

Vetyelektrolyysilaitteiston turvallisuus

Esiselvitys käyttöönottoon liittyvistä toimenpiteistä
oppilaitoksille

Aino Pasanen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2024

Biotuotetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Biotuotetekniikan tutkinto-ohjelma

PASANEN, AINO:

Vetyelektrolyysilaitteiston turvallisuus

Esiselvitys laitteiston käyttöönottoon liittyvistä toimenpiteistä oppilaitoksille

Opinnäytetyö 35 sivua, joista liitteitä 1 sivu
Toukokuu 2024

Vihreän vedyn hyödyntäminen energiasektorilla on noussut ilmasto- ja energia-poliittisissa keskusteluissa mahdolliseksi työkaluksi vihreän siirtymän tavoitteiden toteuttamiseen. Tästä syystä vedyn elektrolyysilaitteiston toiminnan havainnollistaminen prosessitekniikan tutkinto-ohjelmissa on tulevaisuudessa tarpeen. Vety aiheuttaa reaktiivisuutensa vuoksi palo- ja räjähdysvaaraa, joten sen käsittelyssä tulee ottaa huomioon Euroopan unionin tasolla säädellyt Suomen lakiin implementoidut ATEX-direktiivit.

Tampereen ammattikorkeakoulun tilaaman selvitystyön tavoitteena on laatia turvallisuuteen painottuva aineistokokonaisuus vetyelektrolyysilaitteiston käyttöönottoa ja opetusta varten. Tarkoituksena on tutkia kirjallisuusselvityksen avulla aineen ominaisuuksia, prosessiolosuhteita sekä ATEX-direktiivien täytäntönpaanoa teollisuudessa. Räjähdysvaaran olemassaoloa arvioitiin teollisuuden käytöjen mukaan, minkä jälkeen kartoitettiin toiminnan aiheuttamaa riskiä laajemmin HAZID-menetelmällä painottaen erityisesti oppilaitosympäristön erityistekijöitä.

Räjähdysvaaran olemassaolon yksiselitteistä arviota ei voitu antaa, sillä tärkeät tiedot esimerkiksi prosessin vetykaasun saannosta eivät olleet tiedossa. Työssä käytiin kuitenkin läpi esimerkin avulla, minkälaisilla toimenpiteillä räjähdysvaarallisen tilan syntymistä voidaan estää ja mitkä tekijät siihen vaikuttavat. Prosessilaitteiston turvallisuuden katsottiin olevan normaalikäytössä hyvin suunnitellussa tilassa hyvällä tasolla, kunhan tuotettavat ainemäärät pidettäisiin pieninä. Oppilaitosympäristössä on kuitenkin otettava huomioon korkeampi laitteiston väärinkäytön todennäköisyys inhimillisen virheen seurauksena.

Prosessin saannon ollessa tarpeeksi pieni tilan voi pitää räjähdysvaarattomana ilmanvaihdon suunnittelun avulla. Mahdollisina varotoimenpiteinä ehdotettiin myös kaasuilmaisinten asennusta sekä syttymislähteiden kartoitusta laitteiston lähiympäristössä ja tilan korkeimmissa kohdissa. Laitteiston virheellisen käytön mahdollisuutta voitaisiin vähentää suorittamalla toimintovirheanalyysi laitteiston käyttöohjeiden perusteella. Vaikka räjähdysvaarallisuuden arviointi ei olisi välttämätöntä, Pelastuslaitosta tulisi konsultoida tarvittaessa.

Asiasanat: turvallisuus, ATEX, vetyelektrolyysi, HAZID, oppilaitokset

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Bioproduct Engineering

PASANEN, AINO:

The Safety of Hydrogen Electrolysis Equipment
Preliminary Study of Safety Measures for Educational Institutions

Bachelor's thesis pages 35, appendices 1 page
May 2024

The utilization of green hydrogen in the energy sector has been widely considered in the latest climate political discussions and scenarios. Therefore, demonstrating the use of hydrogen electrolysis equipment in educational institutions as a part of process technology education will most likely be necessary. Due to the reactive nature of hydrogen, European ATEX-directives should be taken into consideration regarding both production and handling.

The aim of this study for Tampere University of Applied Sciences was to create material to help with safe demonstration of hydrogen electrolysis in the school laboratory. The objective was to gather information about industrial ATEX-practices and consider to which extent they can be applied when planning the operation of small-scale equipment in a school environment.

The theoretical section contained information about the industrial application of ATEX-directives as well as the chemical nature of hydrogen and the process conditions of electrolysis. The empirical part consisted of a preliminary assessment on the likelihood of an explosive atmosphere developing as well as a broader risk assessment using the HAZID-method.

The results from both studies indicated that the risk from the process equipment alone was not as high as the risk from improper use. Some preventative measures such as ventilation and the use of gas detectors were recommended along with a definitive assessment regarding the likelihood of an explosive atmosphere developing once defining process variables like hydrogen yield are known.

Key words: Safety, hydrogen, electrolysis, ATEX, HAZID

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	VEDYN VALMISTUS JA KÄSITTELY	7
	2.1 Elektrolyysimenetelmät.....	7
	2.2 Käsittelyyn liittyvä lainsäädäntö	10
3	RÄJÄHDYSVAARAN ARVIOINTI	11
	3.1 Palavat aineet.....	11
	3.2 Syttyvien kaasujen ominaisuuksia.....	12
	3.3 Räjähdykelpoiset ilmaseokset	14
	3.4 Tilaluokittelu ja räjähdysvaaran määrittäminen.....	15
4	TOIMINNAN SUUNNITTELU	17
	4.1 Räjähdyksivaara suljetussa tilassa	17
	4.2 Riskinarvioinnin menetelmiä.....	18
	4.3 Suojatoimenpiteet.....	20
	4.3.1 Syntymisen estäminen.....	20
	4.3.2 Laimentaminen ja ilmanvaihto	21
	4.3.3 Syttymislähteiden tarkastelu	22
5	TURVALLISUUSKARTOITUS.....	23
	5.1 Menetelmän kuvaus ja työskentelytilat	23
	5.2 Vedyn ominaisuudet.....	24
	5.3 Räjähdyksivaaran alustava arvio	25
	5.4 Vaaran arviointi ja suositeltavat toimenpiteet	27
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	30
	LÄHTEET	32
	LIITTEET	35
	Liite 1. Laboratoriossa käytettävän elektrolyysilaitteiston saantoja	35

1 JOHDANTO

Vedyn hyödyntäminen energiasektorilla on noussut tärkeäksi osaksi kansainvälisiä ilmasto- ja energiapoliittisia keskusteluita 2020-luvulla. Useat maat, sekä Euroopan komissio ovat määritelleet omat vetystrategiansa ja vieneet tähän liittyviä lakiehdotuksia eteenpäin. (Valtioneuvoston kanslia 2022, 17.) Suomen teollisuuden osallisuus energiamurrokseen on riippuvainen monesta tekijästä, joista yksi on kotimaisen osaamisen laatu ja määrä. Tämän vuoksi vedyn elektrolyysilaitteiston käytön havainnollistaminen prosessitekniikan opintojaksoilla on tärkeää tulevien ammattilaisten osaamisen kannalta. Työn tavoitteena on kerätä ja esittää kootusti oppilaitoksille tietoa ja materiaalia vetyelektrolyysilaitteiston turvallista käyttöönottoa varten.

Vety on luonteeltaan reaktiivinen aine ja sen aiheuttamat riskit liittyvät palo- ja räjähdysvaaroihin (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024, 3). Räjähdysvaaran arviointi oppilaitoksissa noudattaa teollisuuden periaatteita (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto n.d.). Selvitystyön tarkoituksena on perehtyä vedyn kemiallisiin ominaisuuksiin, elektrolyysin prosessitekniisiin olosuhteisiin sekä vetyyn liittyvään lainsäädäntöön. Näiden tekijöiden pohjalta pohditaan, miten teollisuuden toimintaperiaatteita voitaisiin hyödyntää oppilaitosympäristön turvallisuuden varmistamiseksi ottaen erityisesti huomioon oppilaitosympäristön erityistekijät. On tärkeää selvittää, mitkä viranomaistahot valvovat vedyn käsittelyä Suomessa ja mitä lakisääteisiä toimenpiteitä tulee suorittaa ennen laitteiston käyttöönottoa.

Kappaleessa 2 käsitellään vedyn valmistukseen käytössä olevia elektrolyysiteknologioita sekä Suomessa tällä hetkellä käytössä olevaa huomioitavaa lainsäädäntöä. Kappaleessa 3 määritetään räjähdysvaaran arvioinnin pohjana olevia teknisiä ja kemiallisia tietoja. Tämän jälkeen kappaleessa 4 syvennyttään tarkemmin laitteiston käyttötilojen suunnitteluun ja riskinarvioinnissa käytettäviin menetelmiin. Viimeisenä esitetään esimerkkinä alustava räjähdysvaaran arvio, sekä laajempi olosuhteet huomioon ottava riskinkartoitus. Näiden pohjalta esitetään suositeltavia toimenpiteitä laitteiston käyttöönottoon ja tilojen suunnitteluun.

2 VEDYN VALMISTUS JA KÄSITTELY

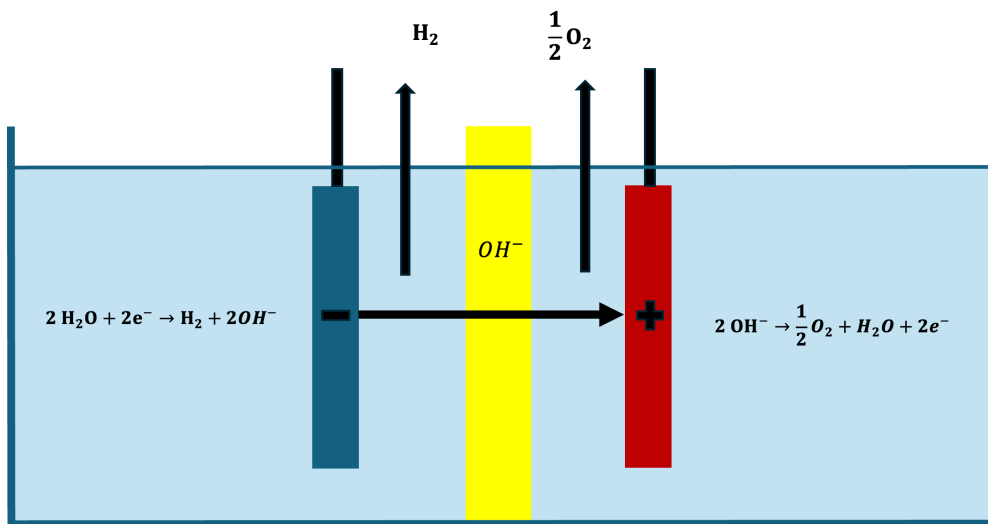
Vetyä on käytetty pitkään kemianteollisuudessa raaka-aineena ammoniakkin ja metanolin tuotannossa, sekä öljynjalostuksen eri osaprosesseissa. Sitä esiintyy luonnossa reaktiivisuutensa vuoksi vain yhdisteinä (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024). Vetyä onkin tyypillisesti tuotettu fossiilisten polttoaineiden hiilivedyistä erottamalla. Tämä prosessi tuottaa kuitenkin runsaasti päästöjä ja kuluttaa uusiutumattomia polttoaineita. (Joukanen 2023.)

Hiilivetyjen lisäksi vetyä voidaan erottaa myös vedestä. Tämä voidaan tehdä elektrolyysin avulla, jossa vesimolekyylit erotetaan vedyksi ja hapeksi sähköenergiaa hyödyntäen. Prosessi on täysin päästötön, jos siinä käytetään uusiutuvaa energiaa. Näin voidaan valmistaa ns. vihreää vetyä. (Joukanen 2023.)

2.1 Elektrolyysimenetelmät

Vedyn valmistus elektrolyysin avulla perustuu vesimolekyylin hajottamiseen sähköenergian avulla. (Arzamedi, Dieguez, Gandia 2013, 19.) Esimerkkejä tästä teknologiasta ovat laajasti käytössä olevat alkalielektrolyysi (ALK) ja protoninvaihtomembraanielektrolyysi (PEM). (Arzamedi, ym. 2013, 24) Alkalielektrolyysi on pitkään käytössä ollut ja edelleen yleisin laitteistomuoto veden elektrolyyttiseen hajotukseen (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024). PEM- elektrolyysin etuja ovat kuitenkin kyky toimia suuremmilla virtatiheyksillä ja reagoida nopeasti kuorman muutoksiin. Tämän vuoksi se on erittäin käyttökelpoinen sovelluksissa, joissa käytetään uusiutuvia energialähteitä. (Arzamedi, ym. 2013, 36)

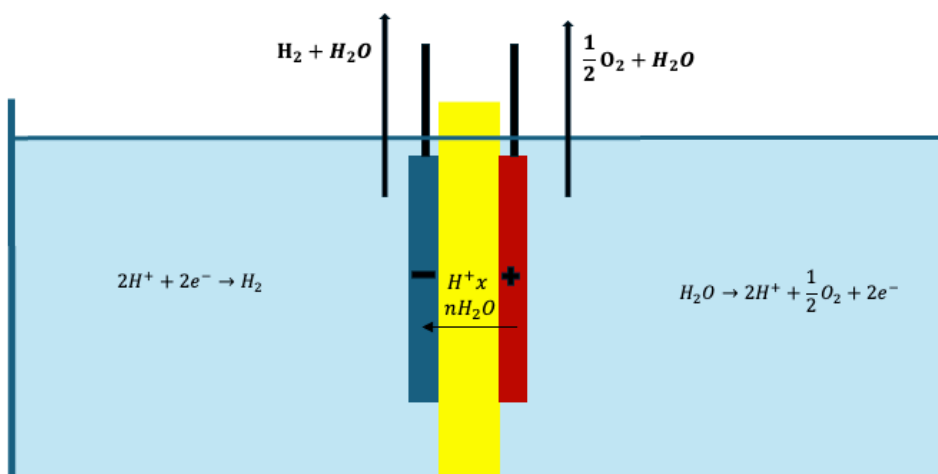
Kuviossa 1 on esitetty alkalielektrolyysilaitteen toimintaperiaatetta. Laitteen sisällä oleva elektrolyyttineste on usein kaliumhydroksidia tai natriumhydroksidia. Nesteeseen on upotettu kaksi metallista elektrodia, joita erottaa huokoinen kalvo. Kalvon tehtävänä on estää vedyn ja hapen takaisinsekoittuminen. (Arzamedi ym. 2013, 25)



KUVIO 1: Kaaviokuva Alkalielektrolyysilaitteistosta

Negatiivisesti varautuneen katodin pinnalla muodostuu vetykaasua ja hydroksyyli-ioneja. Muodostunut vetykaasu johdetaan ulos laitteistosta. Hydroksyyli-ioni kulkeutuu kalvon läpi positiivisesti varautuneelle anodille, jonka pinnalla se oksidoiduu. Happikaasu johdetaan ulos laitteistosta katodin puolelta. (Arzamedi ym. 2013, 25)

Protoninvaihtomembraani- tai PEM-elektrolyysissä (kuvio 2) nesteen sijasta elektrolyytinä toimii elektrodien välissä sijaitseva polymeerinen kalvo ja laitteiston sisällä on nestemäisen elektrolyytin sijasta tislattua vettä. Elektrodit ovat puuristettu kalvoa vasten tai integroitu siihen. (Arzamedi ym. 2013, 29–30.)



KUVIO 2: Kaaviokuva PEM-elektrolyysilaitteiston toiminnasta

Protonit siirtyvät kalvon läpi katodille, jossa ne muodostavat vetykaasua. Syntyvä vety on hyvin puhdasta eikä vaadi erillistä puhdistamista. Anodilla syntyvä happikaasu johdetaan ulos laitteistosta. Sen ei pitäisi normaalikäytössä sekoittua vetyprotonien kanssa. (Arzamedi ym. 2013, 29–30.)

Elektrolyysilaitteiston turvallista suunnittelua ja operointia kartoittaessa on muutamia huomioon otettavia laitteistoteknisiä erityispiirteitä. Laitteiston sisällä on prosessin tuotteina sekä vety- että happikaasua ja näin ollen on mahdollisuus, että ne sekoittuvat keskenään laitteistossa. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024, 8.) Sekoittumisen voi laittaa liikkeelle esimerkiksi vetykorroosio, erotuskalvoon kohdistuva liian suuri paine-ero tai mekaaninen rasitus (ISPT 2023, 41).

PEM-laitteisto kestää suurempaa paine-eroa eri puolten välillä alkalielektrolyysilaitteistoon verrattuna. Tämän takia sen operointi on vähemmän haastavaa. Alkalisysteemi on alttiimpi kalvon vahingoittumiselle ja näin ollen sen käytössä on suurempi todennäköisyys tuotekaasujen keskinäiseen sekoittumiseen laitteiston sisällä. (ISPT 2023, 15–16.) Tämän lisäksi alkalielektrolyysilaitteiston käyttöä suunnitellessa tulee ottaa huomioon vetykaasun lisäksi myös alkaliliuoksen aiheuttamat kemikaaliriskit (Karpiola 2024).

Kiinteäoksidikeno-elektrolyysi (SOEC) on alkali- ja polymeerimembraanielektrolyysimenetelmiä uudempi ja varhaisessa kehitysvaiheessa oleva laitteistotyyppi. SOEC-laitteistoa operoidaan korkeammassa lämpötilassa, kun taas ALK- ja PEM-laitteistoja korkeammassa paineessa. SOEC-tekniikan tarjoama hyötysuhde on kuitenkin kaupallisessa käytössä olevia laitteistotyyppisiä parempi. (Valtioneuvoston kanslia 2022, 133–135.)

Laitteistotyyppien käyttöä ja hyötysuhteen kehittymistä on arvioitu pitkällä aikavälillä. PEM-elektrolyysin hyötysuhteen uskotaan nousevan jopa kymmenellä prosenttiyksiköllä vuoteen 2030 mennessä. Pitkällä aikavälillä SOEC-elektrolyysin käyttöä uskotaan kasvavan eniten ja investointikustannusten verrattuna halvempaan laitteistoon uskotaan kuroutuvan umpeen. (Valtioneuvoston kanslia 2022, 135–136.)

2.2 Käsittelyyn liittyvä lainsäädäntö

Vedyn valmistusta ja käsittelyä varten asetettuja vaatimuksia on kemikaaliturvallisuuslaissa (390/2005). Kaksi tärkeää sen pohjalta annettua asetusta on valvonta-asetus (685/2015) ja turvallisuusvaatimusasetus (856/2012). Ensimmäinen näistä määrittää toiminnan laajuuden ja sitä valvovan viranomaisen. Näistä jälkimmäinen määrittää vaatimuksia esimerkiksi toiminnan sijoittamiselle, sekä monelle muulle käytännön tekijälle. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024, 39–40.)

Valvonta-asetusta sovelletaan kemikaaliturvallisuuslain mukaan vaarallisiin kemikaaleihin. Asetuksessa määritellään fysikaalista vaaraa aiheuttava kemikaali CLP-asetuksen pohjalta. Siinä määritellään käsittely ja varastointi laajamittaiseksi tai vähäiseksi ja säädetään toiminnanharjoittajan velvollisuudesta vaatia toimintaperiaateasiakirja sekä turvallisuus selvitys. Nämä määritelmät perustuvat käytettyyn kemikaaliin, sekä sen määrään. Vedyn käsittelyn ja varastoinnin katsotaan olevan vähäistä, kun sitä on tuotantolaitoksella alle kaksi tonnia. Tällöin toimintaa valvova viranomainen on Pelastuslaitos. Suurempien määrien käsittelyä valvoo Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. Käsittelyä pidetään ilmoituksenvaraisena, jos vetyä on yli 100 kg, tätä pienemmistä määristä ei vaadita ilmoitusta. (Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn... 685/2015.)

Turvallisuusvaatimusasetuksessa säädetään vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista. Vaatimuksia asetetaan mahdollisten onnettomuuksien seurausten perusteella laitoksen sijoitukselle, sekä toimintojen sijoitukselle laitosalueella. (Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien teollisen... 856/2012) Vedyn käsittelyn aiheuttaman räjähdysvaaran vuoksi sovelletaan sen käytössä ja käsittelyssä myös Suomen räjähdysvaaraa koskevaa lainsäädäntöä. Se perustuu kahteen EU:n direktiiviin, joita kutsutaan ATEX-direktiiveiksi. Nämä direktiivit asettavat vaatimuksia räjähdysvaaran tunnistamiseen, tilojen luokitteluun, sekä määrittävät perustan räjähdys suojausasiakirjan laatimiselle. Tämän lisäksi ne asettavat vaatimuksia tiloissa käytettävälle laitteistolle. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024, 47.)

3 RÄJÄHDYSVAARAN ARVIOINTI

Euroopan parlamentti ja neuvosto on antanut räjähdyskelpoisia ilmaseoksia koskevan ATEX-olosuhdedirektiivin 1999/92/EY. Siinä määritetään räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamalle vaaralle mahdollisesti altistuvien työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden suojelua koskevat vähimmäisvaatimukset. (Direktiivi 1999/92/EY.)

Räjähdysvaaran arviointiprosessissa arvioidaan ensin räjähdysuojaustoimenpiteiden tarpeellisuus arvioimalla mahdollisuutta vaarallisten räjähdyskelpoisten ilmaseosten esiintymiseen (Euroopan yhteisöjen komissio 2003, 7). Räjähdysvaaran olemassaolon varmistuttua todetaan suojatoimenpiteiden olevan tarpeen. Suojatoimenpiteiden toteuttamisesta laadittava räjähdysuojausasiakirja. Siinä annetaan yleiskuva vaaran arvioinnin tuloksista, käyttöön otetusta laitteistosta ja työympäristöä koskevista suojatoimenpiteistä. (Direktiivi 1999/92/EY.)


3.1 Palavat aineet

Räjähdysvaaran arviointiprosessin ensimmäisessä vaiheessa tarkastellaan, onko tilassa palavia aineita. Palavat aineet aiheuttavat eksotermisen reaktion hapen kanssa ja näiden aineiden esiintyminen tilassa tarkoittaa räjähdysvaaran tarkastelun olevan tarpeen. (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 16.) Sosiaali- ja terveysministeriö on määrittänyt kemikaalilain pohjalta luettelon vaarallisista aineista ja niiden ryhmittelyä. Kemikaalit on ryhmitelty niiden ominaisuuksien perusteella ryhmiin. Fysikaalista vaaraa aiheuttavat kemikaalit ovat ryhmitelty: räjähtäviin (E), hapettaviin (O), erittäin helposti syttyviin (F+), helposti syttyviin (F) ja syttyviin (R10). (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus vaarallisten aineiden luettelosta 509/2005.)

Syttyvät kaasut määritellään ja luokitellaan niiden syttymisalueen perusteella vaikiopaineisessa 20 °C ilmassa. Kategoriaan 1 kuuluvat kaasut ovat syttyviä enintään 13 tilavuusprosentin seoksena ilman kanssa tai niillä on vähintään 12 prosenttiyksikön syttymisalue ilman kanssa riippumatta alemmasta syttymisrajasta. Kategoriaan 2 kuuluvat kaasut, joilla on tietty syttymisalue ilman kanssa, mutta ne eivät täytä muita kategorian 1 kriteereitä. Syttyvän kaasun luokittelu määrittää

sen GHS-varoitusmerkin, huomiosanat, vaaralausekkeen, sekä turvalausekkeet. Syttyvien kaasujen merkintöjä niiden kategorian perusteella on esitetty taulukossa 1. (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus aineiden ja seosten... 1272/2008.)

TAULUKKO 1: Syttyvien kaasujen merkinnät

Luokitus	Kategoria 1	Kategoria 2
GHS-varoitusmerkki	 GHS02	Ei varoitusmerkkiä
Huomiosana	Vaara	Varoitus
Vaaralauseke	H220: Erittäin helposti syttyvä kaasu	H221: Syttyvä kaasu

3.2 Syttyvien kaasujen ominaisuuksia

Räjähdyksvaaran arvioinnissa tulee tuntea käytettävän kemikaalin räjähdysvaaraa aiheuttavat ominaisuudet sekä leviämisen että syttymisen kannalta (Direktiivi 1999/92/EY). On oleellista tietää myös laitteiston materiaalivaatimusten ja suunnittelun kannalta olennaiset tiedot. Suljettua laitteistoa suunnitellessa on tärkeää tuntea myös aineiden reaktiivisuus eri materiaalien kanssa (Direktiivi 94/9/EY).

Aineen itsesyttymislämpötila määrittää sen syttymisryhmän. Itsesyttymislämpötilassa tai sitä korkeammassa lämpötilassa aine syttyy palamaan ilman ulkopuolista syttymislähdettä. Syttymisryhmä vaikuttaa sähkölaitteiden valintaan taulukon 2 mukaisesti, käytettävän laitteiston pinnan lämpötila ei saa olla lähellä aineen itsesyttymislämpötilaa (Jespen 2016, 24)

TAULUKKO 2: Syttymisryhmät ja sähkölaitteiden suurimmat pintalämpötilat

Syttymisryhmä	Kaasun itsesyttymislämpötila [°C]	Sähkölaitteen suurin sallittu pintalämpötila [°C]
T1	>450	450
T2	300–450	300
T3	200–300	200
T4	135–200	135
T5	100–135	100
T6	85–100	85

Toinen merkityksellinen syttymiseen liittyvä ominaisuus on minimisyttymisenergia (MIE). Se määrittää kaasun räjähdysryhmän ja määritetään pienimpänä mahdollisena energiamääränä, joka vaaditaan sytyttämään ilma-kaasuseos. Vaadittu energiamäärä vaihtelee seoksen konsentraation suhteen ja arvo määritetään seoksessa, jonka konsentraatio on syttymisen kannalta optimaalisin. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2017, 13.)

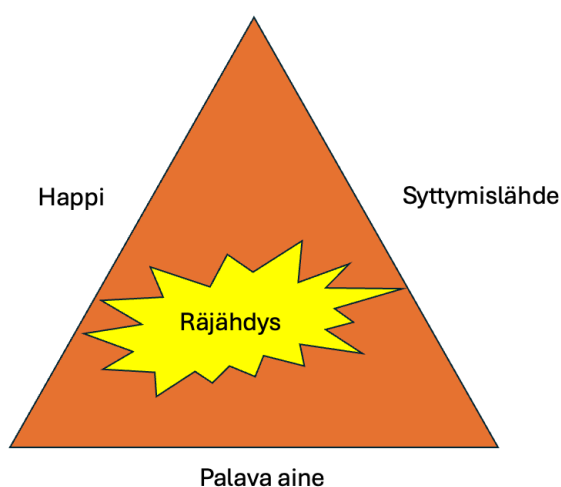
Kaasujen räjähdysryhmiä sekä niiden määrittelyperusteita on esitetty taulukossa 3. Eniten huomiota räjähdysvaaran tarkastelun kannalta vaatii ryhmä IIC. Tähän ryhmään kuuluvien aineiden minimisyttymisenergia on niin matala, että jopa staattisen sähköön purkaus voi toimia niiden syttymislähteenä. Minimisyttymisenergiaan vaikuttaa niin moni tekijä, että räjähdysryhmä kuvaa vain sen koluokkaa. (Jespen 2016, 25.)

TAULUKKO 3: Räjähdysryhmien määrittelyperusteet

Räjähdysryhmä	Minimisyttymisenergia ilmassa [mJ]
IIA	>0,2
IIB	0,002–0,2
IIC	esim. 0,009 ja 0,016

3.3 Räjähdykselpoiset ilmaseokset

Räjähdyksen syntymistä kuvataan usein räjähdyskolmion avulla (kuvio 3). Kolmio kuvaa kolmea räjähdyksen aiheuttavaa tekijää. Hapetta ja palavaa ainetta tulee esiintyä oikeassa suhteessa, ja niiden lisäksi tulee esiintyä syttymislähde. (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 8.) Räjähdykselpoisessa ilmaseoksessa palaminen leviää syttymisen jälkeen koko seoksen laajuudelle (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 60).



KUVIO 3: Räjähdykskolmio

Palavan aineen räjähdysvaaraa aiheuttavien ominaisuuksien määrittelyn lisäksi on selvitettävä sen leviämiseen ja syttymiseen liittyvät ominaisuudet. Näiden avulla voidaan tarkastella, minkälaisissa olosuhteissa aine muodostaa ilmaan sekoittuessaan räjähdyselpoisen ilmaseoksen. Tämän jälkeen tutkitaan mihin seos voi muodostua ja onko sitä vaaraa aiheuttava määrä. (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 17–19.) Tutkiessa räjähdyselpoisen ilmaseoksen syntymisen mahdollisuutta on selvitettävä seoksen räjähdysrajat, sekä käsiteltävien palavien aineiden suurimmat ja pienimmät pitoisuudet. Seos ei ole räjähdyselpoista, jos palavan aineen pitoisyys hapen suhteen pysyy räjähdysrajojen ulkopuolella. (Jespen 2016, 38.)

Räjähdyks on mahdollinen, kun palavaa ainetta sekoittuu ilmaan pitoisuudeltaan sopiva minimimäärä. Tätä kutsutaan alemmaksi räjähdysrajaksi. Ylempi räjähdysraja on vastaavasti pitoisuuden yläraja, jonka jälkeen seos sisältää liian paljon

palavaa ainetta räjähtääkseen. Aineen räjähdysrajat on määritetty normaalin ilmanpaineen olosuhteissa, joissa lämpötila vaihtelee -20 °C ja 60 °C välillä ja paine on 0,8 bar ja 1,1 bar välillä. (Euroopan yhteisöjen komissio 2003, 51.) On tärkeää ottaa huomioon, että lämpötilan kasvaessa ja paineen kasvaessa räjähdysrajojen väli suurenee. Tämän takia räjähdysrajat muuttuvat aiemmin määritettyjen olosuhteiden ulkopuolella. (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 15.)

Ennen laitteiston käyttöönottoa on myös määriteltävä, mihin räjähdyskelpoista ilmaseosta voi muodostua tilassa. Määrittelyssä otetaan huomioon päästön kesto, määrä, pitoisuus, päästölähteen geometria, purkautumisnopeus, aineen suhteellinen tiheys, ilmanvaihto ja muut pilven laajuuteen vaikuttavat tekijät. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2017, 14) Ilmaa raskaammat kaasut kertyvät suljetun tilan alaosaan ja kevyemmät vastaavasti tilan yläosaan. (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 18–19.)

Seosta ei tarvitse ottaa huomioon räjähdys-suojausasiakirjassa, jos se ei ole normaalipaineessa, se muodostuu vain ennalta arvaamattomissa onnettomuustilanteissa tai ilma on suurimmaksi osaksi korvattu inerttikaasulla. Nämä tilanteet eivät ole kuitenkaan vaarattomia ja räjähdys-suojausasiakirjan sijasta ne tulisi ottaa huomioon osana muuta riskienhallintaa. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2017, 15)

3.4 Tilaluokittelu ja räjähdysvaaran määrittäminen

Räjähdyskelpoista ilmaseosta tulee olla tilassa vaaraa aiheuttava määrä, jotta sitä kutsutaan räjähdysvaaralliseksi ilmaseokseksi. Tällaisten seosten esiintyessä tilat on luokiteltava räjähdysvaarallisiksi. (Valtioneuvoston asetus räjähdyskelpoisten... 576/2003.) Kaasu -ilmaseosten räjähdysvaarallisuutta tutkitaan kolmen kynnysehdon avulla. Aineen pitoisuus ilmassa tulee olla räjähdysrajojen puitteissa, seosta tulee olla tilassa vaaraa aiheuttava määrä ja tilassa tulee olla aktivoitumiskelpoinen syttymislähde. (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 14.)

Räjähdysvaarallinen tila jaetaan eri tilaluokkiin sen perusteella, kuinka usein räjähdyskelpoista ilmaseosta esiintyy. Tilaluokan laajuus määritellään sen perus-

teella, kuinka laajalle alueelle kyseinen räjähdyskelpoinen ilmaseos ulottuu. Tila-
luokituksen tehtävänä on helpottaa käytettävien laitteiden valintaa, sekä määri-
tellä toteutettavien hallinnollisten ja räjähdysuojatoimenpiteiden laajuutta. (Di-
rektiivi 1999/92/EY.)

Vetyvuotojen aiheuttaman vaaran arvion suhteen kaksi harkittavaa tilannetta ovat
putkivuoto laitteiston halkaisijaltaan suurimmasta putkilinjasta, sekä putkilinjasta,
jossa on isoin paine. Putkivuodon aiheuttavan reiän koon katsotaan olevan 10 %
putken poikkipinta-alasta. Nämä kaksi tilannetta ovat vaaran arvioinnin suhteen
määrittäviä. Laskennassa hyödynnetään mallinnusohjelmia, kuten Phast. (Kar-
piola 2024.) Räjähdysvaarallinen alue voi olla joissain tilanteissa mitättömän
pieni, jos päästönopeus tai sen määrä on mitätön laimentumistilavuuteen näh-
den. Tällaista tilaa pidetään yleisesti räjähdysvaarattomana, sillä syttymisen ta-
pahtuessa seuraukset olisivat vähäiset. (SFS 60079 2021, 17.) Tällaisilla alueilla
ei lähtökohtaisesti tarvitse torjua aktivoitumiskelpoisia syttymislähteitä. (Jespen
2016, 98.)

Räjähdysvaarallisissa tiloissa toteutetaan ensisijaisesti räjähdysuojatoimenpi-
teitä, joilla estetään räjähdyskelpoisten ilmaseosten syntyminen. Näiden toimen-
piteiden tehokkuus tulee tutkia erilaisissa laitteistojen toimintatiloissa, jotta voi-
daan määritellä tarve muille toimenpiteille. Jos vaarallisen räjähdyskelpoisen il-
maseoksen syntyminen on varmasti estetty ei ole tarvetta muille toimenpiteille.
(Euroopan yhteisöjen komissio 2003, 21) Jos seosten syntymistä ei voida estää
harvinaisissakin häiriötiloissa, on estettävä niiden syntyminen. Tämä tehdään tor-
jumalla aktivoituvat syttymislähteet niin, että niiden samanaikainen esiintyminen
räjähdyskelpoisten ilmaseosten kanssa on erittäin epätodennäköistä. Muussa ta-
pauksessa turvaudutaan rakenteellisiin toimenpiteisiin, jotka pienentävät räjäh-
dysten vaikutuksia. (Euroopan yhteisöjen komissio 2003, 15)

4 TOIMINNAN SUUNNITTELU

Tässä kappaleessa käsitellään turvallisuuden arviointia ja siinä huomioon otettavia tekijöitä. Kappaleessa 4.1 käydään läpi suljetussa tilassa tarkasteltavat alueet, niiden mahdollinen luokittelu, sekä määritelmiä vaaralliselle määrälle räjähdyskelpoista kaasu-ilmaseosta. Nämä tekijät on otettava huomioon räjähdysvaaran ensisijaisessa tarkastelussa. Laajemmassa tarkastelussa (kappale 4.2.) otetaan edellä mainittujen tekijöiden lisäksi huomioon myös oppilaitosympäristön vaikutus. Syntyneiden arvioiden pohjalta määritetään tilojen suunnittelun ja laitteiston turvallisen käytön suhteen toteutettavia mahdollisia toimenpiteitä kuvataan kappaleessa 4.3.

4.1 Räjähdysvaara suljetussa tilassa

Räjähdysvaaran mahdollisuutta on tarkasteltava, kun prosessissa on palavia aineita. Tällöin on todistettava luotettavasti, että nämä aineet eivät voi muodostaa ilman kanssa vaarallista määrää räjähdyskelpoista ilma-kaasuseosta. Määrittelyssä otetaan huomioon tavanomaiset toimintaolosuhteet mukaan lukien kunnossapito, käyttöönotto ja alasajo. Tämän lisäksi huomioidaan myös erilaiset toimintahäiriöt ja kohtuudella ennakoitavissa oleva virheellinen käyttö. (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 13.)

Perinteisesti räjähdyskelpoisen ilmaseoksen muodostumista tarkastellaan erikseen laitteiston sisällä ja sen ulkopuolella. Tämän jälkeen tilat luokitellaan seoksen esiintymistodennäköisyyden (taulukko 4) mukaan. Palavia aineita sisältävän laitteiston sisätila on luokiteltava, jos ilman pääsy laitteistoon on mahdollista (SFS 60079 2021, 16–20.) Laitteiston sisältäessä sekä happea että palavaa ainetta on otettava huomioon myös kaasujen sekoittuminen laitteiston sisällä (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024, 8). Laitetoimittaja vastaa tyypillisesti laitteiston sisäosien luokittelusta parhaalla teknisellä tiedolla (Karpiola 2024).

TAULUKKO 4: Räjähdyksvaarallisten tilojen luokitus

Tilaluokka	Räjähdykskelpoisen ilmaseoksen esiintyvyys:
0	Jatkuvaa, pitkäaikaista tai toistuvaa.
1	Todennäköisesti ajoittaista normaalikäytössä
2	Ei normaalikäytössä, poikkeustilanteessa lyhytkestoisesti

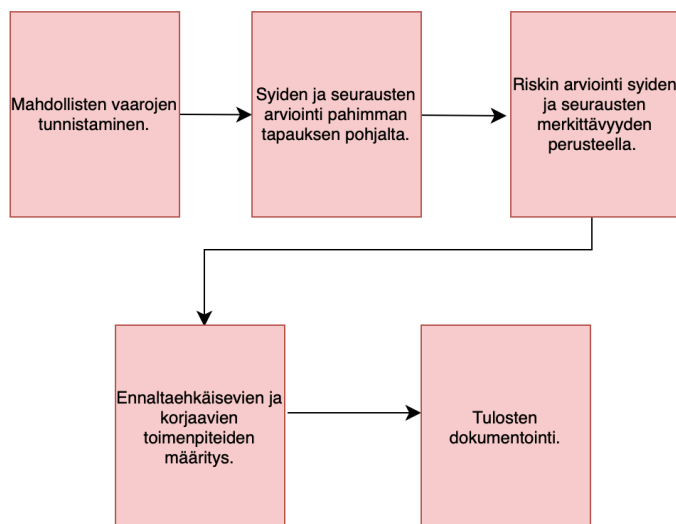
Räjähdykskelpoisen ilmaseoksen esiintymistä laitteiston ulkopuolella tarkastellaan kemikaalin käyttäytymisen mukaisesti. Vedyn ja muiden ilmaa kevyempien kaasujen suhteen huomioitavia vyöhykkeitä ovat laitteiston välitön läheisyys sekä suljetun tilan korkeimmat kohdat. Vyöhykkeiden sijainnin määrittämisessä tulee ottaa huomioon myös laitteiston paineen aiheuttama vuototyyppi. Tämän tarkastelun tuloksena on tieto siitä, minkälainen ilmasto tilassa on oltava ja millä alueilla esiintyviä syttymislähteitä tulee tarkastella. Tämän lisäksi vyöhykkeiden sijainnin määrittely vaikuttaa esimerkiksi kaasuilmaisimien sijoitukseen (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 25–26.)

Räjähdykskelpoinen ilmaseos aiheuttaa vaaraa, kun sitä on tarpeeksi suuri määrä. Yli 10 litran suuruinen yhtenäinen määrä katsotaan suljetussa tilassa aina vaaralliseksi. Karkeaa arviointia varten on todettu, että räjähdyskelpoisen ilmaseoksen vaaraa aiheuttavan määrän raja-arvona pidetään 0,01 % huoneen tilavuudesta. Tällöin räjähdysvaarallisena pidetään tilan osaa, jossa seosta voi esiintyä. (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 14.)

4.2 Riskinarvioinnin menetelmiä

HAZID menetelmä (eng. *hazard identification*) perustuu riskien tunnistamiseen projektin alkuvaiheessa. Tunnistetut riskit luokitellaan ja tämän jälkeen kirjataan toimenpiteet, joita toteutetaan projektin edetessä. (Karpiola 2024.) HAZID tarkastelussa lähtötietoina on alustavat tiedot prosessista, sekä siinä käytettävästä teknologiasta (Ruuska 2023). Tuloksia voidaan hyödyntää projektin myöhemmässä vaiheessa pohjana tarkemmalle HAZOP-tarkastelulle (Guidelines for hazard evaluation procedures 2008, 74). Menetelmää on kuvattu kuviossa 4. Ensimmäisessä vaiheessa tunnistetaan mahdollisesti vaaraa aiheuttavat tilanteet huomioiden: laitteiston tyyppi, käytettävät materiaalit, ympäristön vaikutukset, laitteiston

materiaalivalinnat, operointitekijät, sekä turvavälineet. Tämän jälkeen pohditaan pahinta mahdollista tilannetta ja kartoitetaan sen syitä ja seurauksia. Näiden merkittävyyden pohjalta tehdään riskinarvio, joka on perusteena turvatoimenpiteiden priorisoinnille. (Guidelines for hazard evaluation procedures 2008, 74–76.)



KUVIO 4: Alustavan riskinarvion muodostus.

Ennen tulosten dokumentointia tulee määrittää mahdolliset ennaltaehkäisevät ja korjaavat toimenpiteet, jotka auttavat hahmottamaan riskien hallinnan strategiaa hankkeen myöhemmissä vaiheissa. Tulokset dokumentoidaan taulukkoon, jossa esitetään tunnistettu vaara, sen aiheuttavat tekijät, merkittävimmät seuraukset, riskiluokitus sekä suositellut jatkotoimenpiteet. (Guidelines for hazard evaluation procedures 2008, 76.)

Inhimillisten tekijöiden aiheuttamaa riskiä voidaan kartoittaa toimintovirheanalyysin avulla. Menetelmässä käydään läpi laitteiston käyttöohjeet ja pohditaan, miten laitteistoa on mahdollista käyttää väärin ohjeiden perusteella. Tämän jälkeen kartoitetaan seurausten vakavuutta ja muodostetaan kehitysehdotuksia riskin vähentämiseksi. (Karpiola 2024.)

4.3 Suojatoimenpiteet

4.3.1 Syntymisen estäminen

Räjähdyskelpoisen ilmaseoksen syntymiseen voidaan vaikuttaa eri prosessiparametreilla, kuten korvaamalla palava aine, rajoittamalla sen pitoisuutta prosessissa, sekä inertoinnilla eli syrjäyttämällä laitteiston sisällä oleva happi reagoimattomalla kaasulla. (SFS-EN 1127-1 2019, 16–18.) Pitoisuuden rajoittamista on harkittava, jos palavien aineiden käsittelyä ei voida välttää. Rajoittamista valvovia toimenpiteitä ei tarvita, jos prosessille ominaiset pitoisuudet ovat riittävästi räjähdysrajojen ulkopuolella. Muussa tapauksessa voidaan harkita esimerkiksi kaasuilmaisinten asennusta tilaan. (SFS-EN 1127-1 2019, 17.)

Kaasuilmaisinten käyttöä varten tulee suljetussa tilassa olla riittävä tieto palavien aineiden ominaisuuksista ja päästölähteiden sijainnista. Näiden tietojen avulla voidaan määritellä seoksen todennäköisimmät esiintymispaikat. Laitteiston toiminnan luotettavuus, toimintakyky ja nopeus tulee myös ottaa huomioon. Suojatoimenpiteiden seurauksia tulisi myös harkita, jotta niiden virheellisestä käynnistymisestä ei olisi vaaraa ulkopuolisille. (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 25.)

Laitteiston valmistaja on lain mukaan vastuussa tiettyjen vaatimusten täytymisestä. Laitteisto ei itse saa aiheuttaa räjähdystilaa tai toimia syttymislähteenä. Tämän lisäksi laitteiston mukana on toimitettava ohjeet koskien vaaratonta käyttöä ja käyttöönottoa. Tämän lisäksi ohjeissa on oltava tarvittavat tiedot määrittämään, minkälaisissa ympäristöissä ja toimintaolosuhteissa laitteistoa voi käyttää. (Direktiivi 94/9/EY.)

Laitteiston sisälle muodostuvan räjähdysvaarallisen ilmapiirin esiintymisen todennäköisyyttä vähennetään suljetun laitteiston käytön lisäksi inertoimalla eli lisäämällä prosessiin inerttikaasuja. Niiden tehtävä on syrjäyttää laitteiston sisällä olevasta kaasuseoksesta happea. (SFS-EN 1127-1 2019, 17.) Ennen huoltotoimenpiteiden toteuttamista ja laitteiston alasajossa laitteet tulee tyhjentää palavasta aineesta ennen avaamista (SFS käsikirja 59 2022, 11). Putkistossa oleva ylipaine aiheuttaa vedyn ulosvuodon sen sijaan, että happea pääsisi sisään laitteistoon (Karkiola 2024).

4.3.2 Laimentaminen ja ilmanvaihto

Ilmanvaihdon määrä suljetussa tilassa tulee mitoittaa niin, että tilassa olevan palavan kaasun tilavuus ei ylitä 25 % alemmasta räjähdysrajasta. Ilmanvaihdon toiminnan tulee olla tarpeeksi varma, sillä sen vikaantuminen tai pysähtyminen johtaa huoneessa olevan tilaluokan muuttumiseen. Tällaisessa tilanteessa tulee tilaluokan aiheuttavan laitteen kytkeytyä jännitteettömäksi. Poikkeuksena pidetään tilannetta, jossa voidaan varmistaa kaasuilmaisinten avulla kaasun määrän pysyvän alle 25 % räjähdysrajasta. Tällöin laitetta voidaan käyttää tilapäisesti. (SFS käsikirja 59 2022, 16–17.) Päästömäärän ollessa tarpeeksi rajallinen se voidaan hajauttaa kokonaan joko koneellisella tai luonnollisella ilmanvaihdolla (SFS 60079 2021, 24).

Luonnollinen ilmanvaihto perustuu paine-eroihin, joita aiheuttavat esimerkiksi erilaiset tuulet ja lämpötilaerot. Suljetussa tilassa tämä toteutetaan pysyvillä aukoilla, joiden tehtävänä on laimentaa päästöt turvallisesti. Menetelmän tehokkuudessa on kuitenkin suuriakin vaihteluita. (SFS 60079 2021, 24) Koneellisen ilmanvaihdon käyttö on tavanomaisempaa suljetuissa tiloissa. Oikein toteutettuna sen avulla voidaan lieventää tilaluokituksen tyyppiä tai estää räjähdysvaarallisen kaasu-ilmaseoksen muodostuminen kokonaan. Koneellisen ilmanvaihdon tyyppiä on yleisilmanvaihto ja paikallinen kohdepoisto. (SFS 60079 2021, 25–26.)

Laimenemisen tehokkuus jaetaan heikkoon, keskimääräiseen ja tehokkaaseen laimenemiseen. Heikko laimeneminen voi tiukentaa tilan luokitusta, kun taas tehokas laimeneminen lieventää sitä. Tehokkuuden lisäksi tulee ottaa huomioon ilmanvaihdon käytettävyyden. (SFS 60079 2021, 28.) Varsinkin alhaisen päästönopeuden päästölähteiden suhteen suositellaan käyttämään paikallispoistoja, sillä niillä voidaan poistaa palavaa ainetta suoraan päästölähteen alueelta. Paikallinen koneellinen ilmanvaihto tulisi kuitenkin suunnitella niin, että kaasua ei pääse poiston vaikutusalueen ulkopuolelle. (SFS 60079 2021, 61.)

Kevyiden kaasujen kertyessä tilan korkeimpiin kohtiin tulee muistaa tilan kattorakenteiden suunnittelu niin, että katossa ei sijaitse tiiviisti aseteltuja putkilinjoja tai palkkeja, joiden väliin voisi syntyä kertymiä (SFS 60079, 29). Poistot tulisi myös sijoittaa seoksen todennäköisiin kertymäkohtiin. Tällöin päästöt voidaan johtaa suljetusta tilasta ulkoilmaan, missä ne hajaantuvat ympäristöön. (SFS 60079,

102.) Ilmanvaihtokanavien ja poistojen tulee olla erilliset kiinteistön muuhun ilmanvaihtoon nähden ja ne tulee suunnitella siten, että koko tila tuulettuu. (SFS-käsikirja 59, 2022.)

4.3.3 Syttymislähteiden tarkastelu

Syttymislähteitä tarkastellaan määrittämällä räjähdyskelpoisen ilmaseoksen syttymisominaisuudet kuten pienin syttymisenergia ja itsesyttymislämpötila. Aktivointukelpoiset syttymislähteet luokitellaan esiintyvyyksiheyden perusteella. (SFS-EN 1127-1, 10.) Mahdollisina syttymislähteinä käsitellään kuumia pintoja, liekejä, staattista sähköä ja sähkölaitteita. Kuuma pinta voi sytyttää räjähdyskelpoisen seoksen palamaan saavuttaessaan sen syttymislämpötilan. Tämän takia on varmistettava, että tilassa olevien laitteiden ja niiden osien lämpötilat pysyvät tarpeeksi paljon tämän lämpötilan alapuolella. Liekit tai kipinät toimivat myös syttymislähteinä, joten niiden esiintymistä tiloissa tulisi estää. (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 31.)

Sähkölaitteet toimivat syttymislähteinä pääasiassa kahdella tavalla. Virtapiirejä avatessa ja sulkiessa voi syntyä sähkökipinöitä, jonka lisäksi sähkölaitteet voivat muodostaa kuumia pintoja ylikuumentuessaan. Staattinen sähkö voi myös aiheuttaa sytytyskelpoisia purkauksia. Sähköä johtavat esineet olisi hyvä maadoittaa ja heikosti sähköä johtavien materiaalien, kuten muovien käyttöä tulisi välttää staattisten purkausten aiheuttaman vaaran vähentämiseksi. (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 32–33.)

5 TURVALLISUUSKARTOITUS

Useilla oppilaitoksilla on esiselvitys- ja määrittäsvaiheessa laboratoriomittakaavan vetyelektrolyysilaitteiston hankinta. Tämän turvallisuuskartoituksen tarkoituksena on kuvata laitteiston käytöstä aiheutuvaa mahdollista vaaraa ja kartoittaa räjähdysturvallisuustoimenpiteiden määrää ja laatua suunnitteluvaiheessa. Työssä määritetään turvallisia toimintatapoja laitteiston käytön ja käyttöönoton suunnitteluun. Vaikka räjähdysvaaraa prosessista ei tyypillisesti katsottaisi aiheutuvan ja näin ollen räjähdysuojasiasiakirjan laatiminen ei olisi välttämätöntä, on otettava huomioon oppilaitosympäristön vaikutus. Opiskelijoiden voidaan olettaa käyttävän laitteistoa ensimmäistä kertaa ja tämän vuoksi inhimillisten tekijöiden vaikutus korostuu. Tämän lisäksi tulee muistaa oppilaitosympäristön erityistekijät, kuten tiloissa ja niiden läheisyydessä liikkuvat ihmiset.

Kartoituksen ensimmäisessä vaiheessa (kappaleet 5.1 ja 5.2) esitetään lähtötiedot prosessin laitteistosta, vaaraa aiheuttavista materiaaleista, sekä ympäristön vaikuttavista tekijöistä. Tämän jälkeen kappaleessa 5.3 tunnistetaan mahdolliset vaarat pahimman mahdollisen tapauksen pohjalta ja arvioidaan, minkälaisissa tilanteissa räjähdysvaaraa voi syntyä. Kappaleessa 5.4 dokumentoidaan riskinarvion tulokset ja määritetään suositellut ennaltaehkäisevät ja korjaavat toimenpiteet. Tarkkojen prosessisuureiden puutteellisuuden vuoksi riskin merkittävyyttä ei voida määrittää yksikäsitteisesti, joten jatkotoimenpiteiden priorisointiin ja tarpeellisuuteen ei oteta kantaa.

5.1 Menetelmän kuvaus ja työskentelytilat

Vetyelektrolyysilaitteiston toimintaa on kuvattu kappaleessa 2.2. Prosessissa käytetään sähköä, jotta voidaan erottaa tislatus vedestä vetykaasua. Toisena tuotteena prosessista syntyy happea. Laboratorio-olosuhteissa syntyvän vedyn kokonaismäärät prosesseista pidetään usein pieninä. Liitteessä 1 on taulukoitu kahden eri valmistajan laitteiden vaatimia tehoja, sekä vetykaasun saantomääriä. Tästä nähdään laitteistojen saannon olevan keskimäärin kokoluokkaa 0,01–0,2 litraa minuutissa 0,003–1 kW teholla. Syntyvän vedyn määrään vaikuttaa prosessin saannon lisäksi samanaikaisesti käytettävien laitteiden määrä.

Räjähdyksvaaran todennäköisyyttä arvioitiin pienessä 10 neliömetrin kokoisessa luokkatilassa. Huoneen tilavuudeksi arvioitiin 25 m³ huonekorkeuden ollessa 2,5 metriä. Tästä laskettiin huoneen tilavuuden olevan 25 000 litraa. Laskennan helpottamiseksi oletettiin, että tilassa ei ole lainkaan ilmastointia ja vetyä ei pääse ulos tilasta. Tämän lisäksi oletettiin sisällön menettämisen olevan tilanteessa kokonaisvaltaista, eli kaiken tuotetun vedyn oletettiin karkaavan laitteistosta huoneilmaan.

5.2 Vedyn ominaisuudet

Räjähdyksvaaraa aiheuttava aine prosessissa on vety, joka muodostaa ilman kanssa sopivassa suhteessa sekoittuessaan räjähdyskelpoisen ilmaseoksen. Taulukossa 5 on esitetty vedyn räjähdysvaaran arvioinnin kannalta oleellisia tietoja.

TAULUKKO 5: Vedyn ominaisuuksia (SFS-EN ISO/IEC 80079-20-1 2019, 81.)

Nimitys	Vety
Käyttötarkoitus	Prosessin tuote
Luokitus	Erittäin helposti syttyvä kaasu
Itsesyttymislämpötila	560 °C
Syttymisrajat	4 % - 77 %
Suhteellinen tiheys	0,07
Syttymisryhmä	T1
Räjähdyksryhmä	IIC
Minimi syttymisenergia ilmassa	0,017 mJ

Vety on suhteellisen tiheydensä perusteella ilmaan verrattuna kevyt kaasu. Tämän seurauksena se kerääntyy tyypillisesti suljetun tilan korkeimpiin kohtiin. Syttymisryhmä T1 määrittää vedyn käsittelyssä käytettävien sähkölaitteiden suurimaksi mahdolliseksi pintalämpötilaksi 450 °C ja räjähdysryhmään IIC kuulumisen tarkoittaa vedyn syttyvän jopa staattisen varauksen aiheuttamana. Vaaraa arvioidessa varsinkin suljetussa tilassa tulee siis ottaa huomioon mahdollisuus siitä, että huoneessa olevan ilman vetykonsentraatio on syttymisrajojen puitteissa, sekä vedyn suhteellisen tiheyden aiheuttama mahdollisuus kaasun kerrostumiselle katon rajaan.

Tämän lisäksi vedyn säilytystä ja käsittelyä suunniteltaessa tulee huomioida sen pieni molekyylikoko, jonka takia pienistä raoista tunkeutuva vety aiheuttaa usein vuotoja. Tämä tulisi ottaa huomioon varsinkin sisätiloihin sijoitettavan laitteiston suunnittelussa. Pienten vetyvuotojen aiheuttama konsentraatio nousee harvoin hyvin ilmastoidussa tilassa sellaiselle tasolle, että siitä olisi vaaraa. (Turvallisuus ja kemikaalivirasto 2024, 36.) Korkeapaineinen vety voi saavuttaa purkautuessaan itsesyttymislämpötilansa, jonka seurauksena se voi syttyä ilman ulkoista syttymislähdettä (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024, 4).

5.3 Räjähdyksvaaran alustava arvio

Vedyn räjähdysvaaraa aiheuttavan määrän hahmottamiseksi laskettiin, kuinka pitkään esimerkkilaitteistoa voidaan käyttää, kunnes se on tuottanut tarpeeksi vetyä, jotta vedyn suhde huoneilmaan on räjähdysrajojen puitteissa. Tämä tehtiin laskemalla se määrä vetyä ilmassa, joka ylittää alemman räjähdysrajan. Lopuksi laskettiin kuinka pitkään laitteiston saannolla kestää tuottaa tämä määrä vetyä. Laskennassa käytettäviä lähtöarvoja on kirjattu alle taulukkoon 6.

TAULUKKO 6: Ainemäärän arviointitilanteen lähtöarvot

Lähtötiedot	Alustava arvio
Huoneen tilavuus [l]	25 000
Vedyn alempi syttymisraja [til-%]	4
Laitteiston saanto [l/min]	0,2

Se määrä vetyä, joka ylittää alemman räjähdysrajan konsentraation huoneilmassa $v_{max,1}$ laskettiin tilavuusprosentteina koko huoneen tilavuudesta. Huoneen tilavuutta on merkitty v_1 ja vedyn alemmaa syttymisrajaa LEL.

$$v_{max,1} = v_1 \cdot LEL = 25\,000\text{ l} \cdot 0,04 = 1\,000\text{ l}$$

Tämän jälkeen laskettiin aika, joka laitteiston saantomäärällä kestäisi yllä määrätyn vetymäärän tuottamiseen. Laitteiston saantoa on merkitty s ja tuottamiseen vaadittua aikaa t_1 .

$$t_1 = \frac{v_{max,1}}{s} = \frac{1\ 000\ l}{0,2\ l/min} = 5\ 000\ min = 83\ h$$

Tästä tuloksesta katsoessa voitiin päätellä, että yhden laitteiston saannolla kestää arviolta 83 tuntia tuottaa se määrä vetyä, joka on 4 % huoneilman tilavuudesta ja koko huoneilman tilavuus olisi räjähdysrajojen sisäpuolella. Tämän jälkeen harjittiin mahdollisuutta siitä, miten useamman laitteiston samanaikainen käyttö vaikuttaisi tulokseen. Tämän lisäksi otettiin huomioon vedyn käyttäytyminen suljetussa tilassa ja laskettiin kuinka pitkään kestäisi, jotta vetyä olisi tarpeeksi kyllästämään esimerkiksi 5 cm korkuinen kerros huoneen yläosaan. Tässäkin tilanteessa otettiin samankaltaisesti huomioon useamman elektrolyysilaitteiston käytön vaikutus. Laskennassa käytettyjä lähtöarvoja ja laskennan tuloksia on kirjattu taulukkoon 7.

TAULUKKO 7: Alustavan vaaran arvioinnin lähtöarvoja ja tuloksia

	Koko tilan täytyminen		5 cm kerrostuman muodostuminen	
	Yksi laitteisto	kymmenen laitteistoa	Yksi laitteisto	Kymmenen laitteistoa
Tilavuus (l)	25000	25000	500	500
Alempi syttymisraja (til-%)	4	4	4	4
Vedyn määrä (l)	1000	1000	20	20
Saanto (l/min)	0,2	2	0,2	2
Aika (min)	5000	500	100	10

Tuloksia tarkastellessa voitiin huomata huoneilman kyllästyksen olevan todella hidasta vedyn levitessä koko huoneen tilavuuteen tasaisesti. Tällaisessa tilanteessa räjähdyskelpoisen ilmapiirin muodostumiseen kestäisi yhden laitteiston saantomäärällä noin 83 tuntia ja kymmenen laitteiston saannolla noin 8 tuntia. Huomattiin myös, että vedyn noustessa tilan yläosaan ja kerrostuessa kestää huomattavasti vähemmän aikaa muodostaa 5 cm korkuinen kerros, jonka konsentraatio on räjähdysrajojen puitteissa. Näiden tekijöiden takia vetykaasun hajuttamista tilaan tulisi edesauttaa.

Räjähdyksvaaran määritelmän täyttymiseksi tulee tilassa olla räjähdyskelpoista ilma-kaasuseosta vaaraa aiheuttava määrä. Vaikka laskennan tavoitteena ei ollut mallintaa räjähdysvaarallisen tilan muodostumista käytännössä, voidaan sen perusteella kartoittaa saannon määrää. Kappaleessa 4.2 todettiin vaaraa aiheuttavan määrän raja-arvon olevan 0,01 % huoneen tilavuudesta tai 10 litran suurinen yhtenäinen määrä huoneen koosta riippumatta. 25 m³ huonetilassa tämä tarkoittaisi vain 2,5 litraa räjähdyskelpoista ilmaseosta.

Tämän laskennan tavoitteena ei ollut mallintaa räjähdysvaarallisen tilan muodostumista käytännössä, vaan auttaa hahmottamaan laitteiston saantoa ja sen suhdetta huoneen tilavuuteen. Arvion pohjalta ei voida tehdä johtopäätöksiä laitteiston käytön aiheuttamasta kokonaisriskistä tai räjähdysvaaran olemassaolosta, sillä kaasun käyttäytymistä ei voitu mallintaa oikeaoppisesti ja prosessista saatavan vedyn määrä ei ollut tiedossa. Voidaan kuitenkin todeta, että laitteiston käyttöolosuhteiden tulisi olla todella epäedulliset, jotta tila olisi räjähdysvaarallinen. Laskennan pohjalta on kuitenkin perusteltavissa tarve laitteiston käyttötilojen suunnittelulle ja laitteiston saannon rajoittamiselle.

5.4 Vaaran arviointi ja suositeltavat toimenpiteet

Prosessissa vety ja happi voivat sekoittua kolmella eri tavalla. Laitteiston sisällä oleva vety voi vuotaa huoneilmaan, huoneilmassa oleva happi voi vuotaa sisään laitteistoon ja laitteiston sisällä olevat tuotekaasut voivat sekoittua keskenään. Näistä tilanteista aiheutuvien vaaratilanteiden kuvauksia ja niiden perusteella suositeltuja suojatoimenpiteitä on esitetty taulukossa 8. Tyypillisesti vaaratilanteiden aiheuttamaa riskiä arvioitaisiin sen todennäköisyyden ja seurausten vakavuuden perusteella. Oppilaitosympäristössä oletetaan laitteiston virheellisen käytön lisäävän vaaratilanteiden todennäköisyyttä. Lisäksi on perusteltua olettaa minkä tahansa oppilaitoksessa tapahtuvan syttymis- tai räjähdystapahtuman seurausten olevan luonteeltaan vakavat.

TAULUKKO 8: Riskinkartoitus ja suositeltavat toimenpiteet

Vaaratilanne	Toimenpiteet
Vetyvuoto laitteistosta kerrostuu suljetun tilan katonrajaan muodostaen vaarallisen määrän räjähdyskelpoista seosta.	Kaasuilmaisimet katonrajaan Tilan kattorakenteiden suunnittelu Yleinen ilmanvaihto
Vetyvuoto alhaisella paineella jää laitteiston läheisyyteen.	Paikallispoistot Syttymislähteiden tarkastelu
Huoneilman vuoto laitteistoon aiheuttaa räjähdysvaaran	Suljetun laitteiston käyttö Liitoskohtien varmistus Ylipaine laitteistossa.
Ilmaa laitteistossa prosessin käynnistyessä, valmistuva vety sekoittuu laitteen sisällä olevaan ilmaan aiheuttaen räjähdyskelpoisen ilmaseoksen.	Inertointi
Väärin tehdyt liitännät tai erotuskalvon vaurioituminen johtaa tuotekaasujen sekoittumiseen laitteistossa	Laitteiston käyttö ohjeiden mukaan Toimintovirheanalyysi

Mahdollisia vaaratilanteita on arvioitu olettaen, että laitteiston sisällä oleva vety ei ole korkeapaineista ja tilassa tai laitteistossa ei esiinny suuria lämpötilaeroja. Lisäksi on oletettu, että kyseisessä tilassa ei säilytetä ylimääräistä vetyä tai muita mahdollisesti syttymiskelpoisia kemikaaleja. Vedyn leviämiskäyttäytymisen mukaisesti tarkasteltaviksi vyöhykkeiksi määrytyi laitteiston välitön läheisyys ja suljetun tilan korkeimmat kohdat. Laitteiston materiaaleihin ja rakenteeseen liittyvien turvallisuustekijöiden katsotaan olevan laitteiston valmistajan vastuulla. Käyttäjän vastuulla on käyttää laitetta valmistajan ohjeiden mukaisesti. Laitteiston valmistajalta tulisi myös selvittää laitteiston ympärille jätettävä turvaetäisyys, ilmanvaihdon tehokkuuden kriteerit ja muut tarpeelliset prosessiolosuhteet.

Paikallispoistojen sijoitusta laitteiston yläpuolelle suositellaan ja niiden tulisi olla tarpeeksi tehokkaat johtaakseen kaikki laitteiston päästöt ulos tilasta. Tämän lisäksi tilan yleisen ilmanvaihdon tulisi hajottaa mahdolliset vetypäästöt vaarattomalle tasolle. Yleisen ilmavaihdon poistokanavat tulisi sijoittaa tilan korkeimpiin kohtiin laitteiston yläpuolelle ja kattorakenteissa ei tulisi olla kattopalkkeja tai putkilinjoja, joiden väliin vety voisi kertyä. Ilmanvaihtoa suunnitellessa on huomioitava ilmastointikanavien tilaluokan olevan lähtökohtaisesti sama laitteiston tilojen

kanssa, joten niiden täytyisi olla erilliset kiinteistön muusta ilmanvaihdosta eikä niihin saisi johtaa muita kemikaaleja. Ilmanvaihdon toimivuudesta voidaan varmistua asentamalla tilaan kaasuilmaisimet ja määrittämällä niiden vetypitoisuuden hälytysrajaksi 1 %. Ne tulisi sijoittaa laitteiston yläpuolelle tilan korkeimpiin kohtiin sekä vuotokohtien läheisyyteen.

Laitteistoa kootessa ja prosessia käynnistäessä on tärkeää varmistaa, että ilmaa ei ole jäänyt laitteistoon ja kytkennät on tehty oikein. Tämän lisäksi on varmistuttava laitteiston tiiviyydestä, jotta huoneilmaa ei pääse laitteistoon. Alasajo tulee tehdä niin, että laitteistosta poistetaan kaikki vetykaasu ennen avaamista, jotta se ei pääse huoneilmaan. Kaikki ne laitteiston osat, joiden sisälle vetyä johdetaan tai muodostuu, tulee inertoida laitevalmistajan ohjeiden mukaan. Laitteiston sisällä tulisi olla pieni ylipaine ympäröivään tilaan verrattuna, jotta voitaisiin välttää huoneilman vuotaminen laitteistoon.

Vedyn matalan syttymisenergian ja korkean itsesyttymislämpötilan perusteella voidaan todeta vedyn syttyvän helposti esimerkiksi sähköstaattisten purkausten aiheuttamana. Tämän lisäksi laitteiston läheisyyteen ei saisi tuoda maadoittamattomia sähkölaitteita kuten tietokoneita tai älypuhelimia. Epätodennäköisempiä syttymislähteitä tilassa ovat avoliekit ja kuumat pinnat. Kaikkien näiden esiintymistä tulisi kuitenkin välttää laitteiston läheisyydessä. Sähköstaattisen varauksen rakentumisen estämiseksi tulisi laitteiston läheisyydessä käyttää sähköä johtavia materiaaleja.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Räjähdysvaaraa arvioidessa tärkeimmiksi konkreettisiksi toimenpiteiksi ilmenivät tilan ilmanvaihdon suunnittelu ja käsiteltävien ainemäärien rajoittaminen. Näiden avulla voidaan vaikuttaa huomattavasti prosessista aiheutuvaan räjähdysvaaraan. Erityisen merkittäväksi riskiksi tämän kaltaisessa toiminnassa ilmeni laitteiston väärinkäytön mahdollisuus. Suuri osa laitteiston aiheuttavan vaaran arvioinnista on valmistajan vastuulla, mutta on erityisen tärkeää ottaa huomioon laitteiston käyttäjän velvollisuus käyttää laitteistoa valmistajan määrittämien toiminnallisten parametrien sisällä.

Lain mukaisten vaatimusten kartoitusta hankaloitti vetyspesifin lain puuttuminen, jonka takia oli käytävä läpi useita kansallisia ja Euroopan unionin lakeja. Toimintaa valvovat viranomaistahot oli kuitenkin määritetty selkeästi käsiteltävien ainemäärien perusteella ja pienimittaista käsittelyä valvoo Pelastuslaitos. Laitteiston käyttöönotossa tulisi konsultoida tarvittaessa Pelastuslaitosta ja toiminnan suunnittelussa tulisi ottaa huomioon tulevaisuudessa tarkentuva vetyyn liittyvä lainsäädäntö. Räjähdysvaaran olemassaolo riippuu käsiteltävistä ainemääristä, joten yksiselitteistä vastausta räjähdysvaarallisten tilojen muodostumisesta ei voitu antaa hankkeen esiselvitysvaiheessa. Arvio voidaan suorittaa prosessista syntyvän vedyn määrän ollessa tiedossa.

Työssä käytettyä teoriatietoa on kerätty lakien ja asetusten lisäksi virallisista teollisuuden tarpeisiin laadituista SFS ja ISO standardeista. Näissä esitetyt turvatoimet ovat pitkälti sovellettavissa oppilaitosten tarpeisiin, mutta niiden laajuutta tulisi harkita räjähdysvaaran mahdollisuuden mukaan. Suositeltujen turvatoimien mitoituksen suhteen on tärkeää huomioida, että mitä tahansa syttymis- tai räjähdystapahtumaa oppilaitoksessa on pidettävä lähtökohtaisesti merkittävänä riskinä. Toimien tarpeellisuus pohjautuu ympäristöllisten tekijöiden lisäksi myös siihen, että vetykaasun käyttäytymistä ei voida välttämättä mallintaa tarpeeksi luotettavasti pienillä ainemäärillä ja oppilaitosten käytössä olevilla resursseilla jokaiselle prosessille yksilöllisesti.

Laitteiston valmistajan tietojen pohjalta toteutettujen turvallisuustoimien toteutuksessa voidaan todeta suurimman riskin muodostuvan inhimillisestä virheestä ja laitteiston väärinkäytön mahdollisuudesta. Tämän takia tulisi laitteiston valmistajan tarjoamien käyttöohjeiden pohjalta toteuttaa mahdollisuuksien mukaan toimintovirheanalyysi. Harkitessa useamman elektrolyysilaitteiston sijoittamista samaan tilaan on tärkeää ottaa huomioon niiden aiheuttaman suuremman vetyaannon lisäksi myös useiden päästölähteiden vaikutus huoneen sisäiseen tilaluokkaan. Laitteistojen ollessa lähellä toisiaan mahdollisen syttymisen aiheuttama riski kasvaa varsinkin laitteistojen ollessa toistensa turvaetäisyyden sisällä ja tämä tulisi ottaa huomioon jatkotutkimuksissa. Tämän lisäksi jatkoselvitystä tulisi tehdä myös staattisten purkausten toimimisesta syttymislähteinä ja siitä, kuinka staattisen varauksen muodostumista voidaan välttää luokkatiloissa.

Tämä opinnäytetyö pyrittiin toteuttamaan virallisten ohjeistusten ja teollisuuden käytäntöjen mukaan. Turvallisuuden tarkastelua ja riskinkartoitusta tulee kuitenkin lähtökohtaisesti tehdä vakiinnutettujen toimintatapojen ja kokemuksen pohjalta. Selvitystyön tuloksia ei voi käyttää suoraan toiminnan suunnittelun pohjana ja turvallisuuden tarkastelua tulisi suorittaa jokaiselle prosessille yksilöllisesti virallisten ohjeistusten mukaan. Vedyn käsittelyyn liittyvät ohjeistukset ja käytännöt eivät ole vielä kovin vakiintuneita, joten sen käsittelyyn liittyvää toimintaa oppilaitoksissa tulee kehittää teollisuuden käytäntöjen tarkentuessa. Varsinkin öljynjalostusteollisuudessa on käsitelty vetyä pitkään ja suurilla kapasiteeteilla, joten tämän teollisuudenalan ammattilaisten asiantuntemusta olisi tärkeä hyödyntää tulevan toiminnan suunnittelussa.

Työn toteutuksen aikana korostui ennen kaikkea turvallisen suunnittelun ja operoinnin rooli prosessitekniikan opetuksessa. Vedyn tuotantokapasiteettien kasvaessa Suomen teollisuudessa on ensisijaisen tärkeää varmistaa, että tulevat ammattilaiset osaavat ottaa huomioon sekä kemikaali- että räjähdysturvallisuuden kannalta oleelliset tekijät. Koulun laboratorion mittakaavassa tapahtuvan vedyn käsittelyn riskit voivat ensisilmäyksellä vaikuttaa vähäisiltä. Laajemmasta yhteiskunnallisesta näkökulmasta voidaan kuitenkin todeta kemikaaliturvallisuuteen liittyvän opetuksen olevan avainasemassa energiamurroksen muokkaaman teollisuuden tulevaisuutta ajatellen.

LÄHTEET

Arzamedi, G., Dieguez, P.& Gandia, L. 2013. Renewable Hydrogen Technologies – Production, Purification, Storage, Applications and Safety. San Diego: Elsevier.

Direktiivi 1999/92/EY. vähimmäisvaatimuksista räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamalle vaaralle mahdollisesti alttiisti joutuvien työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden suojelun parantamiseksi. Euroopan unionin virallinen lehti 16.12.1999. Viitattu 10.3.2024.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX%3A31999L0092>

Direktiivi 94/9/EY räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäviksi tarkoitettuja laitteista ja suojajärjestelmiä koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä. Euroopan unionin virallinen lehti 23.2.1994. Viitattu 10.3.2024.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fi/ALL/?uri=CELEX%3A31994L0009>

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus aineiden ja seosten luokituksesta, merkinnöistä ja pakkaamisesta sekä direktiivien 67/548/ETY ja 1999/45/EY muuttamisesta ja kumoamisesta ja asetuksen (EY) N:o 1907/2006 muuttamisesta. 16.12.2008/1272.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fi/TXT/?uri=CELEX%3A32008R1272>

Euroopan yhteisöjen komissio. 2003. Ohjeellinen toimintaopas vähimmäisvaatimuksista räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamalle vaaralle mahdollisesti alttiiksi joutuvien työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden suojelun parantamiseksi annetun Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 1999/92/EY täytäntöönpanemiseksi. Komission tiedonanto. PDF-dokumentti. Tulostettu 6.3.2024.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=celex:52003DC0515>

Euroopan yhteisöjen komissio. 2005. Hyviä käytäntöjä esittelevä ohjeellinen käsikirja direktiivin 1999/92/EY täytäntöönpanoa varten – vähimmäisvaatimuksista räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamalle vaaralle mahdollisesti alttiiksi joutuvien työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden suojelun parantamiseksi. PDF-dokumentti. Tulostettu 18.3.2024.

<https://op.europa.eu/fi/publication-detail/-/publication/c23f5429-1632-4b61-9eb1-a6c0e60828e0>

Guidelines for hazard evaluation procedures. 2008. American Institute of Chemical Engineers. Center for Chemical Process Safety. 3. painos. Hoboken, N.J: Wiley.

ISPT. 2023. Safety aspects of Green Hydrogen Production on Industrial Scale. Julkinen raportti. PDF-dokumentti. Tulostettu 04.04.2024.

<https://ispt.eu/publications/safety-aspects-of-green-hydrogen-production-on-industrial-scale/>

Jespen, T. 2016. ATEX – Explosive Atmospheres. Risk Assessment, Control and Compliance. Switzerland: Springer International Publishing.

Joukanen, T. 2023. Maailman ensimmäinen vihreän vedyn tuotantolaitos avo-merellä läpäisi testit – Suomeen on suunnitteilla tuotantoa Perämerelle. Yle Uutiset 1.12.2023. Viitattu 27.2.2024.

<https://yle.fi/a/74-20062706>

Karpiola, A. 2024. Safety and Permit Expert, Renewable Hydrogen and PtX. Asiantuntijahaastattelu 05.04.2024. Microsoft Teams.

Ruuska, O. 2023 Riskinarvioinnit osana vihreän siirtymän laitoshankkeita. Sweco. 22.09.2023.

<https://www.sweco.fi/blog/riskiarvioinnit-osana-vihrean-siirtymän-laitoshankkeita/>

SFS-EN 1127-1. 2019. Räjähdyksivaaralliset tilat. Räjähdyksen esto ja suojaus. Osa 1: Peruskäsitteet ja menetelmät Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. PDF-dokumentti. Tulostettu 21.4.2024. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/840071.html.stx>

SFS-EN ISO/IEC 80079-20-1 2019. Explosive atmospheres. Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification. Test methods and data. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. PDF-dokumentti. Tulostettu 1.3.2024. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/8/828453.html.stx>

SFS käsikirja 59. 2022. Räjähdyksivaarallisten tilojen luokittelu. Palavat nesteet ja kaasut. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS.

SFS 60079. 2021. Räjähdyksivaaralliset tilat. Osa 10–1: Tilaluokitus. Kaasuräjähdyksivaaralliset tilat. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. PDF-dokumentti. Tulostettu 11.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/6/984188.html.stx>

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus vaarallisten aineiden luettelosta 15.6.2005/509. Viitattu 5.3.2024.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2005/20050509>

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2017. ATEX-starttipaketti. PDF-dokumentti. Tulostettu 11.2.2024.

<https://tukes.fi/documents/5470659/8293726/ATEX-starttipaketti-2017.pdf/b440ed57-218e-4eda-a5b9-42df468e0b5f/ATEX-starttipaketti-2017.pdf?t=1526981253000>

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto n.d. Räjähdyksivaaralliset tilat. Verkkosivu. Viitattu 10.2.2024.

<https://tukes.fi/teollisuus/rajahdysvaaralliset-tilat#a25f5457>

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. 2024. Vedyn käsittelyn ja varastoinnin turvallisuus. Opas. PDF-dokumentti. Tulostettu 10.02.2024.

<https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus>

Valtioneuvoston asetus räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjunnasta. 18.6.2003/576. Viitattu 15.3.2024.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2003/20030576>

Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta. 21.5.2015/685. Viitattu 10.2.2024.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20150685>

Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista. 20.12.2012/856 Viitattu 10.2.2024.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2012/20120856>

Valtioneuvoston kanslia 2022. Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022:21. PDF-dokumentti. Tulostettu 04.04.2024.

<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163901>

LIITTEET

Liite 1. Laboratoriossa käytettävän elektrolyysilaitteiston saantoja

Laittevalmistaja	Laitteen merkki	Suurin sallittu operointiteho (kW)	Vedyn saanto (l/min)
H-tec education	Tutorial Basic	0,003	0,01
	Tutorial Pro	0,003	0,01
	Double Electrolyzer kit	0,003	0,04
	Electrolyzer 65	0,016	0,065
	Electrolyzer 230	0,056	0,23