, "NS-EN 1021-1:2006 Møbler - Vurdering av antenningeligheten for stoppede møbler - Del 1: Antenning fra ulmende sigarett." Pronorm AS, 2006.
- [35] J. Krasny, W. Parker, and V. Babrauskas, *Fire behavior of upholstered furniture and mattresses*. Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2001.
- [36] F. S. (ed) Kilinc, *Handbook of fire resistant textiles*. Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [37] T. J. Ohlemiller et al., "Quantifying the Ignition Propensity of Cigarettes," *Fire and materials*, vol. 19, no. 4, pp. 155–170, 1995.
- [38] G. H. Damant, "Cigarette Ignition of Upholstered Furniture," *Journal of Fire Sciences*, vol. 13, no. 5, pp. 337–349, 1995.
- [39] R. W. Dwyer et al., "The Effects of Upholstery Fabric Properties on Fabric Ignitabilities by Smoldering Cigarettes.," *Journal of Fire Sciences*, vol. 12, no. 3, pp. 268–283, 1994.
- [40] S. Mehta, "Cigarette Ignition Risk Project.," U.S. Consumer Product Safety Commission, Bethesda, Maryland, USA, 2012.
- [41] L. S. Lewis, M. J. Morton, and V. Norman, "The Effects of Upholstery Fabric Properties on Fabric Ignitabilities by Smoldering Cigarettes. II.," *Journal of Fire Sciences*, vol. 13, no. 6, pp. 445–471, 1995.
- [42] J. T. Wanna, A. Polo, and D. Schettino, "The Smoldering Potential of Used Upholstery Fabrics: Unsoiled vs. Soiled.," *Journal of Fire Sciences*, vol. 14, no. 2, pp. 144–158, 1996.

- [43] J. T. Wana et al., "The Smoldering Potential and Characterization of Used Upholstery Fabrics.," *Journal of Fire Sciences*, vol. 14, no. 5, pp. 379–392.
- [44] Standard Norge, "EN 16156:2010 Cigarettes — Assessment of the ignition propensity — Safety requirement." CEN-CENELEC, Brussels, 01-Feb-2011.
- [45] I. Larsson and A. Bergstrand, "Studie: Självlocknande cigaretter - teori och verklighet," SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP Arbetsrapport 2015:03, 2015.
- [46] Larsson, I., "Självlocknande cigaretter minskar inte antalet bränder," *Brandposten*, vol. 52, 2015.
- [47] J. Lord and J. Geiman, "Cigarette ignition of cellulosic materials with non-fire standards compliant (non-FSC) cigarettes.," in *Proceedings from Fire and Materials 2015*, San Francisco, USA, 2015, pp. 357–369.
- [48] Kanury, A.M., *Ignition og Liquid Fuels*, 1st Edition. Socitey of Fire Protection Engineers and NFPA, 1988.
- [49] ANSI/NFPA, *NFPA 325, Guide for Fire Hazard Properties of Flammable Liquids, Gases and Volatile Solids (Amerikansk nasjonal standard)*, 5.08.1994 ed. ANSI/NFPA.
- [50] Dag Bjerketvedt, Jan Roar Bakke, and Bjerketvedt, D., Bakke, J:R: og Wingerden, K., *Gas Explosion Handbook*. Gexcon AS.
- [51] U. von Pidoll, H. Krämer, and H. Bothe, "Avoidance of Electrostatic Hazards during Refuelling of Motorcars," *Journal of Electrostatics*, vol. 40–41, pp. 523–528, Jun. 1997.
- [52] Babrauskas, V., "Some Basic Facts About Ignition Events During Fueling of Motor Vehicles at Filling Stations," *California Fire/Arson Investigator* 16, 25, Apr. 2005.
- [53] V. Babrauskas, *Ignition handbook: principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science*. Issaquah, WA: Fire Science Publishers, 2003.
- [54] Colwell, J.D. og Reza, A., "Hot surface ignition of automotive and aviation fluids," *Fire Technology*, vol. 41, nr. 2, pp. 104–123, Apr. 2005.
- [55] Zakharevicha, A.V., Osotova, D.S., "The experimental investigation of the ignition petrol mechanism at high temperature metal single particles." National Research Tomsk Polytechnic University, 634050 Tomsk, Russia, 2915, 2015.
- [56] Ungut, A., James, H., "Autoignition of gaseous fuel-air mixtures near a hot surface," .
- [57] AA1Car, "Battery safety & jump starting." [Online]. Available: http://www.aa1car.com/library/battery_safety.htm.
- [58] "Injuries Associated with Hazards Involving Motor Vehicle Batteries," U.S. Department of Transportation's National Highway Traffic Safety Administration, Research Note, Jul. 1997.
- [59] Mikolajczak, C., Kahn M., M, White, K., Long, T.R., "Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment," The Fire Protection Research Foundation, Jul. 2011.
- [60] Ø. Hasvold, "Sikker anvendelse av litiumbatterier," Forsvarets forskningsinstitutt (FFI), FFI-rapport 2010/00215, Jan. 2010.
- [61] Q. Wang, P. Ping, and Z. Xuejuan, "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery," *Journal of Power Sources*, vol. 208, pp. 210 – 224, 2012.
- [62] D. Nystedt, "Acer Recalls 27,000 Laptop PC Batteries," *PCWorld*. [Online]. Available: <http://www.pcworld.com/article/131232/article.html>.
- [63] Forseth, S., Johannessen, T.C. og Hasvold, Ø., "Oppvarming av litium- og litiumionceller," FFI - FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT Norwegian Defence Research Establishment Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge, FFI/RAPPORT-2006/02358, Sep. 2006.
- [64] *DIRECTIVE 2001/95/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 3 December 2001 on general product safety (Text with EEA relevance)*. 2002.
- [65] *Lov om kontroll med produkter og forbrukertjenester (produktkontrollloven)*. 2015.

- [66] "EN 62133 Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications (IEC 62133:2012)." CEN-CENELEC, Brussels, Mar-2013.
- [67] "EN 60086-4 Primary batteries - Part 4: Safety of lithium batteries (IEC 60086-4:2014)." CEN-CENELEC, Brussels, Jan-2015.
- [68] "EN 60086-5 Primary batteries - Part 5: Safety of batteries with aqueous electrolyte (IEC 60086-5:2011)." CEN-CENELEC, Brussels, Apr-2011.
- [69] Agerup, N.H., "Bakgrunn for punktene i skjemaet (dsbs brannårsaksinnndelingen)," 16-Aug-2005.
- [70] DOE, *DOE HANDBOOK Primer on spontaneous heating and pyrophoricity*. U.S. Department of Energy (DOE), Washington, D.C. 20585, 1994.
- [71] "Brannårsaksstatistikk 2008," Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, Tønsberg, 2009.
- [72] J. P. Stensaas, "An Experimental Study of the Self-ignition Tendency of Different Wood Coating Oil Products," ISBN 8214024536, NBL A05145, 2005.
- [73] A. E. Cote and National Fire Protection Association, *Fire Protection Handbook*. National Fire Protection Assn, 2008.
- [74] V. Babrauskas, "Pyrophoric Carbon and Long-term, Low-temperature Ignition of Wood," *Fire and Arson Investigator*, vol. 51, no. 2, 2001.
- [75] Schwartz, E., *Fire and explosion risks (oversatt fra tysk til engelsk)*. Charles Graffin & Co., London, 1992.

SP Technical Research Institute of Sweden

Our work is concentrated on innovation and the development of value-adding technology. Using Sweden's most extensive and advanced resources for technical evaluation, measurement technology, research and development, we make an important contribution to the competitiveness and sustainable development of industry. Research is carried out in close conjunction with universities and institutes of technology, to the benefit of a customer base of about 10000 organisations, ranging from start-up companies developing new technologies or new ideas to international groups.



SP Fire Research AS

Postboks 4767 Sluppen, 7465 Trondheim

Telefon: 464 18 000

E-post: post@spfr.no, Internett: www.spfr.no

www.spfr.no

SPFR-rapport A15 20116:1

ISBN

For mer informasjon om publikasjoner utgitt av SP: www.sp.se/publ