



European Train the Trainer Program for Responders

Leksjon 8

Antenneskilder og forebygging av antennelse

NIVÅ I

Brannkonstabel

Informasjonen i denne leksjonen er tilegnet **brannkonstabler (og tilsvarende)**.

Dette emnet er også tilgjengelig på nivå III & IV.

Denne leksjonen er en del av et opplæringsmaterieell med noe materieell på nivåene I–IV: Brannkonstabel, utrykningsleder, innsatsleder og spesialist. Les introduksjonen til leksjonen for forventet forkunnskap og læringsutbytte

Merk: Dette materieellet tilhører HyResponder Consortium og skal krediteres deretter, resultatene fra HyResponse har blitt brukt som grunnlag



Ansvarsfraskrivelse

Til tross for at dette dokumentet er nøye utarbeidet, gjelder følgende ansvarsfraskrivelse: Informasjonen i dette dokumentet er gitt som den er, og det gis ingen garanti om at informasjonen er egnet for et bestemt formål. Brukeren tar i bruk informasjonen på egen risiko og ansvar.

Dokumentet gjenspeiler bare forfatternes syn. FCH JU og EU er ikke ansvarlig for bruk av informasjonen i det.

Takk

Prosjektet har fått finansiering fra Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) (now Clean Hydrogen Partnership) under bevilgningsavtale nr. 875089. JU mottar støtte fra EUs forsknings- og innovasjonsprogram Horizon 2020 samt fra Storbritannia, Frankrike, Østerrike, Belgia, Spania, Tyskland, Italia, Tsjekkia, Sveits og Norge.



Sammendrag

Hydrogen antennes lett fordi det har den laveste minste antennelsesenergi (MIE) blant kjente drivstoff. Det er ofte vanskelig å fastslå den eksakte kilden til hydrogenantennelse og å fastslå dens spesifikke mekanisme. Denne leksjonen gir en oversikt over hydrogenantenneshendelser og -mekanismer.

Nøkkelord

Minste antennelsesenergi (MIE), selvantennelsestemperatur, antennelseskilder, antennelsesmekanismer

Innhold

Sammendrag.....	3
Nøkkelord	3
1. Målgruppe.....	5
1.1 Rollebeskrivelse: Brannkonstabel	5
1.2 Kompetansenivå: Brannkonstabel.....	5
1.3 Tidligere opplæring: Brannkonstabel.....	5
2. Innledning og mål.....	6
3. Antennelseskilder	7
3.1 Antennelse ved elektrostatisk utladning.....	8
3.2 Mekanisk tenning	8
3.3 Antennelse via en varm overflate.....	9
4. Hydrogenantennelsesmekanismer	10
4.1 Minste antennelsesenergi (MIE)	11
4.2 Selvantennelsestemperatur	13
4.3 Diffusjonsantennelse	13
5. Spontan antennelse av plutselige utslipp.....	15
5.1 Diffusjonsantennelsesmekanisme	15
6. Forebygging av hydrogenantennelse	16
6.1 Kontroll av termiske og mekaniske antennelseskilder.....	17
Referanser	18

1. Målgruppe

Informasjonen i denne leksjonen er rettet mot NIVÅ 1: brannkonstabel Leksjoner er også tilgjengelige på nivå II, III og IV: utrykningsleder, innsatsleder og spesialist .

Rollebeskrivelser, kompetansenivå og læringsutbytter for brannkonstabel er beskrevet nedenfor.

1.1 Rollebeskrivelse: Brannkonstabel

En brannkonstabel er ansvarlig for og kompetent til å utføre oppgaver sikkert, iført korrekt bekledning inkludert pusteluft. Konstabelen kan anvende tilgjengelig utstyr som kjøretøy, stiger, slanger, slukkere, kommunikasjon og redningsverktøy under alle klimatiske forhold i områder og nødssituasjoner som krever respons.

1.2 Kompetansenivå: Brannkonstabel

Nødetatene må ha støtte i riktig kunnskap og praksis og er opplært i sikker og korrekt bruk av personlig verneutstyr, pusteluftutstyr og annet utstyr som det forventes at de skal bruke. Atferd som holder dem og andre kolleger trygge, skal beskrives i en standardprosedyre (SOP). Øvet evne til dynamisk å vurdere risiko for seg selv og andre er påkrevd.

1.3 Tidligere opplæring: Brannkonstabel

I henhold til det europeiske rammeverket for kvalifikasjon (EQF) er denne leksjonen tilegnet nivå 2 Faktabasert grunnkunnskap på et arbeids- eller studiefelt. Grunnleggende kognitive og praktiske ferdigheter som er nødvendig for å bruke relevant informasjon til å utføre oppgaver og løse rutinemessige problemer ved hjelp av enkle regler og verktøy. Arbeide eller studere under veiledning med noe autonomi.

2. Innledning og mål

Denne leksjonen vil gi nødetatene informasjon om mulige kilder til hydrogenantennelse og de tilhørende mekanismene, inkludert diffusjonsmekanismen med spontan antenning under et plutselig utslipp av hydrogen. Den dekker de viktigste egenskapene knyttet til antennelse av hydrogen-oksygen-blandingen: minste antennelsesenergi, avhengigheten av hydrogenkonsentrasjonen i blandingen, selvantennelsestemperatur og effekten av triboelektrisitet. Denne leksjonen beskriver også metodene som brukes for å forebygge antennelse av hydrogen gjennom nøye evaluering av muligheten for antennelse og eliminering av antennelseskilder.

Ved slutten av denne leksjonen skal du kunne følgende:

- Gjenkjenne forskjellige typer antennelseskilder
- Identifisere mekanismer for hydrogenantennelse avhengig av antennelseskilden
- Sammenligne verdiene for minste antennelsesenergi (MIE) og selvantennelsestemperatur for hydrogen med verdiene for andre vanlige drivstoff
- Forklare minste antennelsesenergi som en funksjon av hydrogeninnholdet i blandingen
- Vurdere stadier av spontan antennelse av et plutselig hydrogenutslipp
- Kjenne igjen virkemidlene for å kontrollere hydrogenantennelseskilder
- Angi de viktigste forebyggende tiltakene for hydrogenantennelse

3. Antenneskilder

Det er vanskelig å definere den eksakte kilden til hydrogenantennelse på grunn hydrogenets lave minste antennesesenergi (MIE). Dermed er det ofte vanskelig å skille mellom nøyaktig hva som får hydrogen til å antenne og hva som var antennelsesmekanismen. Listen over mulige antenneskilder vises nedenfor.

Elektriske kilder :

- Elektriske gnister (f.eks. fra elektrisk utstyr)
- Elektrostatisk utladning (f.eks. i ujordede partikkelfiltre)
- Elektrisk lysbue (brytere, elektriske motorer, mobiltelefoner, personsøkere og radioer).
- Lynutladning (f.eks. lynnedslag i nærheten av avluftningsstuss)
- Elektrisk ladning generert ved drift av utstyr (kompressorer, generatorer, kjøretøy og annet anleggsutstyr)
- Elektriske kortslutninger eller annet elektrisk utstyr
- Elektrifiserte partikler

Mekaniske kilder :

- Mekaniske gnister (fra ventiler som lukkes raskt)
- Mekanisk påvirkning og/eller friksjon
- Metallbrudd
- Mekanisk vibrasjon og gjentatt bøyning

Varmekilder:

- Varme overflater (f.eks. varmeutstyr)
- Åpen flamme
- Varmestråler
- Eksos (f.eks. forbrenningsmotorer og enderør)
- Eksplosive ladninger (f.eks. Ladninger brukt i konstruksjon, fyrverkeri eller pyrotekniske enheter)
- Katalysatorer, eksplosiver og reaktive kjemiske materialer
- Sjokkbølger og/eller fragmenter
- Reflekterte eller gjentatte akustiske bølger og sjokkbølger

Andre kilder:

- Ioniserende stråling (radioaktivitet)
- Elektromagnetisk stråling
- Ultralydstråling
- Lys (laser/blits)
- Adiabatisk kompresjon (trykkøkning)

Det erkjennes generelt at rene gasser ikke blir elektrostatisk ladet under normale forhold [3], men dette refererer generelt til lave hastigheter og trykk. Når gasser slippes ut ved svært høye trykk, blir strømmen sonisk og tilbøyeligheten til elektrostatisk lading som oppstår, er ikke kjent. Det er kjent at rene gasser har en tendens til ikke å lade, men det er kjent at partikler i gassstrømmen blir elektrostatisk ladet [3].

Utladningsveien i mange praktiske tilfeller vil trolig være kronglete og ikke i en rett linje. Dette vil kreve at hydrogen lader ut gjennom rørbøyer, noe som potensielt vil føre til at materialer på overflaten av utladningsveien, f.eks. rør, eroderes og danner partikler som kan bli elektrostatisk ladet [3].

3.1 Antennelse ved elektrostatisk utladning

Det er tre hovedtyper av elektrostatisk utladning: gnist, børste og korona [1]. En *gnistutladning* er en enkelt plasmakanal mellom en høypotensialleder og en jordet leder. En *børsteutladning* er en utladning mellom en ladet isolator og et ledende jordet punkt. En *koronautladning* er en stille, vanligvis kontinuerlig, utladning med en strøm, men uten plasmakanal.

Studier som ble utført på hydrogenventiler for mange år siden, viste at antennelse var sjelden i fint vær, men var hyppigere i tordenvær, sludd, snøfall og på kalde frostnetter [1].

3.2 Mekanisk tenning

De viktigste egenskapene til brennende metallpartikler eller gnister som er relevante for deres evne til å føre til antennelse av brannfarlige blandinger, inkluderer:

- størrelse
- materiale
- hastighet
- temperatur
- antall
- forbrenningshastighet og -tid

Det er metall-til-metall-kontakttrykk og grenseverdi for relativ hastighet for gnistproduksjon under støt, gnidning eller sliping. Over grenseverdien går metallpartikler fra det svakeste av to materialene. Vanligvis produseres partiklene bare når den relative hastigheten mellom de to overflatene overstiger 1 m/s [4].



3.3 Antennelse via en varm overflate

Dette fenomenet, som er vanlig for de mest brannfarlige gass/damp-luft-blandingene, innebærer at omgivelsene har høy nok temperatur, til at forbrenningsvarmen ikke tapes til overflatene rundt, slik at oksidasjons-kjedereaksjonen kan utvikle seg [3].

4. Hydrogenantennelsesmekanismer

I 2007 publiserte Astbury og Hawksworth en artikkel som analyserte statistikk for hydrogenantenneshendelser og de tilhørende mekanismene [1]. Forfatterne oppdaget at det har vært rapportert om lekkasjer av hydrogen under høyt trykk som har blitt antent uten noen åpenbare årsaker, og flere antennelsesmekanismer har blitt foreslått. Det ble understreket at selv om mange lekkasjer har blitt antent, rapporteres det også om lekkasjer som ikke er blitt antent. For de tilfellene der antennelser skjedde uten åpenbare antennelseskilder, er de foreslåtte mekanismene relativt spekulative og mangler en grundig vitenskapelig analyse. Dette arbeidet identifiserte kunnskapshullene i den eksakte antennelsesmekanismen for et hydrogenutslipp. Mekanismene, som har blitt vurdert av Astbury og Hawksworth [1] inkluderer generering av elektrostatisk ladning, mekanisk antennelse, omvendt Joule-Thompson-effekt, diffusjonsantennelse, plutselig adiabatisk komprimering og antennelse på varme overflater. Disse mekanismene vil bli diskutert nedenfor i denne leksjonen.

Ved å analysere Major Hazard Incident Database Service of the Health and Safety Executive¹ (UK), avslørte Astbury og Hawksworth [1] 81 hendelser som involverte hydrogenutslipp. Av disse ble det rapportert om en forsinkelse mellom utslipp og antennelse kun for 4 tilfeller. Forfatterne antok at i andre tilfeller ble hydrogen antent umiddelbart. I 11 tilfeller ble antennelseskilden identifisert, men i de resterende tilfellene, dvs. i 86,3 % av hendelsene, var ikke antennelseskilden klar. Når det gjelder utslipp av ikke-hydrogen, antente 1,5 % av dem ikke, og 65,5 % av antennelseskildene ble ikke identifisert. Dette beviser antakelsen om at det er en forskjell i tilbøyelighet til antennelse mellom hydrogen og ikke-hydrogengasser ved utslipp. Følgende hendelser/ulykker har blitt gjennomgått av Astbury og Hawksworth [1] blant de andre. Fra arbeid utført av Nusselt i Tyskland var det rapportert om flere spontane antennelser av hydrogen på 2,1 MPa som ble sluppet ut i atmosfæren. Lagrings sylindrene hadde blitt kjent for å ha mengder jernoksid (dvs. rust) i seg, selv om de tilsynelatende var tørre, og man trodde først at det var potensial for elektrostatisk lading. Eksperimenter med utslipp av hydrogen til en åpen trakt festet på et langt rør viste imidlertid ingen antennelser, bortsett fra når trakten ble hindret av et jerndeksel. Mekanismen ble ikke forstått, så ytterligere forsøk ble utført. Kun når testene ble utført i mørket, ble det observert koronautladning. Når hydrogen lekker ut av en flens og man banket på røret for å røre opp støv, økte koronautladningen. Antennelse skjedde etter bankingen. Videre arbeid viste at når slipt kobbertråd ble brukt til å fremme koronautladninger, skjedde antennelsen når spissen ble bøyd vekk fra gassretningen, mens ingen antennelse skjedde når ledningen pekte i strømningsretningen [1].

¹ I denne databasen registreres ikke hydrogenutslipp som kun ble oppløst og ikke innebar brann, eksplosjon eller annen stor fare. Dermed er ikke-antennelsen som rapporteres som null, ikke nødvendigvis en indikasjon på at alle hydrogenutslipp ble antent.

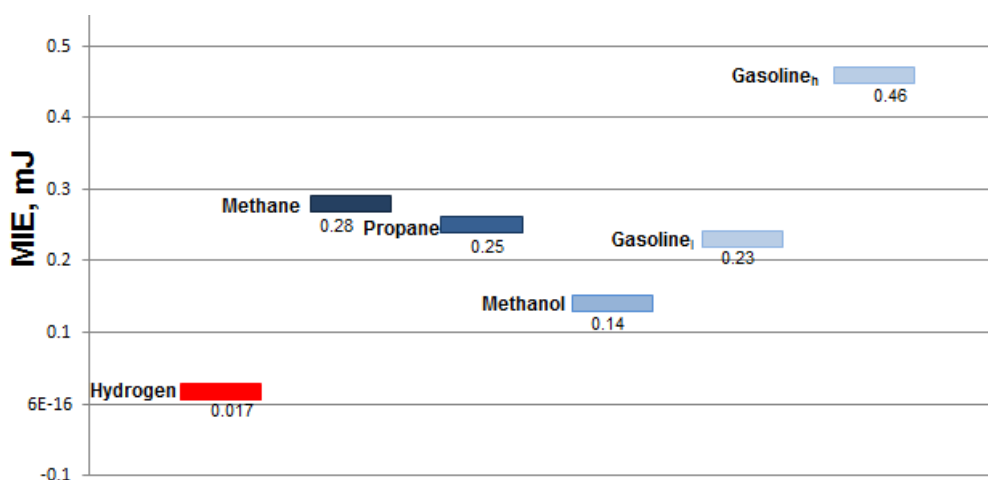
En annen hendelse rapportert av Astbury og Hawksworth [1] refererer til en sylinder med hydrogen som var koblet til et laboratorieapparat. En laboratorietekniker åpnet med tvang (brøt opp ventilen) for å fjerne smuss fra forbindelsen, og da han gjorde det, antente gassen som slapp ut, umiddelbart. Bond [5] tilskrev denne antennelsen til fenomenet *diffusjonsantennelse* i 1991. Selv om det ikke er angitt noe gasstrykk i denne hendelsen, kan det antas at trykket ville ha vært det vanlige sylindetrykket på 23 MPa. Reider et al. [16] testet et utslipp av en stor mengde hydrogen for å bestemme lydtryknivåene. Gassformig hydrogen ble sluppet ut ved et innledende trykk på 23,6 MPa og en innledende hastighet på 54,4 kg/s, i en periode på 10 sekunder. Gassen ble overført gjennom et rør med nominell bordiameter på 200 mm en 150 mm kuleventil med boring til en sylindrisk beholder utstyrt med en konvergent-divergerende dyse som ventilerte til atmosfæren. I testkjøringen der gassen ikke bevisst ble antent, ble ventilen på 150 mm i diameter stengt etter 10 sekunder, og 3 sekunder etter at ventilen begynte å lukke, oppstod det antennelse. De tre potensielle antennelsesmekanismene som ble undersøkt var: elektrifisering av gassen, elektrifisering av partikler i gassen og metallpartikler som skrapet mot en metallstang sveiset over munnstykket på dysen. Av disse ble den første avvist, siden rene gasser er kjent for å ha ubetydelig elektrostatisk lading. Den andre mekanismen ble vurdert, men systemet hadde blitt grundig rengjort og blåst ned før testen. Likevel var hastigheten til gassen som ble sluppet ut, på 1216 m/s, langt høyere under kjøringen enn tidligere brukte hastigheter, så denne potensielle mekanismen kunne ikke avvises. Den tredje mekanismen ble vurdert som en mulighet ettersom utslippshastigheten var høy og dermed muligens løsnet partikler og slo dem mot stangen. Denne mekanismen måtte også telles med. Etter antennelsen ble det imidlertid funnet at stangen hadde blitt revet løs i den ene enden, og dette kunne ha presentert en mulig antennelseskilde som ikke var forutsett. I tillegg ble den «uventede» spontane antennelsen av hydrogenutslipp i stor-skala eksperimenter også rapportert av Chaineaux et al. (1991) [6], Groethe et al. (2005) [7].

4.1 Minste antennesesenergi (MIE)

Minste antennesesenergi (MIE) for brannfarlige gasser og damper er minimumsverdien av elektrisk energi, lagret i utladningskretsen med et så lite tap i ledningene som mulig, som (ved utladning over et gnistgap) bare antenner den stillestående blandingen i den mest antannelige blandingen. En svak gnist forårsaket av utladning av statisk elektrisitet fra en menneskekropp kan være tilstrekkelig til å antenne noen av drivstoffene [3]. For en gitt blandingssammensetning må følgende parametere for utladningskretsen varieres for å få de optimale forholdene: kapasitans, induktivitet, ladespenning, form og dimensjoner på elektrodene samt avstanden mellom elektrodene [4]. I tillegg til blandingssammensetningen er MIE avhengig av andre faktorer som det innledende trykket og temperaturen. Siden de fleste antennelseskilder genererer mer enn 10 mJ, vil praktisk talt alle vanlige drivstoff antennes i blandingen med luft hvis konsentrasjonen overskrider den nedre brennbarhetsgrensen (LFL).

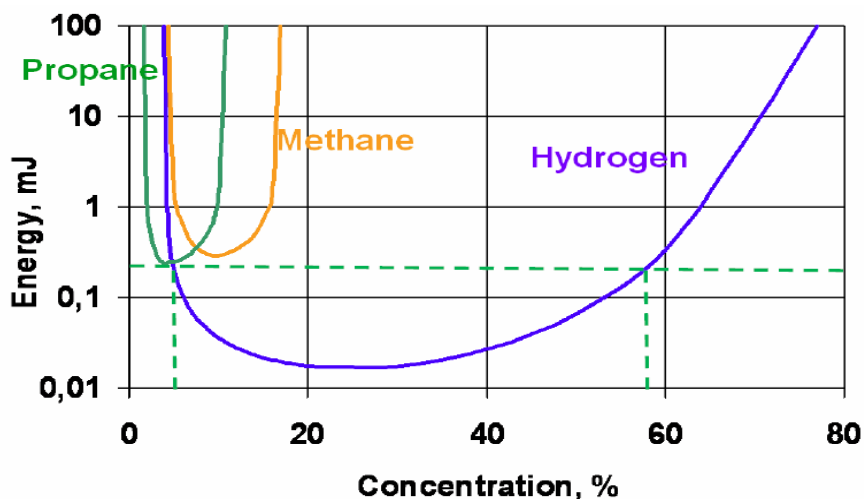
Antennelseskildene som kan danne støt, for eksempel gnistutladninger med høy energi og brisant sprengstoff, kan starte detonasjon direkte.

Som vist i figur 1, har hydrogen den laveste MIE sammenlignet med andre drivstoff. Den er 0,017 mJ for hydrogen-luft-blandinger og 0,0012 mJ for hydrogen-oksygen-blanding. (Se leksjonen om «Egenskaper for hydrogen som er relevante for sikkerhet»). Som nevnt tidligere er MIE en funksjon av hydrogenkonsentrasjon i den brannfarlige blandingen (enten med luft eller med en annen oksidant). For en gitt brennbar blanding og en antennelsestype finnes det en konsentrasjonsavhengig minimumsenergi som antennelse ikke forekommer under. MIE blir uendelig ved brennbarhetsgrensene (figur 2). Over brennbarhetsområdet til hydrogen-luft-blandinger varierer antennelsesenergien med nesten tre størrelsesordener.



Figur 1. Verdiene til MIE for hydrogen og andre drivstoff.

Som vist i figur 2 vil en kilde med antennelsesenergi på 0,24 mJ ikke antenne metan eller propan, men vil antenne en blanding av hydrogen og luft innenfor et konsentrasjonsområde på 6,5 til 58 volumprosent hydrogen. En kilde med energi på 1 mJ antenner hydrogen-luft-blanding med hydrogeninnhold fra 6 til 64 volumprosent. Vær oppmerksom på at ved grensene for brennbarhet er antennelsesenergien relativt lik for tre drivstoffene. Verdien er relativt høy sammenlignet med MIE, og mange antennelseskilder vil kunne gi dette energinivået. Det kreves mindre energi for å antenne en blanding som er nær den støkiometriske sammensetningen.



Figur 2. Antennelsesenergiens avhengighet av konsentrasjonen av et drivstoff (hydrogen, propan eller metan) i luften [8].

Energien lagret som statisk elektrisitet på et objekt varierer, avhengig objektets størrelse og kapasitans, spenningen det er ladet til, og den dielektriske konstanten til det omkringliggende mediet [3]. For å modellere effekten av statisk utladning regnes et menneske som en kondensator på 100 pikofarad (pF), ladet til en spenning på 4000 til 35 000 volt. Den totale energien er i størrelsesorden millijoule (mJ). De større objektene vil lagre mer energi. Denne energien lades vanligvis ut på mindre enn et mikrosekund og er tilstrekkelig til å antenne ikke bare nær-støkiometriske blandinger, men også blandinger nær brennbarhetsgrensene. Noen isolasjonsmaterialer som tre, papir og noen stoffer vil typisk danne et ledende lag som kan forhindre statisk oppbygging ved å absorbere vann fra luften i miljøer der den relative fuktigheten er større enn 50 % [9].

4.2 Selvantennelsestemperatur

Selvantennelsestemperaturen er minimumstemperaturen som kreves for å starte en forbrenningsreaksjon for en brensel-oksygen-blanding ved fravær av en ekstern antennelseskilde [3]. Standard selvantennelsestemperatur for hydrogen i luft er over 510 °C [10]. Det er relativt høyt sammenlignet med hydrokarboner med lange molekyler. Imidlertid kan selvantennelsestemperaturen reduseres av katalytiske overflater som platina. Gjenstander med temperaturer fra 500 til 580 °C kan antenne enten hydrogen-luft- eller hydrogen-oksygen-blandinger ved atmosfæretrykk. Betydelig kjøligere gjenstander på omtrent 320 °C kan forårsake hydrogenantennelse ved langvarig kontakt ved mindre enn atmosfæretrykk [11]. Antennelsestemperatur ved varmluftstråle er 670 °C [12].

4.3 Diffusjonsantennelse

Fenomenet diffusjonsantennelse er beregnet av Wolanski og Wojcicki [13], som demonstrerte at antennelse oppstod da høytrykkshydrogen ble innført i et sjokkrør fylt med luft eller oksygen.

Leksjon 8: Antennelseskilder og forebygging av antennelse



De fant ut at antennelse kunne oppnås selv om temperaturen var under selvantennelsestemperaturen til hydrogenet.

5. Spontan antennelse av plutselige utslipp

5.1 Diffusjonsantennelsesmekanisme

Det er gjort mange forsøk på å forklare spontan antennelse av et plutselig utslipp i løpet av de siste tiårene, med utgangspunkt i den banebrytende studien av Wolanski og Wojcicki [13] om den såkalte «diffusjonsantennelsesmekanismen» som er omtalt i [avsnitt 3.5](#). Eksperimentelle data ga kritiske forhold for dette fenomenet. Dessverre kan de ikke gi et detaljert innblikk i dynamikken i prosessen. For eksempel kan den nøyaktige plasseringen av de første antennelsespunktene og et kjemisk reaksjonsforløp i slangen nedstrøms en bruddplate eller ventil neppe identifiseres via eksperimenter ved høyt trykk [3].

Det er enighet om at sannsynligheten for spontan hydrogenantennelse ved et plutselig utslipp fra høytrykksutstyr er relativt høy hvis avbøtende tiltak ikke er på plass. Imidlertid er det ingen referanser i retningslinjer og standarder med hensyn til et problem med spontan antennelse eller til en spesifikk konstruksjonsdesign man må unngå eller fremme for rør, lagring og bruk av høytrykkssystemer som håndterer komprimert hydrogen [3]. Kontroll av spontan antennelse av utslipp av høytrykkshydrogen er en av utfordringene innen hydrogensikkerhet som det finnes få grunnleggende forklaringer på.

6. Forebygging av hydrogenantennelse

Antennelseskildene må elimineres eller isoleres på en egnet måte, og drift av FCH-anlegg bør utføres som om det kan oppstå uforutsette antennelseskilder. Jordingsmetoder må være på plass for å minimere risikoen for statisk utladning og potensialet for lynnedslag i utendørsmiljøer. Materialer valgt for bruk i hydrogenmiljøer bør evalueres for sin evne til å lade ut statisk elektrisitet. Isolasjonsmaterialer som tre, papir og noen stoffer vil typisk danne et ledende lag som kan forhindre statisk oppbygging ved å absorbere vann fra luften i miljøer der den relative fuktigheten er større enn 50 %. anbefalt praksis for jordingsmetoder for å forhindre statisk utladning finnes i forskjellige nasjonale og internasjonale standarder som dekker installasjon av elektrisk utstyr i farlige miljøer. Elektrisk utstyr som er valgt til bruk i hydrogenmiljøer, kan også være en kilde til gnister eller varmeutvikling, og gjeldende nasjonale og internasjonale elektrotekniske standarder for installasjon må følges nøye.

Det er flere måter å eliminere eller i det minste redusere risikoen for antennelse på. Health and Safety Executive (UK) har utarbeidet listen over følgende forebyggende tiltak [14]:

- Bruk av adekvat elektrisk utstyr (dvs. utstyr som er klassifisert for sone det befinner seg i). Mekanisk utstyr bør velges på lignende måte.
- Jording av alt utstyr med et anlegg.
- Eliminering av overflater med temperatur over selvantennelsestemperaturen til brannfarlige materialer som lagres/brukes.
- Lynbeskyttelse.
- Riktig valg av kjøretøy/forbrenningsmotorer som kan arbeide i soneinndelte områder.
- Riktig valg av utstyr for å unngå elektromagnetiske strålingskilder med høy intensitet, f.eks. begrensninger i strøminngangen til fiberoptiske systemer, unngåelse av høyintensitetslasere eller kilder til infrarød stråling.
- Forbud mot røyking og bruk av fyrstikker eller lightere.
- Kontroll over bruk av vanlige kjøretøy.
- Kontroll over aktivitetene som skaper de uregelmessige farlige områdene, f.eks. lasting/lossing av tanker.
- Kontroll av vedlikeholdsaktiviteter som kan forårsake gnister / varme overflater / åpen ild gjennom en ordning med tilsvarende arbeidstillatelse (PTW).
- Forholdsregler for å kontrollere risikoen fra pyrofort materiale, vanligvis forbundet med dannelse av jernsulfid inne i prosessutstyret.

6.1 Kontroll av termiske og mekaniske antennelseskilder

Antennelse av hydrogen-luft-blanding kan skyldes en varm overflate. For hydrogen må temperaturen på varme overflater eller varmepunkter ikke overstige 585 °C selv på noen få mm² ifølge forsøkene utført i det europeiske prosjektet MECHEX (vær oppmerksom på at selvantennelsestemperaturen for hydrogen, 510 °C, fortsatt er lavere enn angitt ovenfor).

Fysisk adskillelse av antennelseskilder, for eksempel sveising, flammer eller varmt arbeid er å foretrekke.

Mekanisk antennelse er vanligvis et resultat av mekanisk belastning under unormale eller feil forhold (dvs. skrubbing, sliping og støt eller en kombinasjon av disse faktorene) og består vanligvis av tre trinn: generering av varme, overføring av varme til den eksplosive atmosfæren rundt og til slutt selve antennelsen [15]. Kontroll av mekanisk antennelse krever en nøye utforming av utstyret på en av følgende måter:

- Begrensning av rotasjonshastigheten
- Tilstrekkelig avstand mellom faste og roterende deler
- Sette opp temperatursensorer

Energien som produseres ved støt kan være så lite som et par Joule og er tilstrekkelig til å antenne hydrogen-luft-blanding. For å unngå antennelse forårsaket av støt er følgende nødvendig [15]:

- Bruk egnede gnistfrie verktøy
- Spyl ut hydrogen før inngrep
- Unngå kontakt mellom aluminium og stål

Varme arbeider har likheter med den mekaniske antennelsen, men genereres ikke av en prosessmekanisk svikt, men av en menneskelig aktivitet. Det er nødvendig å forhindre ulykker/hendelser som oppstår som følge av dette [15]:

- Leverer «tillatelse til varme arbeider»
- Riktig opplæring av relevant personale
- Ha tilstrekkelig brannsløkkingsutstyr
- Slå av gasstilførselen under inngrep
- Rensing av utstyr før inngrep

Referanser

1. Astbury, GR og Hawksworth, SJ (2007). Spontaneous ignition of hydrogen leaks: a review of postulated mechanisms. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 32, s. 2178–2185.
2. Moorehouse, J, Williams, A og Maddison TE (1974). An investigation of the minimum ignition energies of some C1 to C7 hydrocarbons. *Combustion and Flame*. Vol. 23, s. 203–213.
3. Molkov, V (2012). *Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II*. Tilgjengelig fra: www.bookboon.com, gratis nedlasting av e-bok.
4. HyFacts Project. Chapter IM. Hydrogen ignition mechanisms. Prevention and mitigation of ignition. Tilgjengelig fra: <https://www.h2euro.org/hyfacts/2014/06/26/training-material/> [23.11.20].
5. Bond, J (1991). *Sources of ignition: flammability characteristics of chemicals and products*. Oxford: Butterworth Heinemann.
6. Chaineaux, J, Mavrothalassitis, G og Pineau, J (1991). Modelization and validation of the discharge in air of a vessel pressurized by flammable gas. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Vol. 134, s. 104–137.
7. Groethe, M, Merilo, E, Colton, J, Chiba, S, Sato, Y og Iwabuchi, H (2005). Large-scale hydrogen deflagrations and detonations, *Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety*, 8.–10. september 2005, Pisa, Paper 120105.
8. Schmidchen, U (2009). Hydrogen safety facts and myths. 3rd International Short Course and Advanced Research Workshop “Progress in Hydrogen Safety”, Belfast, 27. april–1. mai 2009, Nord-Irland, UK.
9. ISO/TR 15916 (2004). *Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. International Organization for Standardization. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization, Geneve.
10. BRHS, Biennial Report on Hydrogen Safety (2009). The European network of excellence “Safety of hydrogen as an energy carrier” (NoE HySafe). Tilgjengelig fra: www.hysafe.org [23.11.20].
11. Baratov, AN, Korolchenko, AY og Kravchuk, GN (red.) (1990). *Fire and explosion hazards of substances and materials*. Moskva: Khimia. 496 s., ISBN 5-7245-0603-3 del 1, ISBN 5-7245-0408-1 del 2 (på russisk).



12. NASA (1997). Safety standard for hydrogen and hydrogen systems. Guidelines for hydrogen system design, materials selection, operations, storage, and transportation. Technical report NSS 1740.16, Office of safety and mission assurance, Washington. Tilgjengelig fra: <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf> ble trukket tilbake 25. juli 2005 [13.05.14].
13. Wolanski, P og Wojcicki, S (1972). Investigation into the mechanism of the diffusion ignition of a combustible gas flowing into an oxidizing atmosphere. Proceedings of the Combustion Institute. Vol. 14, s. 1217–1223.
14. Health and Safety Executive (2012). Hazardous Area Classification and Control of Ignition Sources. Tilgjengelig fra: <http://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/techmeasareaclas.htm> [23.11.20].
15. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering. Ph.d.-avhandling. Universitetet i Ulster.
16. Reider, R, Otway, HJ og Knight HT (1965). An unconfined large volume hydrogen/air explosion. Pyrodynamics. Vol. 2, s. 249–261.