



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Virumaa kolledž

**Põlevkivitööstuse peamiste produktide süttivuspiiride
ja plahvatusohutsoonide tuvastamine ja analüüs**

**Identification and analysis of the flammability limits and
explosive zones of the main products of the oil shale industry**

KEEMIASTEHNOLÓGIA ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Margus Koppel

Üliõpilaskood: 207784EDKR

Juhendaja: Antonina Zguro, lektor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneriplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS¹

Mina Margus Koppel (sünnikuupäev: 11.01.1989)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Põlevkivitööstuse peamiste produktide süttivuspiiride ja plahvatusohutsoonide tuvastamine ja analüüs, mille juhendaja on Antonina Zguro,
 - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautori(d) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Margus Koppel, 207784EDKR

Õppekava, peeriala: EDKR16/17 Keemiatehnoloogia

Juhendaja(d): programmijuht (keemiatehnoloogia), lektor, Antonina Zguro, antonina.zguro@taltech.ee

Konsultant: Konstantin Bersenev, Tehniline direktor

ENTEH Engineering AS, 521 7988, konstantin@enteh.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Põlevkivitööstuse peamiste produktide süttivuspiiride ja plahvatusohutsoonide tuvastamine ja analüüs

(inglise keeles) Identification and analysis of the flammability limits and explosive zones of the main products of the oil shale industry

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda ülevaade süttivuspiiride ja plahvatusohutsoonide teoreetilistest andmetest.
2. Anda ülevaade segude süttivuspiiride ja plahvatusohutsoonide arvutamise meetodikatest.
3. Teostada arvutusi ja analüüsida põlevkivitööstuse peamiste produktide süttivuspiire ja plahvatusohutsoone.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teooria andmete otsimine antud teemal	03.03.2024
2.	Arvutusmeetodikate otsimine	24.03.2024
3.	Arvutuste tegemine ja analüüs	15.04.2024
4.	Lõputöö lõplik vormistamine	10.05.2024

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "15"mai 2024a

Üliõpilane: Margus Koppel

"...."..... 20.... a

/allkiri/

Juhendaja: Antonina Zguro

"...."..... 20.... a

/allkiri/

Konsultant: Konstantin Bersenev

"...."..... 20.... a

/allkiri/

Programmijuh: Antonina Zguro

/allkiri/

"...."..... 20.... a

SISUKORD

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	9
SISSEJUHATUS	10
1. SÜTTIVUS	12
1.1 Süttivus- ja plahvatusohuga seotud definitsioonid ja teooria	13
1.2 Süttivuse sõltuvus	15
1.2.1 Temperatuur	15
1.2.2 Rõhk	16
1.2.3 Süttivuspiirid õhus ja hapnikus	16
1.2.4 Keemiliselt inertsete ainete mõju	17
1.2.5 Minimaalsed süüteenergiad	17
1.2.6 Isesüttimistemperatuur	18
1.3 Süttivuse standardid	19
1.3.1 Süttivus ja/või plahvatusohtlikkus.....	19
1.3.2 Euroopa ja USA standardite võrdlus plahvatuspiiride määramisel	20
1.4 ÜRO GHS ja ISO10156:2017 standardi klassifikatsioon	23
1.4.1 Definitsioonid ÜRO GHS	24
1.4.2 Klassifitseerimise kriteeriumid ÜRO GHS dokumendi järgi	24
1.4.3 Otsustusloogika süttivate gaaside jaoks.....	25
1.4.4 Tuleohtliku gaasisegu klassifikatsioon arvutuse teel ÜRO GHS dokumendi järgi	25
1.4.5 ISO 10156:2017 standard.....	25
1.4.6 Gaasi segude klassifitseerimine ISO 10156:2017 järgi.....	26
2. SÜTTIVUSPIIRIDE (PLAHVATUSPIIRIDE) ARVUTAMISEGA SEOTUD DEFINITSIOONID	29
2.1 Stõhhiomeetriline kontsentratsioon	29
2.2 Hapniku piirkontsentratsioon (LOC)	29
2.3 Süttivuse diagramm	30
2.3.1 Süttivuse diagrammi koostamine	31
2.3.2 Süttivuse diagrammi kasutamine tuleohtliku atmosfääri vältimiseks	33
3. PLAHVATUSPIIRIDE ARVUTAMISE MEETODID	36
3.1 Le Chatelier reegli laiendustel põhinev meetodika	36
3.2 Arvutatud adiabaatilise leegi temperatuuri (CAFT) meetod	38
4. PLAHVATUSOHUTSOONID JA NENDE MÄÄRAMINE	39
4.1 Terminid	39

4.2	Plahvatusohutsoonide klassifitseerimine	41
4.2.1	Plahvatusohutsoonide klassid	41
4.3	Plahvatusohutsoonide ulatuse määramine	42
4.3.1	Süttiva gaasi või auru eraldumismäär.....	44
4.3.2	Alumine plahvatuspiir	44
4.3.3	Ventilatsioon	44
4.3.4	Eralduva gaasi või auru suhteline tihedus	47
4.3.5	Muud arvestamist vajavad tegurid	47
4.4	Avad kui võimalikud lekkeallikad	48
4.4.1	Avade klassifitseerimine	48
4.5	Arvutuse meetodika	49
4.5.1	Lekkemäär.....	49
4.6	Elektriseadmete liigitus	51
4.6.1	Märgistus.....	51
4.6.2	Märgistuse näide.....	52
5.	ARVUTUSLIK OSA	53
5.1	Süttivuspiiride arvutus poolkoksigaas VKG, petroter näide järgi	53
5.1.1	Arvutusandmed ja nende hinnang.....	61
5.2	Andmete graafiline presenteerimine	61
5.2.1	Segu inertimine	63
5.3	Plahvatusohutsoonide määramine	65
5.3.1	Punkris oleva gaasi-õhu segu andmed	65
5.3.2	Plahvatusohutsoonide ulatuste ja lahjendusmäärade leidmine	69
	KOKKUVÕTE	74
	SUMMARY	76
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	78
LISA 1	MÕNEDE KEMIKAALIDE PÕLEMISOOJUS, LEEKPUNKT JA ISESÜTTIMISTEMPERATUUR [7: LISA C]	80
LISA 2	AINE VÕI SEGU KLASSIFITSEERIMISE LOOGIKA [3: 53]	83
LISA 3	MÕNEDE SÜTTIVATE GAASIDE SÜTTIVUSPIIRID JA T _{CI} VÄÄRTUSED [11: 9]	84
LISA 4	MÕNEDE SÜTTIVATE AURUDE SÜTTIVUSPIIRID JA T _{CI} VÄÄRTUSED [11: 10]	86
LISA 5	HAPNIKU PIIRKONTSETRATSIOONIDE (LOC) TABEL [2: 23-8]	88

LISA 6	KASUTUSEL OLEVA HAPNIKU KONTSENTRATSIOON (<i>ISOC</i>) JA KASUTUSEST VÄLJAS OLEVA KÜTUSE KONTSENTRATSIOON (<i>OSFC</i>) EKSPERIMENTAALSED ANDMED [7: 119]	89
LISA 7	JAGATUD SEGUDE SÜTTIVUSPIIRIDE ARVUTAMISE JOONISED [6: 7] [19: 280]	90
LISA 8	VENTILATSIOONIKIIRUSE VÄÄRTUSED VÄLISTINGIMUSTES [15: 52]	92
LISA 9	AVA RISTLÕIKE PINDALA JA ALLIKA RAADIUS [13: 21]	93
LISA 10	PRODUKTIDE KOOSTISE KOONDTABEL [17]	95
LISA 11	SEGUDE ARVUTATUD ANDMED	96
LISA 12	SEGUDE PÕLEVA OSA, LÄMMASTIKU JA HAPNIKU SISALDUS, CO ₂ ÜMBERARVUTAMISEL N ₂ EKVIVALENTSUSELE	98
LISA 13	SEGUDE SÜTTIVUSE DIAGRAMMID	99
LISA 14	VKG OIL AS ÕLILAOS ASUVA PUNKRI P&ID SKEEM [17]	104

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

<i>AIT</i>	isesüttimistemperatuur (ingl k <i>Autoignition temperature</i>)
<i>ATEX</i>	plahvatusohtliku keskkonna oht, mis tekib töökohal, kuna õhku on segunenud tuleohtlikud gaasid või põlev tolm, mis võib põhjustada plahvatusohu (prants k <i>Atmospheres Explosibles</i>)
<i>CAFT</i>	arvutatud adiabaatiline leegi temperatuur (ingl k <i>Calculated Adiabatic Flame Temperature</i>)
<i>Ca</i>	tühjenduskoefitsient (ingl k <i>discharge coefficient</i>)
<i>EPL</i>	seadme plahvatuskaitse tase (ingl k <i>Equipment Protection Level</i>)
<i>GHS</i>	„Kemikaalide klassifitseerimise ja märgistamise globaalne harmoneeritud süsteem“ (ingl k <i>Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals</i>)
<i>ISOC</i>	kasutusel olev hapniku kontsentratsioon (ingl k <i>In-service Oxygen Concentration</i>)
<i>KPT</i>	kütuse peendisperse tuha kiht
<i>LFL, LEL</i>	alumine süttivus- või plahvatuspiir (ingl k <i>Lower Flammability Level, Lower Explosive Level</i>)
<i>LOC</i>	hapniku piirkontsentratsioon (ingl k <i>Limiting Oxygen Concentration</i>)
<i>MIE</i>	minimaalne süüteenergia (ingl k <i>Minimum Ignition Energy</i>)
<i>OSFC</i>	kasutusest väljas oleva kütuse kontsentratsioon (ingl k <i>Out-of-Service Fuel Concentration</i>)
<i>T_{ci}</i>	tuleohtliku gaasi maksimaalne sisaldus, mis segatuna lämmastikuga ei ole õhus süttiv (ingl k <i>maximum content of flammable gas or vapour, which in a mixture with nitrogen, results in a composition which is not flammable in air</i>)
<i>TÕPS</i>	tsirkulaarne õlipuhastusseade
<i>UFL, UEL</i>	ülemine süttivus- või plahvatuspiir (ingl k <i>Upper Flammability Level, Upper Explosive Level</i>)

SISSEJUHATUS

Põlevkivitööstus mängib Eesti majanduses olulist rolli. 2022. aastal sellised ettevõtted nagu Eesti Energia AS, VKG OÜ ja Kiviõli Keemiatööstus OÜ panustasid riigikassasse 153 miljonit eurot ning pakkusid tööd 5659 inimesele. Ülaloodud ettevõtted kaevandasid 10,63 miljonit tonni põlevkivi, millest saadi 1098 tuhat tonni vedelkütuseid, 5592 GWh elektrit, 1235 GWh soojust ja 2788 tonni peenkeemia tooteid. [1]

Majandusliku kasu kõrval kujutab põlevkivi aga oma tule- ja plahvatusohtlikkuse tõttu olulisi ohutusriske. Tööstuse käigus tekkivate gaaside ja aurude süttimispiirid ja plahvatusohutsoonid on kriitilised parameetrid, mis määravad tööstuse ohutud töötingimused.

Seoses sellega on aktuaalne viia läbi põlevkivi produktide analüüs ning teostada vajalikud arvutused ohupiiride ja -tsoonide tuvastamiseks. See tagaks ettevõtete ohutut igapäevast tööd.

Alumine süttivuspiir (Lower Flammability Limit, LFL) ja ülemine süttivuspiir (Upper Flammability Level, UFL) määravad tuleohtliku aine kontsentratsiooni vahemiku õhus, mis võib leeki levitada. Plahvatusohutsoon seevastu tähistab piirkonda, kus süttiva aine kontsentratsioon jääb plahvatusohtlikkuse piiridesse.

Lõputöö eesmärgiks on põlevkivitööstuse produktide süttivuspiiride ja plahvatusohutsoonide arvutamine ja analüüs. Sellest tulenevalt pannakse paika järgmisi ülesandeid:

- tutvuda süttimise ja plahvatusohu teoreetiliste alustega;
- läbi töötada olemasolevad standardid antud teemal;
- tutvuda süttivuspiiride ja plahvatusohutsoonide arvutamise metodikatega ning sooritada vajalikud arvutused;
- teha järeldused antud arvutuste põhjal.

Lõputöö struktuur on järgmine: sissejuhatus, teoreetiline osa (peatükid 1-4), arvutuslik osa koos järeldustega (peatükk 5) ning kokkuvõtte.

Esimeses peatükis tehakse ülevaadet süttivusega ja plahvatusohuga seotud teooriast. Tuuakse välja termineid ja nende kirjeldusi ning süttivuse sõltuvust erinevatest teguritest. Samuti tutvustatakse kemikaalide klassifitseerimist ISO10156:2017 standardi järgi. Teises peatükis antakse ülevaadet süttivuspiiride arvutamisega seotud suurustest nagu stöhhiomeetiline kontsentratsioon ja hapniku piirkontsentratsioon (Limiting Oxygen Concentration, LOC) ning kirjeldatakse süttivuse diagrammi. Edasi vaadeldakse süttivuspiiride arvutamise metodikaid, tuuakse välja valemeid. Neljandas

peatükis tutvustatakse plahvatusohutsoonide teooriaga ning nende ulatuse arvutamise meetodikaga. Selles peatükis tuuakse esile ka lühiülevaade elektriseadmete liigitusest ja märgistusest. Lõputöö kõige tähtsamaks osaks on arvutuslik osa, kus teostatakse süttivuspiiride ja plahvatusohutsoonide arvtusi, koostatakse süttivuse diagrammi ning leitakse plahvatusohutsooni ulatuse ja lahjendusmäära graafikute abil.

Antud lõputöö on aktuaalne ja omab suurt praktilist tähtsust, kuna selle teema on välja pakutud ENTEH Engineering AS ettevõtte poolt. Käesolevat meetodikat saab ENTEH kasutada oma projektides, kus klient - keemia-ja energeetikaettevõtted, soovib süttivuspiiride ja plahvatusohutsoonide arvutamist ja määramist.

Võtmesõnad: alumine süttivuspiir, ülemine süttivuspiir, plahvatuspiir, plahvatusohutsoon, tsooni ulatus, tsooni lahjendusmäär, diplomitöö.

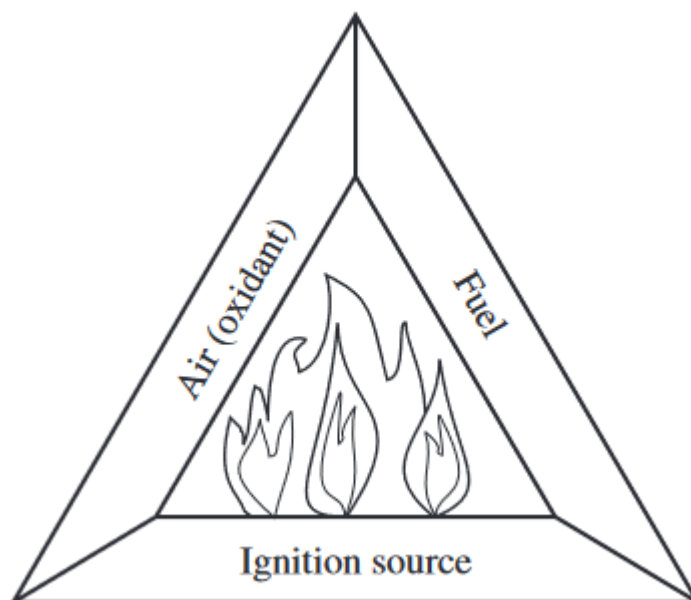
1. SÜTTIVUS

Tulekahjud ja plahvatused keemia- ja rafineerimistehastes on haruldased, kuid kui need juhtuvad, on need väga dramaatilised. Õnnetuste statistika on näidanud, et tulekahjud ja plahvatused moodustavad 97 protsenti keemiatööstuse suurimatest õnnetustest. [2: 23-6]

Tulekahjude ja plahvatuste vältimine nõuab [2: 23-6]:

- 1) tulekahjude ja plahvatuste põhitoedede mõistmist;
- 2) tule- ja plahvatusohtlike materjalide nõuetekohast eksperimentaalset iseloomustust;
- 3) nende kontseptsioonide õiget rakendamist tööstuskeskkonnas.

Kütuse, oksüdeerija ja süüteallika olemasolul tekib tulekahju. Tegelikult peavad kütus ja oksüdeerija olema teatud kontsentratsioonivahemikes ning süüteallikas peab olema tulekahju süttimiseks piisavalt vastupidav. Tulekolmnurk kehtib gaaside, vedelike ja tahkete ainete kohta (vt Joonis 1.1). Vedelikud lenduvad ja tahked ained lagunevad enne põlemist aurufaasis. Tahketest materjalidest tekkiva tolmu puhul on põlemisel olulised parameetrid ka osakeste suurus, jaotus ja suspensioon gaasis – need sisalduvad mõnikord ka tulekolmnurgas. [2: 23-6]



Joonis 1.1 Tulekolmnurk, mis näitab gaaside ja aurude põlemise nõuet [2: 23-6]

Tavaline oksüdeerija tulekolmnurgas on õhust saadav hapnik. Siiski võivad oksüdeerijatena toimida gaasid, nagu fluor ja kloor, vedelikud, nagu peroksiidid ja kloraadid, ning tahked ained, nagu ammooniumnitraat ja mõned metallid. Võimalik on ka eksotermiline lagunemine ilma hapnikuta – näiteks etüleenoksiidi või atsetüleeniga. [2: 23-7]

Süttimine tuleneb paljudest erinevatest allikatest, sealhulgas staatiline elekter, kuumad pinnad, sädemed, lahtised leegid ja elektriahelad. Süüteallikad on tabamatud ja neid on raske täielikult kõrvaldada. [2: 23-7]

Kui tulekolmnurga mõni külge eemaldatakse - tulekahju ei teki. Varem oli kõige levinum tuletõrjemeetod süüteallikate kõrvaldamine. Kogemus on aga näidanud, et sellest ei piisa. Praegused tuletõrje ennetusmeetodid jätkavad süüteallikate kõrvaldamist, keskendudes samal ajal tugevamalt tuleohtlike segude ennetamisele. [2: 23-7]

1.1 Süttivus- ja plahvatusohuga seotud definitsioonid ja teooria

Põlevgaas: gaas, millel on olemas süttimispiirkond õhuga temperatuuril 20°C ja standardrõhul 101,3 kPa. [3: 51]

Süttivuse piirid (plahvatuspiirid): auru-õhu segud süttivad ja põlevad ainult täpselt määratletud koostiste vahemikus. Segu ei põle, kui koostis on madalam kui alumine süttivuspiir (LFL); segu on põlemiseks liiga lahja. Segu ei ole põlev ka siis, kui koostis on liiga rikas, st kui see on üle ülemise süttivuse piiri (UFL). Tavaliselt kasutatavad ühikud on kütuse mahuprotsent (kütuse ja õhu protsent). [2: 23-7]

Alumist plahvatuspiiri (LEL) ja ülemist plahvatuspiiri (UEL) kasutatakse vaheldumisi LFL-i ja UFL-iga. [2: 23-7]

Süttimine: tuleohtliku segu süttimise võib põhjustada segu kokkupuude piisava energiaga süüteallikaga või gaasi isesüttimiseks piisavalt kõrge temperatuuri saavutamine. [2: 23-7]

Plahvatus: plahvatus on gaaside kiire paisumine, mille tulemuseks on kiiresti liikuv rõhk või lööklaine. Paisumine võib olla mehaaniline (rõhu all oleva anuma järsu purunemise tõttu) või kiire keemilise reaktsiooni tagajärjel. Plahvatuskahjustusi põhjustab surve või lööklaine. [2: 23-7]

Plahvatusohtlikkus on defineeritud kui kriitilise leegi võime levida kogu segu mahu ulatuses ja tekitada märkimisväärset rõhku. [4: 6]

Ülerõhk: plahvatus tagajärjel tekkiv rõhk, mis on suurem ümbritseva keskkonna rõhust. [2: 23-7]

Lööklaine: see on järsk rõhulaine, mis liigub läbi gaasi. Lööklainele vabas õhus järgneb tugev tuul. Rõhu tõus lööklaines on nii kiire, et protsess on enamasti adiabaatiline. [2: 23-7]

Deflagratsioon: selle plahvatuse korral liigub reaktsioonifront kiirusega, mis on väiksem kui helikiirus reageerimata keskkonnas [2: 23-7]. Rõhk ühtlustub helikiirusel kogu ruumis, milles põlemine toimub, nii et rõhulang leegi (reaktsiooni) rindel on suhteliselt väike [5: 15].

Detonatsioon: selle plahvatuse korral liigub reaktsioonifront kiirusega, mis on suurem kui helikiirus reageerimata keskkonnas [2: 23-7]. Rõhu ühtlustamise kiirus on väiksem kui levimiskiirus ja leegi frondil on märgatav rõhulangus [5: 15].

Iseüttimistemperatuur (AIT): on fikseeritud temperatuur, millest kõrgemal on keskkonnas piisavalt energiat süüteallika loomiseks. [2: 23-7]

Põlemine või tulekahju: on keemiline reaktsioon, mille käigus aine ühineb oksüdeerijaga ja vabastab energiat. Osa vabanenud energiast kasutatakse reaktsiooni alalhoidmiseks. [2: 23-7]

Piiratud plahvatus: plahvatus toimub torus või hoones. [2: 23-7]

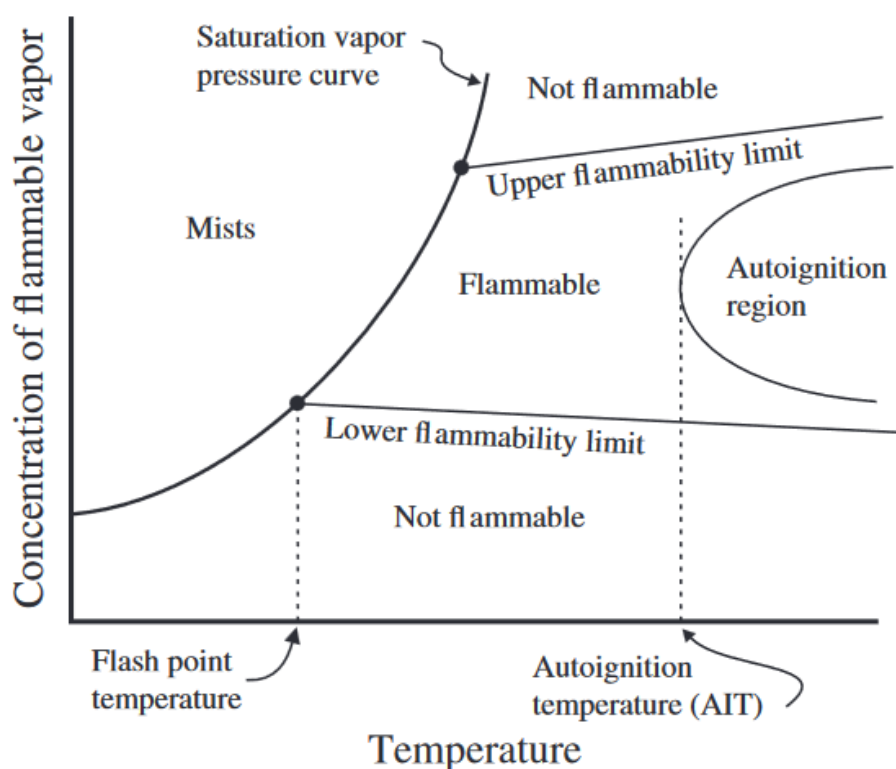
Tolmuplahvatus: plahvatus tuleneb peente tahkete osakeste kiirest põlemisest. Paljud tahked materjalid (sealhulgas tavalised metallid, nagu raud ja alumiinium) ja looduslikud materjalid (sh suhkur, teraviljatolm ja saepuru) muutuvad süttivaks peenestatult pulbriks ja hõljudes õhus. [2: 23-7]

Tulepunkt: on madalaim temperatuur, mille juures vedeliku kohal olev aur jääb pärast süttimist edasi põlema; tulepunkti temperatuur on leekpunktist kõrgem. [2: 23-7]

Leekpunkt: vedeliku leekpunkt on madalaim temperatuur, mille juures see eraldab piisavalt auru, et moodustada õhuga süttiv segu. Aur, mille temperatuur vastab leekpunktile põleb, kuid ainult lühiajaliselt; põlemise säilitamiseks tekib ebapiisavalt auru. Leekpunkt üldiselt suureneb rõhu suurenemisega. [2: 23-7]

Leegi levimise suund: Kui süttivasse segusse sisestatakse süüteallikas, näiteks elektrisäde või leek, kipub leek allikast liikuma igas suunas. Väga suure segumahu korral oleks põlemistsooni vorm suureneva raadiusega sfääriline kest, kui kuumad paisuvad põlemissaadused ei kipuks tõusma ja seega tekitama konvektsioonivoolu. Leek ei saa liikuda allapoole, sest gaaside liikumine ülespoole on konvektsiooni tõttu kiirem kui leegi kiirus seisvas segus, nagu juhtub nõrkade segude puhul, mis on süttimispiiri lähedal. Seega on iga piiri lähedal hulk segusid, mis levivad leeki ülespoole, kuid mitte allapoole. Neid võib õigesti nimetada "süttivateks segudeks". [6: 2]

Joonis 1.2 on kontsentratsiooni ja temperatuuri graafik, mis näitab kuidas mitmed ülaltoodud mõistetest on seotud (vt [Joonis 1.2](#)). Eksponentkõver kujutab vedela materjali küllastusauru rõhu kõverat. Tavaliselt UFL suureneb ja LFL väheneb koos temperatuuriga. LFL lõikub teoreetiliselt leekpunktis küllastuse aururõhu kõveraga, kuigi katseandmed ei ole alati järjepidevad. Isesüttimistemperatuur on tegelikult isesüttimispiirkonna madalaim temperatuur. Isesüttimispiirkonna ja süttivuspiiride käitumine kõrgematel temperatuuridel ei ole hästi mõistetavad. Leekpunkt ja



Joonis 1.2 Erinevate süttimisomaduste vahelised seosed [2: 23-7]

süttivuspiirid on määratud ainult konkreetse katseseadme ja kasutatava protseduuriga. [2: 23-7]

1.2 Süttivuse sõltuvus

1.2.1 Temperatuur

Üldiselt süttivusala suureneb temperatuuri tõustes. Õhusegude puhul UFL suureneb ja LFL väheneb, laiendades vahemikku, milles segu on tuleohtlik. Mõned materjalid (nt dekaan), mis ümbritsevatel tingimustel ei ole süttivad, võivad muutuda kõrgendatud temperatuuril süttivaks. [7: 30]

Zabetakis jt tuletasid järgmised empiirilised võrrandid, mis on ligikaudsed paljude süsivesinike jaoks: [2: 23-8]

$$LFL_T = LFL_{25} - \frac{0,75}{\Delta H_c} \cdot (T - 25); \quad (1.1)$$

$$UFL_T = UFL_{25} + \frac{0,75}{\Delta H_c} \cdot (T - 25); \quad (1.2)$$

kus

LFL_T, UFL_T - on vastavalt alumine ja ülemine süttivuspiir temperatuuril T, vol%;

LFL_{25}, UFL_{25} - on vastavalt alumine ja ülemine süttivuspiir temperatuuril 25 °C, vol%;

ΔH_c - on põlemissoojus, kcal/mol;

T - temperatuur, °C;

1.2.2 Rõhk

Üldiselt rõhu tõustes suureneb tuleohtlikkuse vahemik. Rõhul on LFL-ile väike mõju, välja arvatud väga madala rõhu korral (absoluutne <50 mmHg), kus põlemine pole võimalik. UFL suureneb rõhu tõstes. Mõnede süsivesinikgaaside puhul on saadaval väga ligikaudne võrrand UFL muutuse kohta rõhuga: [2: 23-8]

$$UFL_p = UFL + 20,6 \cdot (\log P + 1); \quad (1.3)$$

kus

P - rõhk, MPa;

UFL_p - ülemine süttimispiir rõhul P, vol%;

UFL - ülemine süttimispiir, vol%;

1.2.3 Süttivuspiirid õhus ja hapnikus

Üldiselt on gaasi alumine piir hapnikus peaaegu sama kui õhus. Metaani alumine piir, mida vaadeldakse leegi allapoole levimisega torus, on hapnikus pigem kõrgem kui õhus, arvatavasti seetõttu, et hapniku keskmine molekulaarsoojus on kõrgem kui lämmastiku oma toatemperatuuri ja leegi piirsoojuse vahel. Üles- või horisontaalsel leegi levimisel on metaani alumine piir hapnikus veidi väiksem kui õhus; ammoniaagi piirmäär on märgatavalt väiksem. Kõikide tuleohtlike gaaside kõrgemad piirid on hapnikus palju kõrgemad kui õhus; seetõttu on hapnikus süttivuse ulatus alati suurem. [6: 5]

1.2.4 Keemiliselt inertsete ainete mõju

Keemiliselt inertse aine lisamine atmosfääri põhjustab gaasi piiride lähenemise ja lõpuks kokkusaamise. Süsiniktetrakloriidi, süsinikdioksiidi, lämmastiku, heeliumi ja argooni efektiivsused vähenevad antud järjekorras: $CCl_4 > CO_2 > N_2 > He > A$. [6: 5]

Süsiniktetrakloriidi, süsinikdioksiidi, lämmastiku ja argooni mõjud on tihedalt seotud nende erisoojustega, kuid heeliumi väga kõrge soojusjuhtivus kipub andma sellele seerias ebanormaalse positsiooni. [6: 5]

1.2.5 Minimaalsed süüteenergiad

Minimaalne süüteenergia (MIE) on minimaalne soojusenergia kogus, mis eraldub küttesegu punktis, mis põhjustab kindlaksmääratud katsetingimustes leegi määramatu leviku sellest punktist eemale. Lihtsustatud analüüsi kasutades tuleb väikesele tuleohtlikule massile piisavalt lühikese aja jooksul anda piisav energia, et temperatuur tõuseks punktini, kus reaktsioon tekitab piisavalt energiat, et ennast säilitada. Kuna keerulised ahela hargnemisreaktsioonid on võimalikud, võib ilmned viivitus või induktiooniaeg. [7: 32]

MIE sõltub konkreetsest kemikaalst või kemikaalidest, kontsentratsioonist, rõhust, temperatuurist ja süütevõimsusest. Sädesüüte puhul sõltub MIE ka sädemevahe suuruselt ja sädeme kestusest. Seega on praktilisest seisukohast MIE-d raske iseloomustada ja see sõltub suuresti eksperimentaalsest konfiguratsioonist. MIE andmed on piiratud ja teadlaste vahel on märgata märkimisväärseid erinevusi. Tabelis 1.1 on esitatud MIE andmed mitmete levinud põlevgaaside kohta (vt Tabel 1.1). [7: 32]

Tabel 1.1 Minimaalsed süüteenergiad mõnede gaaside jaoks [7: 33]

Nr	Kemikaal	Minimaalne süüteenergia, mJ
1	Atsetüleen	0,020
2	Benseen	0,225
3	But-1,3-dieen	0,125
4	n-Butaan	0,260
5	Tsükloheksaan	0,223
6	Tsüklopropan	0,180
7	Etaan	0,240
8	Eteen	0,124
9	Etüülatsetaat	0,480
10	Etüleenoksiid	0,062
11	n-Heptaan	0,240
12	Heksaan	0,248
13	Vesinik	0,018
14	Metaan	0,280

15	Metanool	0,140
16	Propüün	0,120
17	Metüületüülketoon	0,280
18	n-Pentaan	0,220
19	2-Pentaan	0,180
20	Propaan	0,250

Üldiselt kehtivad praktilise kasutamise kohta järgmised väited: [7: 32]

- Enamiku tuleohtlike gaaside puhul ei ole MIE tavaliselt madalam kui 0,10 mJ, kuigi tavaliselt kasutatakse 0,25 mJ. Teatud kemikaalidel (nt vesinik) on madalamad väärtused [7: 32].
- Õhus leiduvate tuleohtlike gaaside puhul leitakse madalaim MIE (LMIE) stõhhiomeetrilise kontsentratsiooni lähedal (kuid mitte tingimata stõhhiomeetrilise kontsentratsiooni juures) ja MIE suureneb, kui kütuse kontsentratsioon suureneb või väheneb LMIE väärtusest [7: 32].
- Enamiku tuleohtlike tolmude puhul on MIE tüüpiline väärtus umbes 10 mJ, kuigi sõltuvalt tolmu tüübist, osakeste suurusest jne on oodata suurt varieeruvust [7: 32].
- Temperatuuri tõustes MIE väheneb [7: 32].
- Rõhu tõustes MIE väheneb [7: 32].
- Inertgaasi kontsentratsiooni suurenemine suurendab MIE-d [7: 32].

Kõige tähtsam on meeles pidada, et tuleohtliku gaasi või auru süütamiseks kuluv energia on väga väike. MIE 0,25 mJ tähistab kineetilist energiat, mis sisaldub väikeses mündis, kui see põrkab vastu pinda pärast mõne millimeetri kõrguselt kukkumisest. Staatiline elektritühjendus, mida inimene tunneb on umbes 20 mJ, mis on suurusjärguliselt suurem kui MIE. Seega tuleohtlikud gaasid ja aurud on kergesti süttivad. See on peamine põhjus, miks süüteallikate kõrvaldamist ei saa pidada esmaseks kaitseks tulekahjude ning gaaside ja aurude plahvatuste vastu. [7: 33]

1.2.6 Isesüttimistemperatuur

Kui gaasi või auru tuleohtliku segu temperatuur tõuseb, saavutatakse lõpuks temperatuur, kus segu süttib ilma välist süüteallikat kasutamata – segu süttib iseeneslikult (vt [Lisa 1](#)). Seda temperatuuri nimetatakse isesüttimistemperatuuriks (AIT). Piisavalt kõrgel temperatuuril kütus, kui see vabaneb ja seguneb õhuga, et moodustada tuleohtlik segu, võib sellisel viisil süttida. Samuti süttib eraldunud külm kütus, mis on segunenud kuuma õhuga või puutub kokku kuuma pinnaga. [7: 34]

AIT sõltub paljudest teguritest, sealhulgas konkreetsest kütusest, rõhust, katseanuma mahust, katalüütiliste materjalide olemasolust, voolutingimustest ja teistest. Oluline on määrata AIT katsetingimustes, mis kordavad võimalikult täpselt tegelikke protsessitingimusi. [7: 34]

Üldiselt AIT: [7: 34]

- väheneb rõhu tõusuga;
- suureneb, kui segu muutub rikkaks või lahjaks;
- väheneb hapnikusisalduse suurenemisega;
- väheneb katalüütiliste pindade (mis võivad sisaldada roostes torusid) ja põlemist sensibiliseerivate ainete (nagu NO_x) olemasolul.

1.3 Süttivuse standardid

Gaaside süttivus on materiaalne põhiomadus, mis hõlmab erinevatel juhtudel seaduslikku klassifikatsiooni ja nõuab asjakohast märgistamist. Plahvatuskaitsemeetmed on vajalikud ainult siis, kui esinevad tuleohtlikud gaasid, nt protsessides, ladustamisel ja kasutamisel. Euroopa tehnilistes õigusaktides loetakse gaasi või gaasisegu "tuleohtlikuks", kui atmosfääritingimustes on segus õhuga plahvatusvahemik (plahvatuspiirid). Seetõttu on tuleohtlikkuse ja plahvatuspiiride määramise meetodid paljudes riikides standarditud. Sellegipoolest ei ole plahvatuspiirid sõltumatud füüsikalise-keemilised materjali omadused, nagu keemistemperatuur või aine tihedus. Justkui enamik teisi ohutusomadusi, mõjutavad neid katseseade ja kohaldatav määramisprotseduur. [8]

1.3.1 Süttivus ja/või plahvatusohtlikkus

Väljendi "plahvatuspiiri" asemel kasutatakse kirjanduses sageli "süttivuspiiri". Kuid "süttiv" on mitmetähenduslik mõiste: see tähendab ühelt poolt õhus süttivat ja teiselt poolt plahvatusohtlikku reaktsiooni ilma täiendava õhu või mõne muu oksüdeerija lisamiseta. Tüüpilised näited on tuleohtlikud gaasid, nt puhas vesinik ja süttivuse (plahvatus) vahemikud, mis iseloomustavad vesiniku-õhu segusid. Euroopa ATEX („plahvatusohtlik atmosfäär“, EL direktiiv) direktiivides ja plahvatuskaitse standardites kasutatakse plahvatuslikult reageerivate segude kohta mõistet "plahvatus", et vältida arusaamatusi. [8]

Tegelikku olukorda standardimises ja teaduskirjanduses iseloomustab asjaolu, et enamik USA autoreid kasutab terminit "süttivuspiir", Euroopa standardis aga nimetatakse sama materjali ohutustunnust "plahvatuspiir". Tänapäeval arutatakse rahvusvahelistes standardimiskomiteedes teistsuguse tähenduse üle, mis tähendab

ägedamat reaktsiooni "plahvatuspiiri" saavutamisel võrreldes aeglasema reaktsiooniga "süttivuspiiril". Mitteametlikus IEC (International Electrotechnical Commission) dokumendis kasutati kriteeriumina leegi levimise suunda. Sageli viidatakse „Bureau of Mines, bulletin 503, 1952 a.” vesiniku-õhu segude mõõtmistele, kus leegi levikut ülespoole täheldati 4 mol% vesiniku juures, kuid allapoole levimine ei alga enne 9 mol% vesinikku. Seetõttu on alumiseks süttimispiiriks (LFL) pakutud 4 mol% ja alumiseks plahvatuspiiriks (LEL) 9 mol%. Sellest hoolimata ei ole selline määratlus plahvatuskaitse valdkonnas abiks. Ühest küljest ei ole „allapoole levimise” kriteeriumi jaoks tegelikult saadaval ühtegi rahvusvahelist standardit ja teiselt poolt ei saa kunagi teada, kus potentsiaalne süüteallikas tootmistehases asub. Seetõttu saab plahvatuskaitse asjakohaseks kriteeriumiks olla ainult konservatiivsem ülespoole levimine. [8]

Arusaamatuste vältimiseks tuleb märkida, et "süttivuspiir" USA-s ja "plahvatuspiir" Euroopas tähistavad sama materjali omadust, mis on määratud sarnaste standardkatsetega, kasutades sama leegi "üles levimise" kriteeriumi. [8]

1.3.2 Euroopa ja USA standardite võrdlus plahvatuspiiride määramisel

Kõigis liikmesriikides ühtselt kehtivate plahvatuskaitse alaste Euroopa direktiivide loomisega tekkis vajadus välja töötada uued Euroopa standardid plahvatusomaduste määramiseks. Seda projekti juhib Euroopa tehniline komitee 305 „Plahvatusohtlikud keskkonnad - plahvatuse vältimine ja kaitse”. 1. töörühm vastutab gaaside, aurude ja tolmu ohutusnäitajate määramise uute standardite väljatöötamise eest. [8]

Selles valdkonnas on väljatöötamisel uus Euroopa eelnõu prEN 1839:2015 "Plahvatuspiiride ning gaaside ja aurude piirväärtuse hapnikusisalduse määramine". See on standardi EN 1839:2012 (EN, 1839; 2012) (plahvatuspiirid) ja EN 14756:2006 (EN 14756, 2006) (hapniku kontsentratsiooni piiramine) muudetud versioon. Paralleelselt Euroopa standarditega on saadaval ka vastavad USA standardid (ASTM E681 (ASTM E681-09, 2015), ASTM E2079 (ASTM E2079, 2013)). [8]

Föderaalne Materjalide Uurimise ja Katsetamise Instituut (BAM) on läbi viinud teste, et võrrelda USA ja Euroopa standardeid. Gaasidel: vesinikul, etüleenil, metaanil ja ammoniaagil, oli erinev laminaarne põlemiskiirus. Usuti, et katseseadmetest ja katseprotseduuridest tulenevaid erinevusi tulemustes saab kontrollida samade uuritavate ainete mõõtmisega. Gaasi-õhu segudele lisati tundlikkuse suurendamiseks 40 mol% lämmastikku. Kokku kasutati 4 katsemeetodit (vt [Tabel 1.2](#)). [8]

Tabel 1.2 Plahvatuspiiri määramiseks kõige sagedamini kasutatavate standardkatsemeetodite põhiomadused [8: 298]

	DIN 51649-1 tühistati 2004. aastal	EN 1839- T:2004	EN 1839-B:2004	ASTM E681-01
Plahvatus- anum	vertikaalne klaassilinder, avatud Ø = 60 mm H = 300 mm	vertikaalne klaassilinder, avatud Ø = 80 mm H = 300 mm	suletud kera või silinder H/D = 1 kuni 1,5, V > 5 dm ³	kolb, sfääriline V = 5 dm ³ (V = 12 dm ³)
Süüteallikas	induktsiooni sädemed tüüpiline 0,5 s, min. 0,2 s	induktsiooni sädemed tüüpiline 0,2 s, max. 0,5 s	induktsioonsädem ed või plahvatav traat, E = 10 J - 20 J	induktsioonsädem ed või plahvatav traat
Süttimise kriteerium	visuaalne, leegi eraldumine	visuaalne, leegi eraldumine >100 mm või oreool H > 240 mm	rõhu tõus ≥5% + süüterõhk õhus	visuaalne, leegi levik kuni 13 mm seinani (horisontaalne või vertikaalne)
Juurdekasv	0,1 - 0,2 mol%, olenevalt uuritava aine fraktsioonist	10% (suhteline) kuni 0,2 mol% (abs.), olenevalt uuritava aine fraktsioonist	10% (suhteline) kuni 0,2 mol% (abs.), olenevalt uuritava aine fraktsioonist	vabalt valitav, täpsustada aruandes, kui x > 10% (rel.) uuritava aine fraktsioonist
Kordus- katsete arv	5	4	4	1
Plahvatus- piir	viimane mittesüttimis- punkt	viimane mittesüttimis- punkt	viimane mittesüttimispunkt	keskmine väärtus mittesüttimisest ja süttimispunkti

Seadmete ja katsemeetodite parameetrid on samad, mis standardite uusimates versioonides (nt prEN, 1839:2015 ja ASTM E681 - 09), erandiks on ainult ammoniaak. Tänapäeval on Euroopa ja USA standardite kohaselt nn raskesti süttivate ainete jaoks, nagu ammoniaak ja halogeenitud külmutusagensid, saadaval eriprotseduurid. Kolm neljast katsemeetodist (DIN 51649 (DIN 51649, 1986), EN 1839-T (torumeetod), ASTM E681) on nn „avatud tiigli meetodid“, mis rakendavad reaktsiooni kriteeriumina leegi levikut ülespoole. Teine meetod oli "suletud tiigli meetod" EN 1839-B (pommimeetod), mille juures kasutati rõhu tõusu kriteeriumit. [8]

Katsete põhjal tehti järgmised järeldused (vt Tabel 1.3, Joonis 1.3, Joonis 1.4, Joonis 1.5): [8]

- DIN 51649 ja EN 1839-T kohased protseduurid annavad peaaegu kõigil juhtudel identsed tulemused. Põhjus peitub meetodite väga sarnastes testimisseadmetes.
- ASTM-meetod annab paljudel juhtudel sarnase plahvatusvahemiku. Seda saab seletada 5 dm³ kolvi kasutamisega seoses visuaalse tundliku kriteeriumiga. Selle meetodi suureks puuduseks on aga määramata astme suurus seoses plahvatuspiiri määratlusega (keskmine väärtus süttimispunkti ja

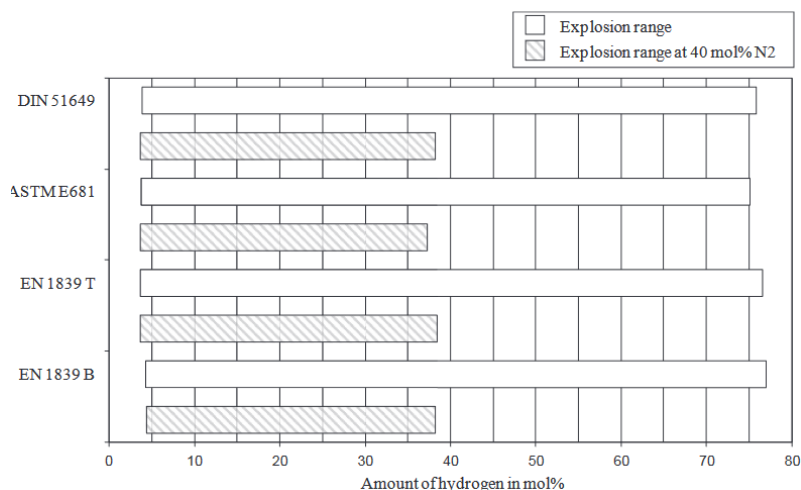
mittesüttimisepunkti vahel). See võib kergesti põhjustada ohtlikke plahvatusandmeid, kui kontsentratsiooniastmeid pole selgelt määratletud.

- Suletud tiigli meetod EN 1839-B näitab kõige tugevamaid kõrvalekaldeid. LEL-id on teiste meetoditega võrreldes kõrgemad ja täheldati selgelt madalamat etüleeni UEL-i. Põhjuseks võib olla kasutatav rõhuläve kriteerium, mis on ilmselt vähem tundlik kui optiline kriteerium. Ammoniaak oli erand, mille UEL oli oluliselt kõrgem.

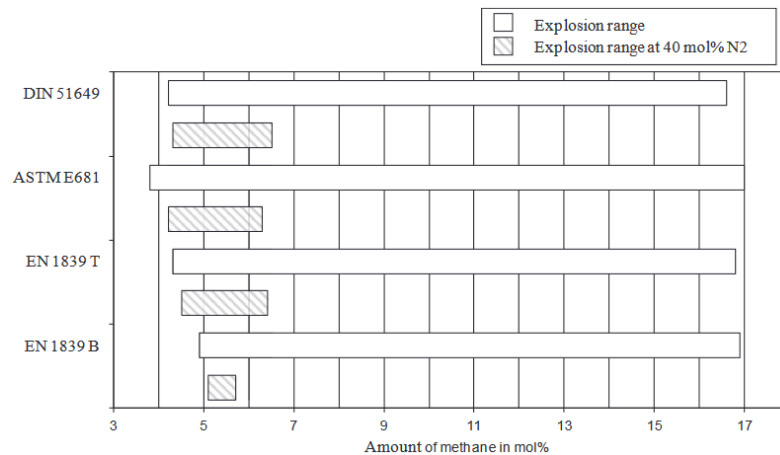
Tabel 1.3 Vesiniku, etüleeni, metaani ja ammoniaagi süttivuspiirid õhus [9: 7]

	DIN 51649-1, (mol%)	EN 1839 (T), (mol%)	EN 1839 (B), (mol%)	ASTM E681, (mol%)
LFL (H ₂ - Õhk)	3,8	2,6	4,2	3,75
UFL (H ₂ - Õhk)	75,8	76,6	77,0	75,1
LFL (C ₂ H ₄ - Õhk)	2,3	2,4	2,6	2,15
UFL (C ₂ H ₄ - Õhk)	33,0	32,6	27,4	33,3
LFL (CH ₄ - Õhk)	4,2	4,3	4,9	3,8
UFL (CH ₄ - Õhk)	16,6	16,8	16,9	16,9
LFL (NH ₃ - Õhk)	14,3	14,3	14,2	13,3
UFL (NH ₃ - Õhk)	31,7	32,5	39,4	32,9

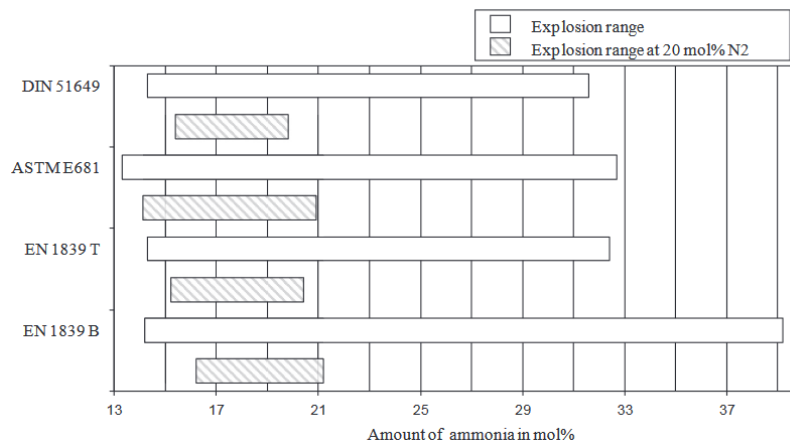
Üldiselt on raskesti süttivate gaaside kõrvalekalded, nt ammoniaagi ja lämmastiku segud, suurimad. Selliseid reaktsioone mõjutavad tugevalt aparadi parameetrid. [8]



Joonis 1.3 Vesiniku-õhu ja vesiniku-lämmastiku-õhu segude plahvatusvahemikud (kõrge põlemiskiirus) [8]



Joonis 1.4 Metaani – õhu ja metaani – lämmastiku – õhu segude plahvatusvahemikud (tavaline põlemiskiirus) [8]



Joonis 1.5 Ammoniaagi – õhu ja ammoniaagi – lämmastiku – õhu segude plahvatusvahemikud (madal põlemiskiirus) [8]

1.4 ÜRO GHS ja ISO10156:2017 standardi klassifikatsioon

Kemikaalid kujutavad erinevatest etappidest alates tootmisest kuni käitlemise, transpordi ja kasutamiseni reaalselt ohtu inimeste tervisele ja keskkonnale. Selle ohuga silmitsi seismiseks ning arvestades tõsiasja, et ulatuslik ülemaailmne kemikaalidega kauplemine ja nende ohutu kasutamise, transpordi ja kõrvaldamise tagamiseks on vaja välja töötada riiklikud programmid, leiti, et rahvusvaheliselt ühtlustatud lähenemisviis klassifitseerimisele ja märgistamisele oleks aluseks selliste programmide jaoks. [10]

Uus süsteem, mille nimeks sai "Kemikaalide klassifitseerimise ja märgistamise globaalne harmoneeritud süsteem" (GHS), käsitleb kemikaalide klassifitseerimist ohuliikide järgi ja pakub välja ühtlustatud ohuteavituselemendid, sealhulgas märgised ja

ohutuskaardid. Selle eesmärk on tagada, et teave kemikaalide füüsikaliste ohtude ja mürgisuse kohta oleks kättesaadav, et tõhustada inimeste tervise ja keskkonna kaitset nende kemikaalide käitlemise, transpordi ja kasutamise ajal. [10]

1.4.1 Definiitsioonid ÜRO GHS

Põlevgaas on gaas, millel on olemas süttimispiirkond õhuga temperatuuril 20 °C ja standardrõhul 101,3 kPa. [3: 51]

Pürofoorsed gaasid on kergestisüttivad gaasid, mis võivad õhus isesüttida temperatuuril 54 °C või alla selle. [3: 51]

Keemiliselt ebastabiilne gaas on süttiv gaas, mis on võimeline plahvatuslikult reageerima ka õhu või hapniku puudumisel. [3: 51]

1.4.2 Klassifitseerimise kriteeriumid ÜRO GHS dokumendi järgi

Tuleohtlikke gaase klassifitseeritakse kategooriatesse 1A, 1B või 2 (vt Tabel 1.4). Pürofoorsed ja/või keemiliselt ebastabiilsed tuleohtlikud gaasid, klassifitseeritakse alati 1A kategooriasse. [3: 51]

Tabel 1.4 Süttivate gaaside klassifitseerimise kriteeriumid [3: 51]

Kategooria	Kriteerium		
1A	Tuleohtlik gaas	<p>Gaasid, mis temperatuuril 20 °C ja standardrõhul 101,3 kPa:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) on süttivad, kui nende mahuprotsendiline sisaldus segus õhuga on 13 % või vähem; või 2) tuleohtlikkuse ulatus õhuga on vähemalt 12 protsendipunkti, olenemata alumisest süttivuspiirist; <p>välja arvatud juhul, kui andmed näitavad, et nad vastavad kategooria 1B kriteeriumidele</p>	
	Pürofooriline gaas	Tuleohtlikud gaasid, mis süttivad iseeneslikult õhu käes temperatuuril 54 °C või alla selle	
	Keemiliselt ebastabiilne gaas	A	Tuleohtlikud gaasid, mis on temperatuuril 20 °C ja standardrõhul 101,3 kPa keemiliselt ebastabiilsed
		B	Tuleohtlikud gaasid, mis on keemiliselt ebastabiilsed temperatuuril üle 20 °C ja/või rõhul üle 101,3 kPa
1B	Tuleohtlik gaas	<p>Gaasid, mis vastavad 1A kategooria süttivuskriteeriumidele, kuid mis ei ole pürofoorsed ega keemiliselt ebastabiilsed ja millel on vähemalt üks:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) alumine süttivuspiir õhus üle 6 mahuprotsendi; või 2) põhipõlemiskiirus on väiksem kui 10 cm/s; 	
2	Tuleohtlik gaas	Muud gaasid, mis ei kuulu 1A või 1B kategooriatesse ning millel on temperatuuril 20 °C ja standardrõhul 101,3 kPa süttimispiirkond õhus segatuna	

1.4.3 Otsustusloogika süttivate gaaside jaoks

Süttiva gaasi klassifitseerimiseks on vaja andmeid selle süttivuse, õhus süttimisvõime ja keemilise ebastabiilsuse kohta. Kategooriasse 1B klassifitseerimise korral on vaja andmeid selle alumise süttivuspiiri või põhipõlemiskiiruse kohta. Liigitamine toimub vastavalt otsustusloogikale joonisele lisa 2 (vt [Lisa 2](#)). [3: 52]

1.4.4 Tuleohtliku gaasisegu klassifikatsioon arvutuse teel ÜRO GHS dokumendi järgi

Tuleohtliku gaasisegu saab klassifitseerida võrrandiga: [3: 55]

$$\sum_i^n \frac{V_i \%}{T_{Ci}} > 1; \quad (1.4)$$

kus

T_{Ci} – tuleohtliku gaasi maksimaalne sisaldus, mis segatuna lämmastikuga ei ole õhus süttiv, %;

V_i – tuleohtliku gaasi sisaldus, %;

Tuleohtlike gaaside segu kõrgeim mittesüttiv kontsentratsioon (T_{Ci}) saab leida valemiga: [11: 24]

$$T_{Ci,mix} = \frac{\sum A_i}{\sum \left(\frac{A_i}{T_{Ci}} \right)}; \quad (1.5)$$

kus

$T_{Ci,mix}$ – tuleohtlikest gaasidest koosneva segu maksimaalne sisaldus, mis segatuna lämmastikuga ei ole õhus süttiv, %;

T_{Ci} – tuleohtliku gaasi maksimaalne sisaldus, mis segatuna lämmastikuga ei ole õhus süttiv, %;

A_i – tuleohtliku gaasi sisaldus, %;

Mõnede süttivate gaaside ja aurude T_{Ci} väärtused on toodud lisades 3 ja 4 (vt [Lisa 3](#) ja [Lisa 4](#)).

1.4.5 ISO 10156:2017 standard

ISO (International Organisation of Standardization) on ülemaailmne riiklike standardiorganisatsioonide (ISO liikmesorganite) liit. Rahvusvaheliste standardite ettevalmistamine toimub tavaliselt ISO tehniliste komiteede kaudu. [11]

Dokument ISO10156:2017 määrab kindlaks meetodid, mille abil saab määrata, kas gaas või gaasisegu on õhus süttiv või mitte, ja kas gaas või gaasisegu on atmosfääritingimustes õhust rohkem või vähem oksüdeeriv. Dokument on mõeldud kasutamiseks gaaside ja gaasisegude klassifitseerimiseks, sealhulgas gaasiballooni klapi väljalaskeavade valimiseks. [11]

1.4.6 Gaasi segude klassifitseerimine ISO 10156:2017 järgi

Kui segu sisaldab tuleohtlikku gaasi ja oksüdeerivaid gaase, võib seda klassifitseerida ühte järgmisest neljast kategooriast: [11: 21]

- a) mittesüttiv ja mitteoksüdeeriv, kui hapnikusisaldus on alla või võrdne 23,5 % ja tuleohtlike gaaside sisaldus on alla $T_{Ci,F}$ või LFL ;
- b) oksüdeeriv, kui hapnikusisaldus on üle 23,5 % ja tuleohtlike gaaside sisaldus on alla LFL ;
- c) tuleohtlik, kui tuleohtlike gaaside sisaldus on suurem kui $T_{Ci,F}$ ja suurem kui LFL ;
- d) potentsiaalselt plahvatusohtlik, kui hapnikusisaldus on suurem kui hapniku piirkontsentratsioon (LOC) ja tuleohtlike gaaside sisaldus on suurem kui LFL ja $T_{Ci,F}$.

Ülaltoodud punktide järgi saab teha järelduse, et segu on tuleohtlik kui see rahuldab mõlemat kriteeriumi: [11: 22]

- tuleohtliku gaasi kontsentratsioon (A_i) $\geq LFL$
- tuleohtliku gaasi kontsentratsioon (A_i) $> T_{Ci,F}$

$$T_{Ci,F} = T_{Ci} \cdot (1 - x_0/21\%); \quad (1.6)$$

kus

T_{Ci} – tuleohtliku gaasi maksimaalne sisaldus, mis segatuna lämmastikuga ei ole õhus süttiv, %;

x_0 – hapniku kontsentratsioon (mis on alla 21 %), %;

Kui segu sisaldab teisi inertseid komponente peale lämmastiku, siis: [11: 25]

$$T_{Ci,F} = T_{Ci} \cdot (1 - OP/21\%); \quad (1.7)$$

$$OP = \frac{\sum_{i=1}^n x_i C_i}{\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{k=1}^p K_k B_k}; \quad (1.8)$$

kus

OP – oksüdatsioonivõime; mõõdeteta arv, mis võrdleb gaasi või gaasisegu oksüdatsioonivõimet hapniku omaga;

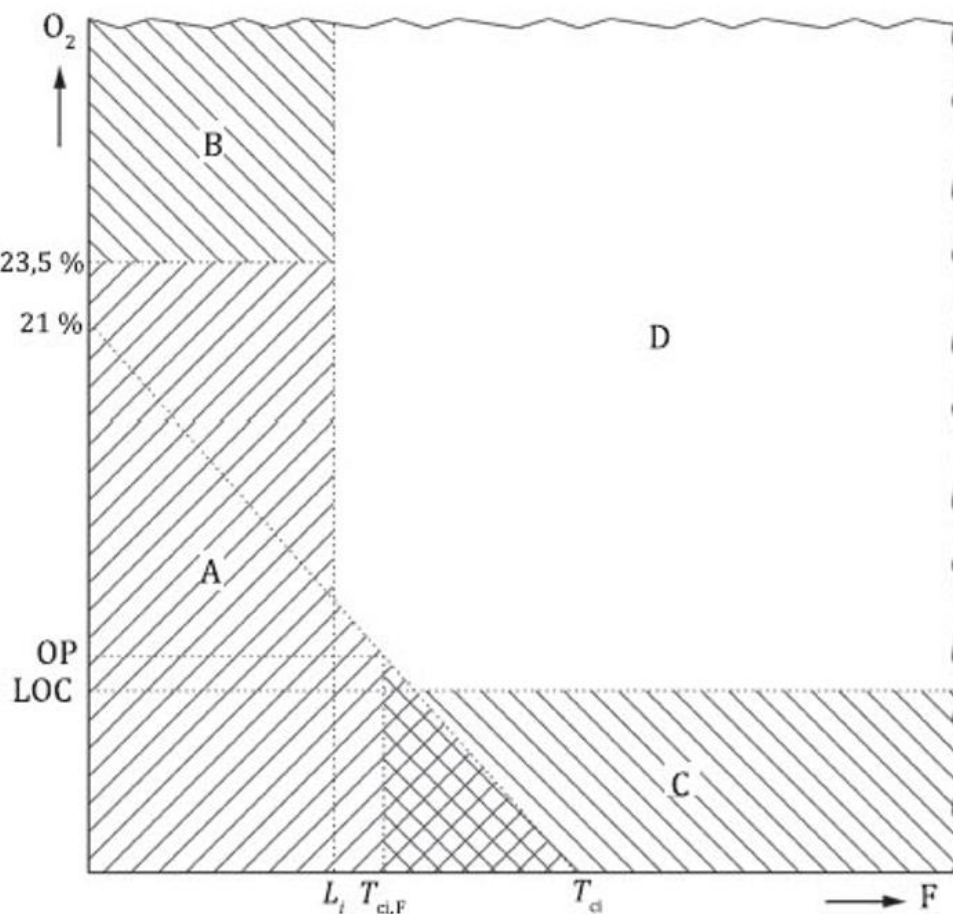
x_i – komponendi kontsentratsioon, vol/vol;

C_i – oksüdeerivate gaaside koefitsient;

K_k – lämmastiku ekvivalentsuse koefitsient;

B_k – inertgaaside molaarsed fraktsioonid;

Klassifikatsiooni alus on näidatud joonisel 1.6 (vt Joonis 1.6). Joon T_{ci} kuni 21% hapnikusisalduseni näitab piirava segu (kõrgeim mittesüttiv kontsentratsioon süttiva gaasi lämmastikus) segunemist õhuga. Tulehtliku gaasi maksimaalse kontsentratsiooni ($T_{ci,F}$), et segu oleks mittesüttiv, saab määrata oksüdatsioonivõime (OP) väärtuse ja sama joone lõikepunkti järgi. [11: 22]



Joonis 1.6 Tulehtliku segu klassifikatsiooni alus [11: 23]

Joonise 1.6 võti: [11: 23]

F – tuleohtliku gaasi kontsentratsioon, %;

O_2 – hapniku kontsentratsioon, %;

A – segu on mittesüttiv ja mitteoksüdeeruv;

B – segu on oksüdeeriv;

C – segu on süttiv;

D – segu on potentsiaalselt plahvatusohtlik;

OP – oksüdatsioonivõime; mõõtmata arv, mis võrdleb gaasi või gaasisegu oksüdatsioonivõimet hapniku omaga;

T_{Ci} – tuleohtliku gaasi maksimaalne sisaldus, mis segatuna lämmastikuga ei ole õhus süttiv, %;

$L_i = LFL$ – süttivuse alumine piir, %;

$T_{Ci,F}$ – tuleohtliku gaasi maksimaalne sisaldus, mis segatuna lämmastikuga ei ole õhus süttiv, kui segu sisaldab hapniku, %;

2. SÜTTIVUSPIIRIDE (PLAHVATUSPIIRIDE) ARVUTAMISEGA SEOTUD DEFINITSIOONID

Süttivuspiiride hindamiseks on saadaval mitmeid väga ligikaudseid meetodeid. Kriitiliste ohutusväärtuste puhul on aga alati soovitatav katseline määramine, mis on võimalikult lähedal tegelikele protsessitingimustele. [2: 23-8]

2.1 Stõhhiomeetriline kontsentratsioon

Paljude süsivesinikuaurude puhul saab LFL-i ja UFL-i hinnata kütuse stõhhiomeetrilise kontsentratsiooni järgi: [2: 23-8]

$$\text{LFL} = 0,55 \cdot C_{\text{st}}; \quad (2.1)$$

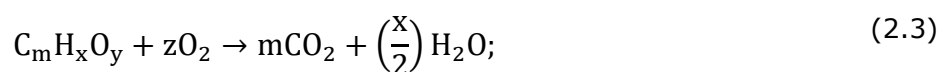
$$\text{UFL} = 3,50 \cdot C_{\text{st}}; \quad (2.2)$$

kus

C_{st} – kütuse stõhhiomeetriline kontsentratsioon;

LFL, UFL – vastavalt alumine ja ülemine süttivuspiir;

Stõhhiomeetrilise põlemisvõrrandi jaoks: [2: 23-8]



$$z = m + \frac{x}{y} - \frac{y}{2}; \quad (2.4)$$

$$C_{\text{st}} = \frac{100}{1 + z/0,21}; \quad (2.5)$$

2.2 Hapniku piirkontsentratsioon (LOC)

Hapniku piirkontsentratsioonist (*LOC*) madalamal ei ole võimalik põlemist toetada, sõltumata kütuse kontsentratsioonist. LOC-i väljendatakse hapniku mahuprotsendi ühikutes. See sõltub rõhust, temperatuurist ja inertgaasist. Lisa 5 tabelis on loetletud mitmed LOC-d ning samuti LOC-i erinevust, kui lämmastiku asemel on inertgaasiks süsinikdioksiid (vt [Lisa 5](#)). [2: 23-8]

LOC-i saab hinnata paljude süsivesinike jaoks valemiga: [2: 23-8]

$$\text{LOC} = z \cdot \text{LFL}; \quad (2.6)$$

kus

z – hapniku stöhhiomeetriline koefitsient (vt Valem 2.4);

LOC – hapniku piirkontsentratsioon, %;

LFL – alumine süttivuspiir, %;

LOC segude jaoks võib leida: [12: 5]

$$L_i^* = \frac{(LOC)_i}{R_i}; \quad (2.7)$$

$$L_{mixt}^* = \frac{(LOC)_{mixt}}{R^*}; \quad (2.8)$$

$$L_i^* = \frac{1}{\sum x_i/L_i^*}; \quad (2.9)$$

kus

R_i - hapniku ja i komponendi stöhhiomeetriline molaarsuhe;

R^* - hapniku ja segu stöhhiomeetriline suhe;

$(LOC)_i$ – komponendi i LOC väärtus;

$(LOC)_{mixt}$ – arvutatud LOC segu kohta;

L_i^* - komponendi i LFL;

L_{mixt}^* - segu LFL;

x_i – komponendi i mooliosa, %

Teisendades valemeid (2.7, 2.8 ja 2.9) saame:

$$(LOC)_{mixt} = \sum x_i R_i / \sum x_i L_i^* = \sum x_i R_i / \sum x_i R_i / (LOC)_i; \quad (2.10)$$

Binaarse süsteemi jaoks (a, b):

$$(LOC)_{mixt} = (x_a R_a + x_b R_b) / [(x_a R_a) / (LOC)_a + (x_b R_b) / (LOC)_b] \quad (2.11)$$

2.3 Süttivuse diagramm

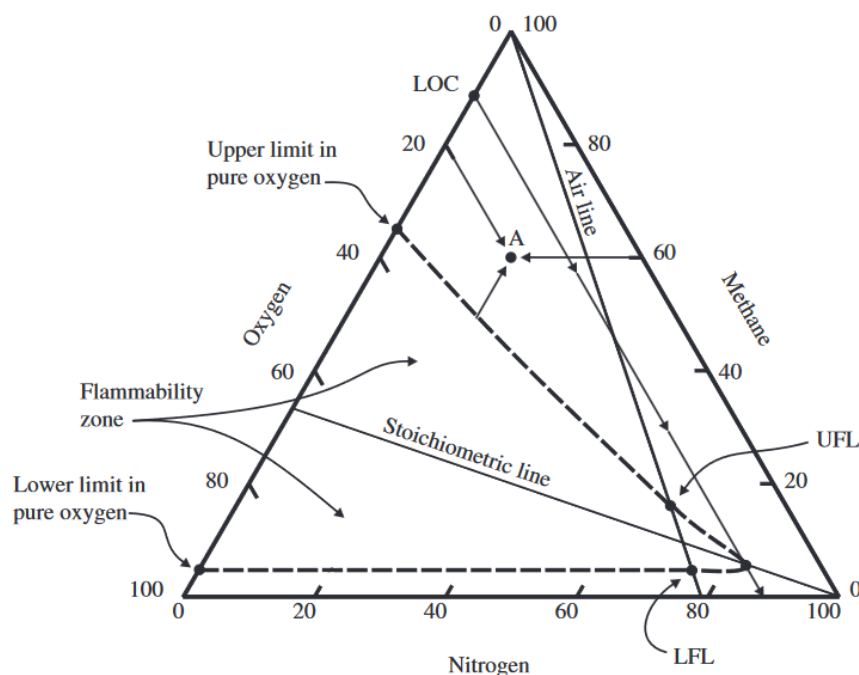
Tuleohtlike materjalide ohu tuvastamine hõlmab olukorra (temperatuur, rõhk ja koostis) kindlaksmääramist, milles materjal on tuleohtlik. Koostise mõjude puhul on gaasi või auru süttivuse üldiseks kujutamiseks kolmnurk- või ternaridiagramm ehk süttivuse diagramm. Kütuse, hapniku ja inertse aine kontsentratsioonid (mahu- või

mooliprotsentides) kantakse kolmele teljele. Kolmnurga iga tipp esindab kas 100% kütust, hapnikku või lämmastikku. Teljedel olevad linnukesed näitavad suunda, milles skaala üle joonise liigub (vt Joonis 2.1). [7: 18]

2.3.1 Süttivuse diagrammi koostamine

Joonisel 2.1 on kujutatud tüüpilist süttivuse diagrammi (vt Joonis 2.1). Punkt *A* näitab, kuidas skaalad on orienteeritud – diagrammi mistahes punktis peavad kontsentratsioonid kokku saama 100 protsenti. Punktis *A* on 60% kütust, 20% hapnikku ja 20% lämmastikku. Õhujoon (Air line) esindab kõiki võimalikke kütuse ja õhu kombinatsioone – see lõikub lämmastiku teljega 79% kohas, mis on selle protsent õhus (21% O₂ õhus). Stõhhiomeetiline joon (Stoichiometric line) tähistab kõiki kütuse ja hapniku stõhhiomeetrilisi kombinatsioone. Kui põlemisreaktsioon on kirjutatud võrrandi (2.3) järgi, siis stõhhiomeetrilise sirge lõikekoht hapniku teljega saadakse järgmiselt: [2: 23-8]

$$100 \cdot \left(\frac{z}{1+z} \right); \quad (2.12)$$



Joonis 2.1 Metaani süttivuse diagramm algtemperatuuril ja rõhul (25 °C ja 1 atm) [2: 23-9]

Enamiku süsivesinike aurude tüüpiline süttivusala on näidatud joonisel 2.1. Igasugune kontsentratsioon süttivuspiirkonnas on tuleohtlik (vt Joonis 2.1). [2: 23-9]

LOC leitakse kohas, kus madalaim konstantne hapnikukontsentratsioon lõikub

süttivustsoone ninaga. [2: 23-9]

Mitmed reeglid süttivusdiagrammide kasutamiseks: [2: 23-9]

- 1) Kui segatakse kaks gaasisegu R ja S , saadud segu koostis asub joonel, mis ühendab süttivusdiagrammil punkte R ja S . Lõpliku segu asukoht sirgjoonel sõltub kombineeritud segude suhtelistest moolidest: Kui segul S on rohkem mooli, asub lõplik segupunkt lähemal punktile S . See on identne faasidiagrammide jaoks kasutatava kangireeglina.
- 2) Kui segu R pidevalt lahjendatakse seguga S , liigub segu koostis mööda sirgjoont süttivusdiagrammi punktide R ja S vahel. Lahjendamise jätkudes, liigub segu koostis punktile S aina lähemale. Lõpmatu lahjenduse korral segu koostis asub punktis S .
- 3) Süsteemide puhul, mille koostispunktid langevad sirgjoonele, mis läbib ühele puhtale komponendile vastavat tippu, on ülejäänud kaks komponenti kogu joone pikkuses fikseeritud vahekorras.

Täielik süttivusdiagramm nõuab põlemissfääris sadu katseid. Ligikaudse diagrammi saab siiski joonestada, kasutades LFL , UFL , LOC ja puhta hapniku süttivuspiire. Kasutatakse järgmist protseduuri: [2: 23-10]

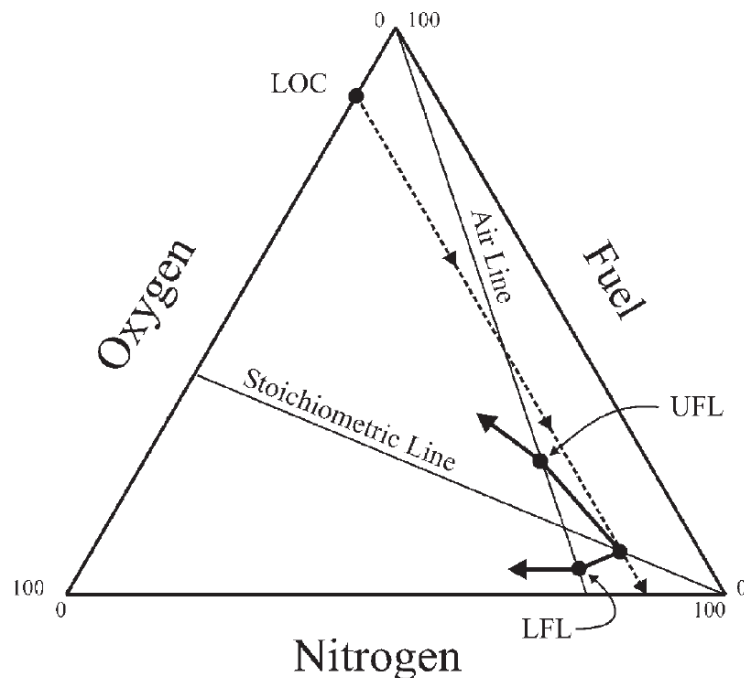
- 1) Joonestada süttivuspiirid õhus punktidenäna õhujoone peal, kasutades kütuse telje väärtusi.
- 2) Joonestada süttivuspiirid hapnikus punktidenäna hapniku teljele, kasutades kütuse telje väärtusi. Tabelis 2.1 on toodud mõnede ainete süttivuspiiride puhtas hapnikus (vt Tabel 2.1).
- 3) Kasutades valemit (2.12) joonestada punkt hapniku teljel ja seejärel joonestada stöhhiomeetriline joon sellest punktist kuni 100% lämmastiku tipuni.
- 4) Leida hapniku teljel LOC punkt. Joonestada kütuse teljega paralleelne joon kuni see lõikub stöhhiomeetrilise joonega. Märkida punkt ristumiskohas.
- 5) Ühendada punktid, et hinnata süttivustsooni.

Tabel 2.1 Süttivuspiirid puhtas hapnikus [2: 23-10]

Nr	Komponent	Valem	Süttivuse piirid puhtas hapnikus	
			Alumine, %	Ülemine, %
1	Vesinik	H ₂	4,0	94
2	Süsinikoksiid	CO	15,5	94
3	Ammoniaak	NH ₃	15,0	79
4	Metaan	CH ₄	5,1	61
5	Etaan	C ₂ H ₆	3,0	66

6	Etüleen	C_2H_4	3,0	80
7	Propüleen	C_3H_6	2,1	53
8	Tsüklopropaan	C_3H_6	2,5	60
9	Dietüüleeter	$C_4H_{10}O$	2,0	82
10	Divinüüleeter	C_4H_6O	1,8	85

Kui algandmed sisaldavad ainult süttivuspiire õhus ja LOC-i, siis tuleb kasutada punkte 1,3 ja 4 ülaltoodud protseduurist. Sel juhul saab ühendada ainult süttivusala „ninas“ olevad punktid. Õhujoonest hapnikuteljeni ulatuvat süttivustsooni ei saa ilma lisaandmedeta üksikasjalikult kirjeldada, kuigi see ulatub kuni hapnikuteljeni ja tavaliselt laieneb. Alumist piiri saab ligikaudselt hinnata ka LFL-iga (vt Joonis 2.2). [7: 27]

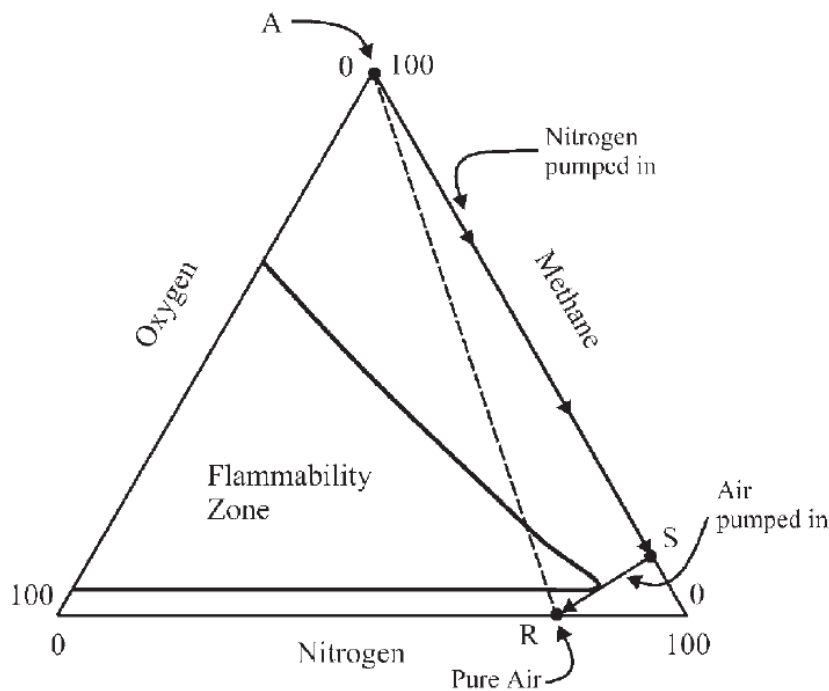


Joonis 2.2 Süttivuse diagramm kui algandmetest on ainult LOC ning LFL ja UFL õhus [7: 27]

2.3.2 Süttivuse diagrammi kasutamine tuleohtliku atmosfääri vältimiseks

Joonisel 2.3 on näidatud, kuidas saab vältida tuleohtliku tsooni õhu sisestamisel protsessiseadmesse (nt tsisterni või torusse) (vt Joonis 2.3). Sellisel juhul sisestatakse lämmastiku torusse, kuni saavutatakse kontsentratsioon punktis *S*. Seejärel saab õhu sisestada kuni punktini *R*. [7: 117]

Algul on tsisternis kompositsioon, mis vastab punktile A , mis sisaldab puhast kütust. Kui nüüd pumbatakse sinna lämmastikku, liigub gaasi koostis piki sirget AS . Üks lähenemisviis oleks jätkata lämmastiku sissepumpamist, kuni tsistern sisaldaks puhast lämmastikku. See nõuaks aga suures koguses lämmastikku ja oleks kulukas. Kuluefektiivsem protseduur on inertseerida lämmastikuga kuni punkti S saavutamiseni. Seejärel saab sisestada õhku, kusjuures gaasi koostis järgib joonisel 2.3 näidatud joont SR . Sel juhul välditakse süttivustsooni ja tagatakse ohutu tsisterni ettevalmistamise protseduur. [7: 117]



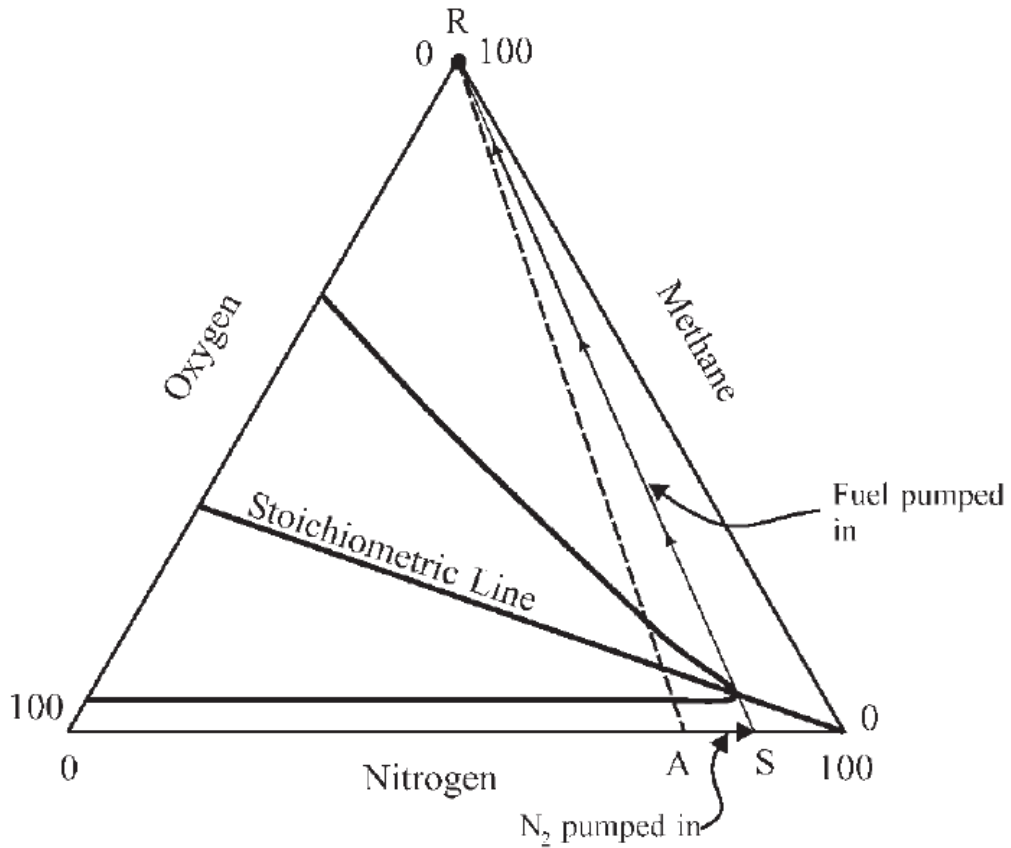
Joonis 2.3 Meetod tuleohtlikkuse tsooni vältimiseks protsessiseadme kasutusest kõrvaldamisel [7: 117]

Nüüd on probleemiks punkti S asukoha määramine. Ilmselgelt on ideaalne võimalus omada täielikke süttivusandmeid, eriti tuleohtlikkuse tsooni „nina“ ümbruses. Kasutusest väljas oleva kütuse kontsentratsioon ($OSFC$ või T_{Ci} , mis on Euroopa ekvivalent) tähistab maksimaalset kütusekontsentratsiooni joonise 2.3 punktis S , mis väldib süttivustsooni. Praktilisest seisukohast on soovitatav kütusekontsentratsioon, mis on väiksem kui tabelis Lisa 6 näidatud väärtused, et tagada kontsentratsioonide jäämine süttivuspiirkonnast kaugemale (vt [Lisa 6](#)). [7: 118]

Joonisel 2.4 on näidatud protsessiseadme (nt tsisterni või toru) kasutuselevõtu protseduur. Tsisternis on õhk, mis on näidatud punktina A (vt [Joonis 2.4](#)).

Lämmastikku pumbatakse tsisterni kuni punkti S saavutamiseni. Seejärel pumbatakse kütust sisse, järgides joont SR kuni punkti R saavutamiseni. Probleemiks on hapniku

(või lämmastiku) kontsentratsiooni määramine punktis S . Seda saab teha katseandmete abil, mille tulemused on toodud tabelis Lisa 6 (vt [Lisa 6](#)). Kasutusel olev hapniku kontsentratsioon (*ISOC* on sama, mis LOC) tähistab maksimaalset hapniku kontsentratsiooni joonisel 2.4 punktis S , mis väldib süttivustsooni. Samamoodi nagu kütusekontsentratsiooni puhul praktilisest vaatenurgast oleks soovitatav hapniku kontsentratsioon, mis on mõnevõrra väiksem tabelis Lisa 6 näidatud väärtustest, et tagada kontsentratsioonide püsimine süttivustsoonist kaugel (vt [Lisa 6](#)). [7: 118]



Joonis 2.4 Meetod tuleohtlikkuse tsooni vältimiseks protsessiseadme kasutuselevõtul [7: 118]

3. PLAHVATUSPIIRIDE ARVUTAMISE MEETODID

Gaasisegude tuleohtlikku käitumist ei mõisteta praegu täielikult – kõige parem on seda käitumist katseliselt määrata protsessitingimustele võimalikult lähedastes tingimustes. [7: 31]

Segude süttivuspiiride hindamiseks kasutatakse tavaliselt kahte meetodit: Le Chatelier reeglil põhinev meetod ning kriitilise adiabaatilise leegi temperatuuri (*CAFT*) meetod. [7: 31]

3.1 Le Chatelier reegli laiendustel põhinev meetodika

Le Chatelier töötas välja lihtsa, aditiivse iseloomuga valemi, et ühendada kahe gaasi alampiirid nende segude alumiste piiridega: [6: 5]

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1; \quad (3.1)$$

kus

N_1 ja N_2 – alumised piirid iga komponendi jaoks õhus;

n_1 ja n_2 – iga komponendi protsendiline sisaldus segus;

Le Chatelier valem väikese algebralise teisendusega annab kasuliku võimaluse arvutada mis tahes põlevate gaaside segu piirmäärad: [6: 6]

$$LFL = \frac{100}{\frac{p_1}{N_1} + \frac{p_2}{N_2} + \frac{p_3}{N_3} + \dots}; \quad (3.2)$$

kus

LFL – segu alumine süttivuspiir, %;

p_1, p_2, p_3 – iga algses segus oleva põleva gaasi osakaal, mis ei sisalda õhku ja inertgaase, nii et

$$p_1 + p_2 + p_3 + \dots = 100$$

N_1, N_2, N_3 – iga põleva gaasi alumised süttimispiirid, %;

Gaasisegu alumise ja ülemise süttivuspiiri arvutamise protseduur on järgmine: [6: 6]

- 1) Segu koostis arvutatakse esmalt ümber õhuvabaks; iga gaasi kogust väljendatakse protsentides kogu õhuvaba segust.
- 2) Õhuvaba segu jagatakse lihtsamateks segudeks, millest igaüks sisaldab ainult ühte tuleohtlikku gaasi ja osaliselt või täielikult lämmastikku või süsinikdioksiidi.

- 3) Iga selliselt jagatud segu piirid loetakse tabelitelt või kõveratelt (vt Lisa 7)
- 4) Õhuvaba segu piirid arvutatakse punktis 3 saadud tükeldatud segude arvude põhjal valemi (2.14) abil.
- 5) Saadud õhuvaba komplekssegu piiridest tuletatakse esialgse komplekssegu piirid.

Kui inertgaasi kogus on nii suur, et tervet rida süttivaid segusid ei saa jagada, ei ole õhuvaba segu tuleohtlik. Peale selle võib õhuvaba segu olla tuleohtlik, kuid kui selle piirmäärad korrutatakse arvutuse viimases etapis vastava teguriga, võib tulemus olla suurem kui 100 iga piirmäära kohta; siis algne segu ei ole võimeline moodustama õhuga plahvatusohtlikku segu, kuna see juba sisaldab liiga palju õhku. Lõpuks, kui algsegu alumine piir on alla 100 ja ülempiir suurem kui 100, on segu iseenesest tuleohtlik ja süttimisallika olemasolul plahvatab. [6: 8]

Le Chatelier reegli valemit saab kirjutada ka järgmiselt: [2: 23-7]

$$LFL_{\text{mix}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{LFL_i}}; \quad (3.3)$$

kus

LFL_i – komponendi i alumine süttivuspiir, %;

y_i – komponendi i mooliosa põleva aine baasil;

n – põlevate komponentide arv;

LFL_{mix} – segu alumine süttivuspiir, %;

Le Chatelier reegel on tuletatud empiirilisel ega ole universaalselt rakendatav. Le Chatelier reeglis on järgmised eeldused: [2: 23-7]

- soojusmahtuvused on konstantsed;
- gaasi moolide arv on konstantne;
- puhaste komponentide põlemiskineetika on sõltumatu ja muutumatu teiste põlevate komponentide olemasolust;
- adiabaatiline temperatuuritõus süttimispiiril on kõikide komponentide puhul ühesugune;

Need eeldused kehtivad rohkem LFL-i ja vähem UFL-i kohta, kuigi valemit (3.3) saab kirjutada UFL-i jaoks. [7: 31]

3.2 Arvutatud adiabaatilise leegi temperatuuri (CAFT) meetod

Adiabaatiline leegi temperatuur on definitsiooni järgi maksimaalne võimalik temperatuur, mis saavutatakse reaktsiooniga konstantse rõhu protsessis. [4: 42]

Arvutatud adiabaatiline leegi temperatuur (*CAFT*) on võimas tööriist keeruliste gaasisegude süttivuspiiride hindamiseks. Üks protseduur on kasutada CAFT-i piirväärtust 1200 K nii ülemise kui ka alumise süttivuspiiri jaoks – teisi väärtusi kasutatakse sõltuvalt sellest, kas soovitakse rohkem või vähem konservatiivseid tulemusi. [7: 50]

Uuringud on näidanud, et see lähenemisviis toimib üsna hästi kogu süttivusdiagrammi tuleohtlikkuse tsooni hindamisel. Need uuringud on samuti näidanud, et ülempiiri edukust hinnatakse täielikult ainult siis, kui kaasatakse vahepealsed ebastabiilsed liigid, kasutades tasakaalukoodi. Alumist piiri saab hinnata vaheliikidega või ilma. [7: 50]

4. PLAHVATUSOHUTSOONID JA NENDE MÄÄRAMINE

Tuleohtlike materjalide töötlemise või ladustamisega seotud protsessiseadmed peavad olema projekteeritud, ekspluateeritud ja hooldatud nii, et tuleohtlike ainete lekked ja sellest tulenevate plahvatusohtliku tsooni suurused normaalse töö režiimi ja õnnetuste ajal oleksid minimaalsed nii sageduse, kestuse kui ka eralduva tuleohtliku aine koguse puhul. [13: 4]

Olukordades, kus võib tekkida plahvatusohtlik gaaskeskkond, tuleb järgida järgmisi ettevaatusabinõusid: [13: 4]

- välistada plahvatusohtliku gaaskeskonna tekkimise võimalus süüteallika ümber; või
- kõrvaldada süüteallikas.

Juhtudel, kui ettenähtud ohutusabinõusid ei ole võimalik tagada, peavad kaitsevahendid, tehnoloogilised seadmed, süsteemid ja tehnoloogilise protsessi läbiviimise kord olema sellised, et a) plahvatusohtlik gaaskeskkond ja b) süttimise allika samaaegse esinemise tõenäosus oleks madalam lubatud tasemest. Nõutava ohutustaseme saab tagada kas ühe loetletud meetme abil, kui see osutub tõhusaks, või nende kombineerimisega. [13: 5]

4.1 Terminid

Plahvatusohtlik keskkond: keskkond, mis atmosfääritingimustes on õhu ja tuleohtlike ainete nagu gaasi, auru, tolmu, kiudude või lenduvate osakeste segu, milles pärast süttimist toimub leegi iseseisev levik. [13: 2]

Plahvatusohtlik gaaskeskkond: keskkond, mis atmosfääritingimustes on õhu ja tuleohtlike ainete nagu gaasi, auru või aerosooli segu, milles pärast süttimist toimub iseseisev leegi levik. [13: 2]

Plahvatusohutsoon: (plahvatusohtliku gaaskeskonna jaoks): osa suletud või avatud ruumist, kus esineb või võib tekkida plahvatusohtlik gaasisegu sellises mahus, mis nõuab erilisi kaitsemeetmeid seadmete projekteerimisel, valmistamisel ja kasutamisel. [13: 2]

Mitte plahvatusohutsoon: (plahvatusohtliku gaaskeskonna jaoks): osa suletud või avatud ruumist, kus plahvatusohtlik keskkond puudub sellisel määral, mis nõuab erilisi kaitsemeetmeid seadmete projekteerimisel, valmistamisel, paigaldamisel ja kasutamisel. [13: 2]

Plahvatusohutsoonide klassid: plahvatusohutsoonid jaotatakse klassidesse sõltuvalt nendes plahvatusohtliku gaaskeskonna esinemise sagedusest ja kestusest. [13: 2]

0. klassi tsoon (tsoon 0): piirkond, kus plahvatusohtlik gaaskeskond esineb pidevalt või pikka aega või sageli. [13: 2]

1. klassi tsoon (tsoon 1): piirkond, kus tavalistes töötingimustes võib aeg-ajalt või juhuslikult esineda plahvatusohtlikku gaaskeskonda. [13: 2]

2. klassi tsoon (tsoon 2): piirkond, kus plahvatusohtliku gaaskeskonna tekkimise tõenäosus tavalistes töötingimustes on ebatõenäoline ja kui see siiski tekib, siis lühiajaliselt. [13: 2]

Eraldumisallikas (lekkeallikas): protsessiseadmete komponent, millest võib atmosfääri paiskuda plahvatusohtliku gaaskeskonna tekitamiseks piisavas mahus tuleohtlikku gaasi, auru, udu või vedelikku. [13: 3]

Eraldumisallikate astmed (lekkeastmed): on kolm peamist eraldumisastet, mis on loetletud allpool plahvatusohtliku gaaskeskonna esinemise sageduse ja tõenäosuse kahanevas järjekorras. Lekkeallikat võib iseloomustada mis tahes lekkeaste või nende kombinatsioon: [13: 3]

- pidev leke;
- esimene aste;
- teine aste.

Pidev leke (kestev): leke, mis eksisteerib pidevalt, sageli või pikka aega. [13: 3]

Esimese astme leke (primaarne): leke, mille esinemine on protsessiseadmete normaalse töötamise ajal perioodiline või juhuslik. [13: 3]

Teise astme leke (sekundaarne): leke, mis puudub protsessiseadmete normaalse töö ajal ja kui see tekib, on see haruldane ja lühiajaline. [13: 3]

Leke intensiivsus (kiirus): lekkeallikast ajaühikus eralduva tuleohtliku aine või auru kogus. [13: 3]

Normaalne töörežiim (normaaltalitus): seadme töörežiim, mille puhul selle omadused jäävad tootja poolt tehnilises dokumentatsioonis määratud väärtustesse. [13: 3]

Ventilatsioon: õhu liikumine ja selle asendamine värske õhuga tuule või kunstlike vahendite toimetel (näiteks sissepuhke- või väljatõmbeventilaatorid). [13: 3]

Gaasi või auru suhteline tihedus: gaasi või auru tiheduse ja õhu tiheduse suhe samal rõhul ja temperatuuril (õhu tihedus on 1). [13: 3]

Tuleohtlik materjal (süttiv aine): materjal, mis on võimeline isesüttima või moodustama süttiva gaasi, auru või aerosooli. [13: 3]

Tuleohtlik vedelik: vedelik, mis on ettenähtavatel kasutustingimustel võimeline moodustama tuleohtlikke aure. [13: 3]

Tuleohtlik gaas või aur: gaas või aur, mis teatud vahekorras õhuga segatuna moodustab plahvatusohtliku gaaskeskkonda. [13: 3]

Tuleohtlik udu: väikesed tuleohtliku vedeliku tilgad, mis hajuvad õhku ja moodustavad plahvatusohtliku segu. [13: 3]

Keemistemperatuur: vedeliku temperatuur, mis keeb ümbritseva õhurõhul 101,3 kPa (1013 mbar). [13: 4]

Aururõhk: rõhk, mille juures tahke aine või vedelik on tasakaalus oma auruga. See väärtus sõltub ainest ja temperatuurist. [13: 4]

Plahvatusohtliku gaaskeskkonna süttimistemperatuur: kuumutatud pinna madalaim temperatuur, mis antud tingimustes süttib õhuga segunenud gaasi või auru kujul süttivaid aineid. [13: 4]

Tsooni ulatus: kaugus mis tahes suunas lekkeallikast punktini, kus gaasi-õhu segu lahjendatakse õhuga kontsentratsioonini, mis on väiksem kui leegi levimise alumine kontsentratsioonipiir (LFL). [13: 4]

Veeldatud tuleohtlik gaas: tuleohtlik aine, mida ladustatakse või transporditakse vedelikuna ja mis ümbritseva õhu temperatuuril ja atmosfäärirõhul on tuleohtlik gaas. [13: 4]

Katastroofiline rike: olukord, mida ei ole korralikult läbi vaadatud ja mille tulemuseks on tuleohtliku materjali märkimisväärne eraldumine. [13: 4]

Harv rike: teatud tüüpi rike, mis esineb ainult harvadel juhtudel. [13: 4]

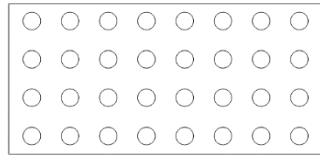
4.2 Plahvatusohutsoonide klassifitseerimine

Plahvatusohutsooni klassifitseerimisel tuleb määrata lekkeallikad ja astmed [13: 8]. Samuti tuleb arvestada plahvatusohtliku gaasi eraldumise tõenäolist sagedust ja kestust, eraldumismäära, kontsentratsiooni, eraldumise kiirust, ventilatsiooni ja muid tsooni liiki ja ulatust mõjutavaid asjaolusid [14].

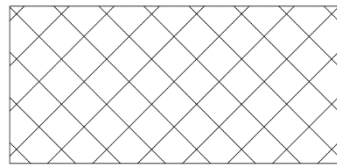
4.2.1 Plahvatusohutsoonide klassid

Plahvatusohtliku gaaskeskkonna esinemise tõenäosus piirkonnas ja seega ka selle klass sõltub peamiselt lekkeastmest ja ventilatsiooni tasemest. Eristatakse järgmisi plahvatusohtlike tsoonide klasse: tsoon 0, tsoon 1, tsoon 2. Keskkonnad, mis ei ole klassifitseeritud plahvatusohtlikuks, liigitatakse ohutuks piirkonnaks (negligible extent, NE). [13: 9]

Eelistatud sümbolid plahvatusohutsoonide klassifitseerimisel on kujutatud joonistel 4.1, 4.2 ja 4.3 (vt [Joonis 4.1](#), [4.2](#) ja [4.3](#))



Joonis 4.1 Plahvatusohutsooni sümbol – tsoon 0 [15: 30]



Joonis 4.2 Plahvatusohutsoonid sümbol – tsoon 1 [15: 30]



Joonis 4.3 Plahvatusohutsoonid sümbol – tsoon 2 [15: 30]

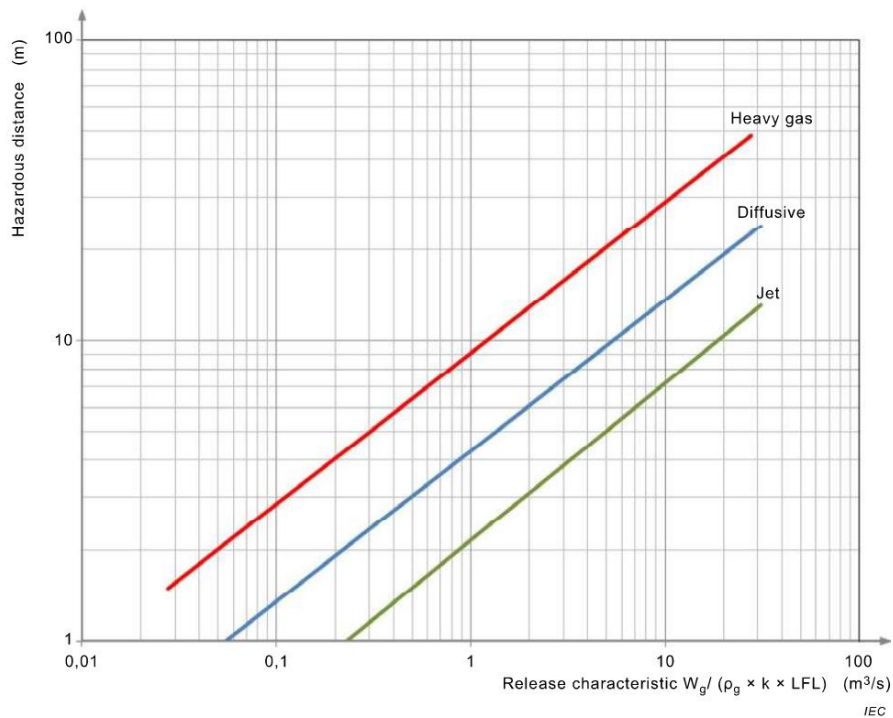
Eraldumisallikate astmed, mis alanevalt iseloomustavad plahvatusohtliku segu esinemise tõenäosust, on järgmised: [14]

- kestev eraldumisallikas;
- primaarne eraldumisallikas;
- sekundaarne eraldumisallikas.

4.3 Plahvatusohutsoonide ulatuse määramine

Plahvatusohtliku tsooni suurus sõltub hinnangulisest või arvutatud kaugusest, mille ulatusel eksisteerib plahvatusohtlik gaaskeskkond, enne kui see lahjendatakse õhus kontsentratsioonini, mis jääb alla LFL-i. [13: 9]

Joonist 4.4 võib kasutada juhendina ohtlike tsoonide ulatuse määramiseks erinevate eraldumise vormide puhul (vt Joonis 4.4). [15: 66]



Joonis 4.4 Ohtlike tsoonide ulatuse määramise graafik [15: 66]

Kui tegemist on ohutu piirkonnaga (NE), siis selle graafiku kasutamine ei ole kohaldatav. [15: 66]

Kus [15: 66]

$$\frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot LFL} - \text{vabanemise tunnus, m}^3/\text{s}; \quad (4.1)$$

$$\rho_g = \frac{p_a}{R \cdot T_a} - \text{gaasi/auru tihedus, kg/m}^3; \quad (4.2)$$

k - on LFL-ile omistatud ohutustegur, tavaliselt vahemikus 0,5 kuni 1,0;

W_g - gaasi lekkemäär, kg/s;

p_a - rõhk väljaspool reservuaari (atmosfääriline rõhk 101325 Pa), Pa;

ρ_g - gaasi/auru tihedus, kg/m³;

T_a - ümbritseva õhu absoluutne temperatuur, K;

Tsooni ulatuse määramisel võetakse arvesse järgmisi keemilisi ja füüsikalisi tegureid:

[14].

- süttiva gaasi või -auru eraldumismäär;
- alumine plahvatuspiir;
- ventilatsioon;
- eralduva gaasi või auru suhteline tihedus;
- ilmastikuolud ja pinnavormid;
- muud arvestamist vajavad tegurid.

Tsooni määramiseks tehtavas arvutustes võib eeldada, et ühe näitaja muutudes jäävad teised muutumatuks. [14]

4.3.1 Süttiva gaasi või auru eraldumismäär

Plahvatusohtliku tsooni suurus sõltub lekke intensiivsusest, nimelt mida suurem on eraldumismäär, seda suurem on tsooni ulatus. Seda määratakse järgmiste teguritega: [13: 9]

- lekkeallika ruumisuhted;
- tuleohtliku aine voolukiirus ehk eraldumiskiirus;
- tuleohtliku aine kontsentratsioon;
- tuleohtliku vedeliku lenduvus;
- vedeliku temperatuur.

4.3.2 Alumine plahvatuspiir

Teatud koguse tuleohtliku aine lekke korral, mida madalam on LFL, seda suurem on plahvatusohtlik tsoon. [13: 10]

4.3.3 Ventilatsioon

Atmosfääri sattunud gaas või aur võib õhus dispersiooni või difusiooni teel lahjendada niivõrd, et selle kontsentratsioon võib langeda alla LEL-i. Ventilatsioon, st. õhu liikumine lekkeallika ümber, soodustab tuleohtliku gaasi hajumist. Ventilatsiooni olemasolu ja selle tase mõjutavad plahvatusohtliku gaaskeskonna tekkimise võimalust ja seeläbi tsooni klassi. [13: 10]

Ventilatsioonil ja õhu liikumisel on kaks põhifunktsiooni: [15: 23]

- lahjenduskiiruse suurendamiseks ja hajumise soodustamiseks, et piirata tsooni ulatust;
- vältida plahvatusohtliku keskkonna püsimist, mis võib mõjutada tsooni tüüpi.

Ventilatsioonitaseme tõustes plahvatusohtliku tsooni suurus väheneb. Arvestada tuleb

sellega, et mõned takistused, mis raskendavad ventilatsiooni, võivad suurendada tsooni ulatust. Teisest küljest takistused, nagu vallid, seinad või katused, võivad vähendada tsooni ulatust. [13: 10]

Kõige olulisem tegur on ventilatsiooni jõudlus, s.o. õhuvahetuskiirus, mis vastab tuleohtliku materjali tüübile, lekkeallika asukohale ja lekke intensiivsusele. Mida kõrgem on ventilatsiooni tase, arvestades võimalikku lekkekiirust, seda väiksemad on tsoonid (plahvatusohtlikud tsoonid). Piisavalt kõrge ventilatsioonikiiruse korral etteantud lekkemäära korral saab ohtliku ala suurust vähendada tühise suuruseni (ohutu piirkond). [13: 11]

Ventilatsiooni talitusvalmidus mõjutab plahvatusohtliku gaasikeskkonna olemasolu või tekke võimalust ja sellest tulenevalt ka tsooni klassi. Kui ventilatsiooni talitusvalmidus või töökindlus väheneb, suureneb tõenäosus, et tuleohtlik aine ei hajugu. Tsoonide klassifikatsioon muutub rangemaks, s.t. klassi 2 tsooni saab muuta klassi 1 või isegi 0 tsooniks. [13: 11]

Eristatakse kahte tüüpi ventilatsioone: loomulik ja kunstlik ventilatsioon, mis võib omakorda olla kas üldine kogu piirkonna jaoks või kohalik eraldumisallika ümbruses. [15: 23]

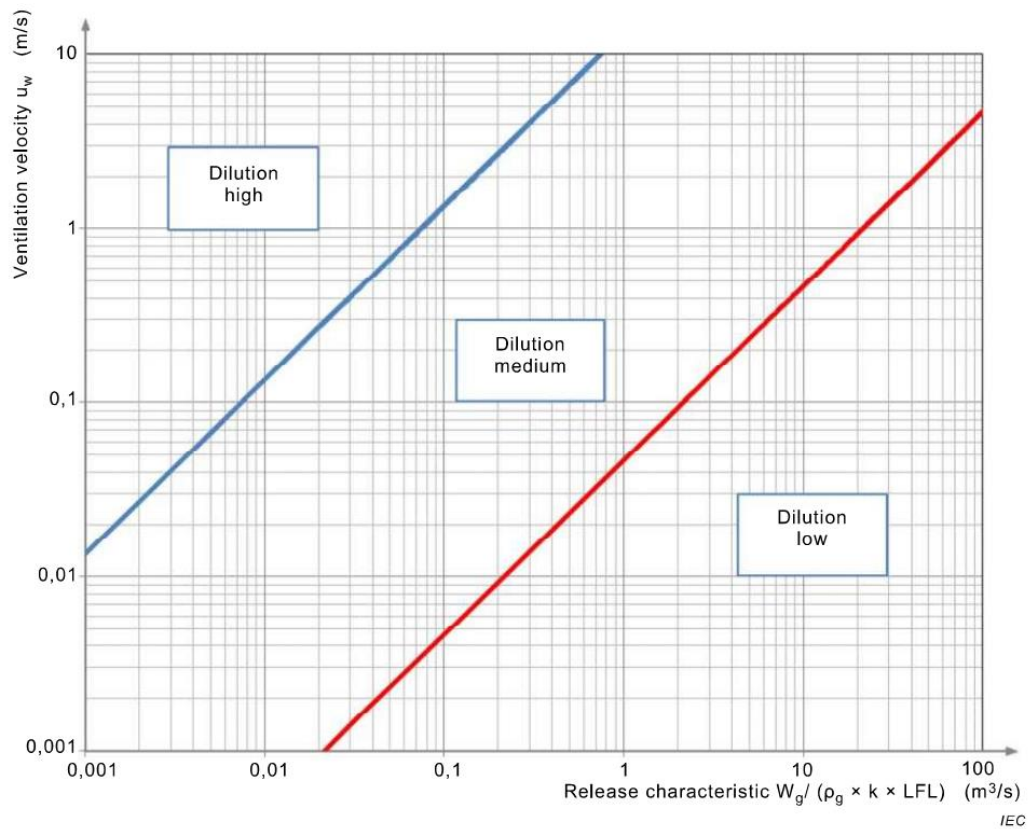
Loomulik ventilatsioon hoonetes tuleneb liikuvast õhust ja/või temperatuurigradientidest põhjustatud rõhuerinevustest. Kunstliku ventilatsiooni saavutatakse näiteks ventilaatorite või ekstraktoritega. [15: 23]

Ventilatsiooni kiiruse hindamine [15, 51]

Kui esineb gaasileke, tuleb gaas ära transportida, vastasel juhul toimub selle kogunemine. Gaasi saab ära transportida gaasilekke poolt tekitatud hoogu, ujuvuse või ventilatsiooni abil. Esimest ei tasu arvestada, välja arvatud juhul, kui on väga selge et seda hoogu ei murra löögid või muu geomeetria mõju. Gaasi ärajuhtimise voolu tuleks hinnata peamiselt ventilatsiooni hinnangu põhjal sisetingimustes või tuule poolt põhjustatud voolu põhjal välistingimustes. [15: 51]

Tabel Lisa 8 illustreerib praktilist lähenemist ventilatsioonikiiruse väärtuste määratlemiseks välistingimustes (vt Lisa 8). Sisealade puhul peaksid hinnangud tavaliselt põhinema eeldataval minimaalsel õhukiirusel 0,05 m/s. [15: 52]

Lahjendusastet saab hinnata joonisel 4.5 oleva diagrammi abil (vt Joonis 4.5). [15: 52]



Joonis 4.5 Lahjendusastme hindamise diagramm [15: 52]

Kus [15: 53]

$\frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot LFL}$ – vabanemise tunnus, m^3/s ;

$\rho_g = \frac{p_a}{R \cdot T_a}$ – gaasi/auru tihedus, kg/m^3 ;

k – on LFL-ile omistatud ohutustegur, tavaliselt vahemikus 0,5 kuni 1,0;

W_g – gaasi lekkemäär, kg/s ;

p_a – rõhk väljaspool reservuaari (atmosfääriline rõhk 101325 Pa), Pa;

ρ_g – gaasi/auru tihedus, kg/m^3 ;

T_a – ümbritseva õhu absoluutne temperatuur, K;

Lahjendusaste saadakse horisontaal- ja vertikaalteljel kuvatud vastavate väärtuste lõikepunkti leidmisega. [15: 53]

Välistingimustes, kus õhuvoolule ei ole olulisi piiranguid, tuleks lahjendusaste klassifitseerida keskmiseks, kui kõrge lahjenduse tingimused ei ole täidetud. Väikest

lahjendusastet vabas õhus üldiselt ei esine. [15: 53]

Ventilatsiooni olemasolu kriteeriumid [15: 55]

Ventilatsiooni olemasolu kriteeriumid mõjutavad plahvatusohtliku gaaskeskonda olemasolu või teket. Seega tuleb tsooni tüübi määramisel arvestada ventilatsiooni olemasoluga (ja ka astmega). [15: 55]

Kolm ventilatsiooni kättesaadavuse taset on järgmised: [15: 55]

- hea: ventilatsioon on peaaegu pidevalt olemas;
- keskmine: normaalse töö ajal eeldatakse ventilatsiooni olemasolu. Katkestused on lubatud tingimusel, et need esinevad harva ja lühiajaliselt;
- halb: ventilatsioon, mis ei vasta keskmise või hea standardile, kuid katkestusi ei esine pikka aega.

4.3.4 Eralduva gaasi või auru suhteline tihedus

Tsooni ulatuse määramisel tuleb lähtuda järgmisest: [14]

- gaasi või auru, mille suhteline tihedus on alla 0,8 loetakse õhust kergemaks ning sellel on omadus tõusta ülespoole;
- gaasi või auru, mille suhteline tihedus on üle 1,2, loetakse üldjuhul õhust raskemaks ning sellel on omadus koguneda madalamale;
- gaasi või auru, mille suhteline tihedus on vahemikus 0,8–1,2, puhul tuleb arvestada mõlema võimalusega.

Tsooni horisontaalne ulatus maapinna tasemel suureneb, kui gaasi või auru suhteline tihedus suureneb, ja vertikaalne ulatus allika kohal suureneb suhtelise tiheduse vähenemisel. [13: 11]

4.3.5 Muud arvestamist vajavad tegurid

Kliimatingimused - Gaasi või auru hajumise kiirus atmosfääris suureneb tuule kiiruse suurenedes, kuid turbulentsse difusiooni alguseks on vajalik minimaalne kiirus 2 - 3 m/s. Sellest väärtusest madalamal liigub gaas või aur kihina ning dispersioonikaugus ohutu tasemeni suureneb oluliselt. Suurte mahutite või konstruktsioonidega töötlemistehase piirkondades võib gaasi või auru hajumise ja difusiooni soodustamiseks esineda piisavat turbulentsi isegi kiirustel alla 2 m/s. [13: 12]

Topograafia - Mõned vedelikud on väiksema tihedusega kui vesi ja ei segune veega hästi: sellised vedelikud võivad levida veepinnal (maapinnal, taimede äravoolusüsteemis või torustiku kaevikus) ja seejärel süttida, mis võib tekitada ohtu tootmistehaste aladel. [13: 12]

4.4 Avad kui võimalikud lekkeallikad

Tsoonidevahelisi avasid tuleks pidada võimalike lekkeallikatena. Lekkemäär sõltub: [13: 17]

- külgneva tsooni klassist;
- avade avatud olekus olemise sagedusest ja kestusest;
- tihendamiseks või ühendamiseks kasutatavate vahendite tõhusustest;
- rõhkude erinevusest tsoonide vahel;
- ava pindalast.

4.4.1 Avade klassifitseerimine

Avad jagatakse tüüpideks A, B, C, D vastavalt järgmistele omadustele: [13: 17]

- A-tüüpi avad, mis erinevad omaduste poolest B-, C- või D-tüüpi avadest
 - avatud avad võrkudele juurdepääsuks või nende varustamiseks, näiteks ventilatsioonikanalid või seinad, laed ja põrandad läbivad torud;
 - sageli avatavad avad;
 - fikseeritud ventilatsioonivad ruumides, hoonetes ja B-, C- ja D-tüüpi avadega sarnased avad, mis avanevad sageli või jäävad avatuks pikka aega;
- B-tüüpi avad on tavaliselt suletud (näiteks automaatselt sulguvad) ja harva avanevad avad, mis on sulgemisel hästi tihendatud
- C-tüüpi avad on tavaliselt suletud (nt automaatselt sulguvad) ja harva avanevad avad, mis on kogu perimeetri ulatuses sobivate seadmetega (nt tihenditega) hästi suletud, või kahe B-tüüpi ava jadamisi koos sõltumatute automaatsete sulgemisseadmetega
- D-tüüpi avad on tavaliselt suletud, vastavad C-tüüpi avadele, avanevad ainult spetsiaalsete tööriistade abil või hädaolukordades. Need on hästi suletavad avad, näiteks võrgu läbipääsud (ventilatsioonikanalid, torud) või kombinatsioon ühest ohualaga külgnevast C-tüüpi avast ja ühest B-tüüpi avausest järjestikku.

Avade tüüpide mõju lekkemääradele on välja toodud tabelis 4.1 (vt [Tabel 4.1](#)). [13: 17]

Avade ristlõike pindala ja sellest tuleneva allika raadius on välja toodud lisa 9 (vt [Lisa 9](#)).

Tabel 4.1 Kokkuvõttev tabel avade tüüpide mõju lekkemääradele [13: 17]

Plahvatusohutsooni klass, kust süttiv gaas või aur võib läbi ava lekkida	Ava tüüp	Lekke ulatus avadest, mida peetakse lekkeallikateks
0	A B C D	Pidev (Pidev)/Primaarne Sekundaarne Sekundaarne/Leket pole
1	A B C D	Primaarne (Primaarne)/Sekundaarne (Sekundaarne)/Leket pole Leket pole
2	A B C D	Sekundaarne (Sekundaarne)/Leket pole Leket pole Leket pole

Sulgudes märgitud lekkemäärade klassifitseerimisel tuleks arvesse võtta avamiste sagedust.

4.5 Arvutuse meetodika

Plahvatusohutsoonide ulatuse ja lahjendusastme määramiseks kasutati järgmisi standardeid:

- ГОСТ IEC 60079-10-1-2013. ВЗРЫВООПАСНЫЕ СРЕДЫ – Классификация зон. Взрывоопасные газовые среды. [13]
- EVS-EN 6079-10-1:2016. Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres. [15]

4.5.1 Lekkemäär

Järgmised võrrandid annavad tuleohtlike vedelike ja gaaside ligikaudsed lekkekiirused. Lekkekiiruse hinnangut saab veelgi täpsustada, võttes arvesse mis tahes avade omadusi ja vedeliku või gaasi viskoossust. Neid tegureid võetakse tavaliselt arvesse tühjenduskoefitsiendis ($C_d \leq 1$). [13: 18]

Tühjenduskoefitsient C_d on empiiriline väärtus, mis saadakse rea katsete kaudu konkreetsete vabanemisjuhtumite ja avade üksikasjade jaoks. Selle tulemusena võib C_d iga konkreetse vabanemise korral võtta erineva väärtuse. Tühjenduskoefitsiendi suhteliselt ohutuks ligikaudseks väärtuseks saab võtta: 0,99 korrapärase kujuga avade puhul (nt ventilatsioonivavad) ja 0,75 ebakorrapärase avade puhul. [15: 42]

Vedeliku lekkemäär [15: 42]

$$W = C_d \cdot S \cdot \sqrt{2\rho \cdot \Delta\rho}; \quad (4.3)$$

kus

W – vedeliku lekkemäär (vabanemise kiirus), kg/s;

C_d – tühjenduskoefitsient, mis on väljalaskeavade omadus ja võtab arvesse turbulentsi ja viskoossuse mõju, tavaliselt 0,50 kuni 0,75 teravate avade (ebakorrapärased) ja 0,95 kuni 0,99 ümarate avade puhul (korrapärased);

S – ava ristlõikepindala, mille kaudu vedelik lekib, m^2 ;

ρ – vedeliku tihedus, kg/m^3 ;

Δp – rõhu erinevus avas, mille kaudu leke toimub, Pa;

Gaasi või auru lekkemäär [13: 19]

$$W_g = C_d \cdot S \cdot p \cdot \sqrt{\gamma \cdot \frac{M}{Z \cdot R \cdot T} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}; \quad (4.4)$$

kus

W_g – gaasi lekkemäär, kg/s;

C_d – tühjenduskoefitsient;

S – ava ristlõikepindala, mille kaudu gaas lekib, m^2 ;

p – rõhk paagi sees, Pa;

γ – adiabaatilise paisumise polütroopne indeks või erisoojusmahtude suhe;

M – gaasi molekulaarmass, kg/kmol;

T – absoluutne temperatuur paagi sees, K;

R – universaalne gaasikonstant, $8,3 \cdot 10^3$ J/(kmol·K);

Z – kokkusurutavuse tegur (Ideaalsete gaaside kokkusurutavustegur on 1,0. Madala kuni keskmise rõhu korral võib kasutada $Z = 1,0$. Kõrgema rõhu korral, nt üle 50 bar ja kui on vaja suuremat täpsust, tuleks rakendada tegelikku kokkusurutavustegurit.);

Gaasi mahuline voolukiirus on võrdne: [15: 44]

$$Q_g = \frac{W_g}{\rho_g}; \quad (4.5)$$

$$\rho_g = \frac{p_a \cdot M}{R \cdot T_a}; \quad (4.6)$$

kus

Q_g - tuleohtliku gaasi mahuline voolukiirus allikast, m^3/s ;

W_g - gaasi lekkemäär, kg/s ;

ρ_g - gaasi või auru tihedus, kg/m^3 ;

p_a - rõhk väljaspool reservuaari (atmosfääriline rõhk 101325 Pa), Pa;

M - gaasi molekulaarmass, $kg/kmol$;

T_a - ümbritseva õhu absoluutne temperatuur, K;

R - universaalne gaasikonstant, $8314,5 J/(kmol \cdot K)$;


4.6 Elektriseadmete liigitus

Kui mis tahes tüüpi elektroonika- või elektriseade on ette nähtud kasutamiseks ohtlikus piirkonnas, peab seadmel olema ATEX-sertifikaat vastavalt EL direktiivile 94/9/EC. Seda direktiivi tuntakse rohkem kui ATEX direktiivi all. Väljaspool Euroopa Liitu kehtivad sarnased eeskirjad IECEX sertifitseerimissüsteemi alusel. [16]

4.6.1 Märgistus

ATEX-direktiiv nõuab, et toode peab olema märgistatud CE-märgisega, EX-märgisega ja seadmekoodiga vastavalt tabelile 4.2 (vt Tabel 4.2). [16]

Tabel 4.2 Seadmekoodid vastavalt ATEX direktiivile [16]

	Kood	Kasutusala
Plahvatuskindel		vastavalt ATEX direktiivile
Seadmete grupp	I	Kasutamiseks allmaakaevandustes
	II	Kasutamiseks kõigis muudes kohtades
Kategooria	1	Seadmed, mis on ette nähtud kasutamiseks piirkondades, kus plahvatusohtlik keskkond on pidevalt, pikka aega või sageli
	2	Seadmed, mis on ette nähtud kasutamiseks piirkondades, kus plahvatusohtlik keskkond võib normaalse töö käigus tekkida ja mis peavad tagama kõrge kaitsetaseme.
	3	Seadmed, mis on ette nähtud kasutamiseks piirkondades,

		kus plahvatusohtliku keskkonna tekkimine tavatöös on ebatõenäoline ja mis peavad tagama normaalse kaitsetaseme.
Gaas / tolm	G	Seadmed on sertifitseeritud kasutamiseks tuleohtlikes gaasides
	D	Seadmed on sertifitseeritud kasutamiseks kohtades, kus atmosfääris on tolmu
Kaitse tüüp	d	Tulekindel
	Ia	Sisemiselt ohutu
	e	Suurenenud ohutus
Gaasi grupp	I	Kaevandused
	II	Maapealsed tööstused
Gaasi alamgrupp	A	Vähem kergesti süttivad gaasid nt. propaan
	B	Kergesti süttivad gaasid, nt etüleen
	C	Kõige kergemini süttivad nt. vesinik või atsetüleen
Temperatuuri klassifikatsioon	T1	450 °C
	T2	300 °C
	T3	200 °C
	T4	135 °C
	T5	100 °C
	T6	85 °C

4.6.2 Märgistuse näide

Tabel 4.3 Seadme märgistuse näide [16]

	II 2G Eexd IIB T4
	Plahvatuskindel vastavalt ATEX-ile
II	Seadmete grupp: II pinnatööstused.
2	Kategooria: 2 varustust (sobib kasutamiseks tsoonis 1)
G	Gaas/tolm: sobib gaasi sisaldavasse atmosfääri
E	Euroopa sertifikaat vastavalt harmoneeritud standarditele
Ex	Plahvatuskindlad elektriseadmed
d	Kaitse tüüp on "leegikindel korpus"
II	II gaasigrupp – pinnatööstused
B	Gaasi alamrühm = B
T4	Temperatuuriklass T4

5. ARVUTUSLIK OSA

5.1 Süttivuspiiride arvutus poolkoksigaas VKG, petroter näide järgi

Lõputöös läbi vaadatud produktide koondtabel algandmetega on välja toodud lisa 10 (vt Lisa 10). Produktide arvutatud andmete koondtabel on välja toodud lisa 11 (vt Lisa 11).

Tabel 5.1 Alg- ja tabeliandmed VKG, Petroter poolkoksigaasi kohta [17]

Nr.	Komponent	Valem	Komponentide sisaldus, vol%	LFL [2, 2-308] (õhk), vol%	UFL [2, 2-308] (õhk), vol%	LOC [11, 22], vol%	T _{ci} [11, 9], vol%
1	Metaan	CH ₄	15,38	5,00	15,00	11,0	8,7
2	Etaan	C ₂ H ₆	8,30	3,00	12,40	8,8	4,5
3	Propaan	C ₃ H ₈	2,81	2,10	9,50	9,8	3,7
4	Butaan	C ₄ H ₁₀	1,12	1,60	8,40	9,6	3,6
5	Pentaan	C ₅ H ₁₂	6,70	1,40	7,80	9,3	2
6	Eteen	C ₂ H ₄	10,7	2,70	36,00	7,6	4,1
7	Propeen	C ₃ H ₆	7,83	2,15	11,20	9,3	4,2
8	Buteen	C ₄ H ₈	2,67	1,60	10,00	9,7	3,3
9	Süsinikmonooksiid	CO	9,68	12,50	74,20	4,7	15,2
10	Vesiniksulfiid	H ₂ S	2,24	4,00	44,00	4,6	8,9
11	Vesinik	H ₂	14,38	4,00	75,00	4,3	5,5
12	Hapnik	O ₂	0,20	-	-	-	-
13	Süsinikdioksiid	CO ₂	9,50	-	-	-	-
14	Lämmastik	N ₂	8,49	-	-	-	-
Kokku:			100,00				

Tabel 5.2 Arvutatud andmed VKG, Petroter poolkoksigaasi kohta

Nr	Komponent	Tuleohtlikud komponendid, vol%	Põlemisreaktsioon	O ₂ stöhhiomee triline koefitsient	Komponendid ilma õhuta, vol%
1	Metaan	18,80	CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O	2	15,53
2	Etaan	10,15	C ₂ H ₆ + 3,5O ₂ = 2CO ₂ + 3H ₂ O	3,5	8,38
3	Propaan	3,43	C ₃ H ₈ + 5O ₂ = 3CO ₂ + 4H ₂ O	5	2,84
4	Butaan	1,37	C ₄ H ₁₀ + 6,5O ₂ = 4CO ₂ + 5H ₂ O	6,5	1,13

5	Pentaan	8,19	$C_5H_{12} + 8O_2 = 5CO_2 + 6H_2O$	8	6,76
6	Eteen	13,08	$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	3	10,80
7	Propeen	9,57	$C_3H_6 + 4,5O_2 = 3CO_2 + 3H_2O$	4,5	7,91
8	Buteen	3,26	$C_4H_8 + 6O_2 = 4CO_2 + 4H_2O$	6	2,70
9	Süsinikmono oksiid	11,83	$CO + 0,5O_2 = CO_2$	0,5	9,77
10	Vesiniksulfiid	2,74	$H_2S + 1,5O_2 = SO_2 + H_2O$	1,5	2,26
11	Vesinik	17,58	$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$	0,5	14,52
12	Hapnik	-	-	-	-
13	Süsinikdioksi id	-	-	-	9,59
14	Lämmastik	-	-	-	7,81
Kokku:		100,00		Kokku:	100,00

Segu tuleohtliku osa ja inertse osa arvutused:

$$\text{Tuleohtlik osa} = 15,38 + 8,3 + 2,81 + 1,12 + 6,7 + 10,7 + 7,83 + 2,67 + 9,68 + 2,24 + 14,38 = 81,81 \text{ (vol\%)}$$

$$\text{Inertne osa} = 8,49 + 9,5 + 0,2 = 18,19 \text{ (vol\%)}$$

Tuleohtlike komponentide sisalduse ümberarvutamine 100%-le:

$$CH_4 = \frac{CH_4 \text{ sisaldus segus}}{\text{tuleohtlik osa}} \cdot 100 = \frac{15,38}{81,81} \cdot 100 = 18,80 \text{ (vol\%)}$$

Õhuvaba segu koostise arvutamine:

1) Õhku segus on:

$$O_2 \cdot \frac{100}{20,9} = 0,2 \cdot \frac{100}{20,9} = 0,96 \text{ (vol\%)}$$

2) Õhuvaba segu:

$$100 - 0,96 = 99,04 \text{ (vol\%)}$$

3) Õhuvaba segu komponendid:

$$CH_4 = \frac{CH_4 \text{ sisaldus segus}}{\text{õhuvaba segu}} \cdot 100 = \frac{15,38}{99,04} \cdot 100 = 15,53 \text{ (vol\%)}$$

4) Lämmastiku kogus:

$$N_2 = 100 - \sum \text{komponendid} =$$

$$= 100 - (15,53 + 8,38 + 2,84 + 1,13 + 6,76 + 10,80 +$$

$$+ 7,91 + 2,70 + 9,59 + 9,77 + 2,26 + 14,52) = 7,81(\text{vol}\%)$$

Stöhhiomeetrilise punkti leidmine:

1) Õhu kogus tuleohtlikest komponentidest koosneva segu jaoks: [18: 23]

$$V_0 = 0,0476 \cdot \left[0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 1,5\text{H}_2\text{S} + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \text{C}_m\text{H}_n \right] =$$

$$= 0,0476 \cdot (2 \cdot 18,80 + 3,5 \cdot 10,15 + 5 \cdot 3,43 + 6,5 \cdot 1,37 + 8 \cdot 8,19 + 3 \cdot 13,08$$

$$+ 4,5 \cdot 9,57 + 6 \cdot 3,26 +$$

$$+ 0,5 \cdot 11,83 + 1,5 \cdot 2,74 + 0,5 \cdot 17,58) = 13,58$$

2) Sellest hapniku:

$$z = \text{O}_2 = 13,58 \cdot \frac{20,9}{100} = 2,84$$

3) Stöhhiomeetriline punkt valemi (2.12) järgi:

$$100 \cdot \left(\frac{z}{1+z} \right) = 100 \cdot \left(\frac{2,84}{1+2,84} \right) = 73,96 \text{ või}$$

$$100 \cdot \left(\frac{1}{1+z} \right) = 100 \cdot \left(\frac{1}{1+2,84} \right) = 26,04$$

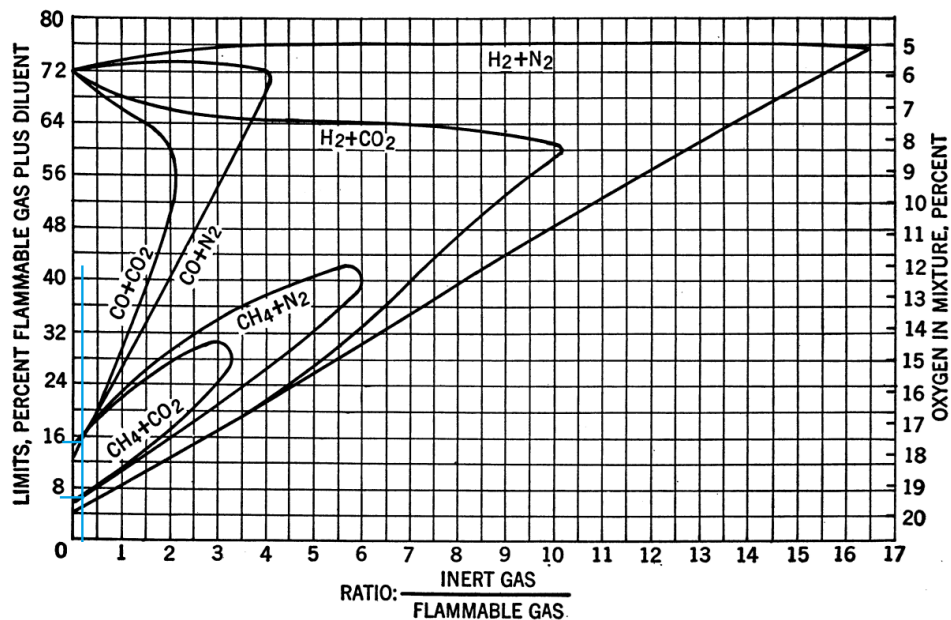
Õhuvaba segu jagamine lihtsamateks segudeks, millest igaüks sisaldab ainult ühte tuleohtlikku gaasi ja osaliselt või täielikult lämmastikku või süsinikdioksiidi:

Tabel 5.3 Õhuvaba segu jagatud lihtsamateks segudeks

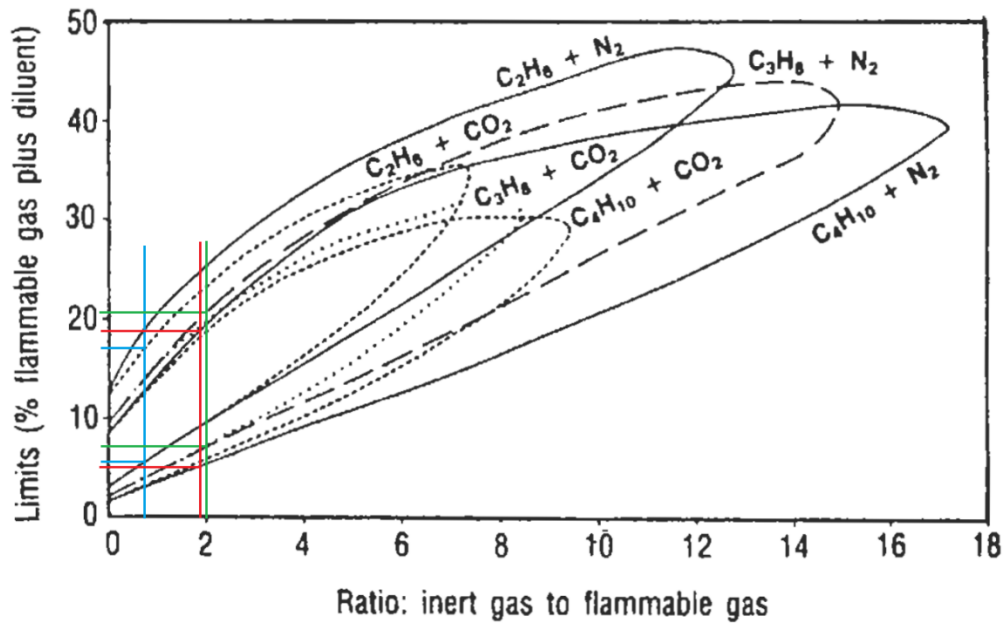
Nr	Komponent	Sisaldus, %	Inertsed komponendid, %		Kokku, %	Inertse / tuleohtliku komponendi suhe
			CO ₂ (9,59)	N ₂ (7,81)		
1	Metaan, CH ₄	15,53	3,106	0	18,636	0,20
2	Etaan, C ₂ H ₆	8,38	6,484	0	14,864	0,77
3	Propaan, C ₃ H ₈	2,84	0	5,68	8,52	2
4	Butaan, C ₄ H ₁₀	1,13	0	2,13	3,26	1,88
5	Pentaan, C ₅ H ₁₂	6,76	0	0	6,76	-
6	Eteen, C ₂ H ₄	10,80	0	0	10,80	-

7	Propeen, C ₃ H ₆	7,91	0	0	7,91	-
8	Buteen, C ₄ H ₈	2,70	0	0	2,70	-
9	Süsinikoksiid, CO	9,77	0	0	9,77	-
10	Vesiniksulfiid, H ₂ S	2,26	0	0	2,26	-
11	Vesinik, H ₂	14,52	0	0	14,52	-
12	Kokku:	82,60	9,59	7,81	100,00	

Arvestades lihtsegusid (vt Tabel 5.3) ehk inertse ja tuleohtliku komponendi suhte, leiame joonistelt 5.1, 5.2 ja lisast 7 (vt Joonis 5.1, Joonis 5.2 ja Lisa 7) *LFL* ja *UFL* väärtused. Segu komponentide *LFL* ja *UFL*, mis ei ole jagatud lihtsegudeks, saame tabelist. [2: 2-308]



Joonis 5.1 *LFL* ja *UFL* leidmine lihtsegud CH₄+N₂ graafiku järgi [6: 7]



Joonis 5.2 LFL ja UFL leidmine lihtsegude $C_2H_6 + CO_2$, $C_3H_8 + N_2$ ja $C_4H_{10} + N_2$ graafiku järgi [19: 280]

Tabel 5.4 Segu komponentide LFL ja UFL, mis on leitud jooniste järgi (vt Joonis 5.1 ja Joonis 5.2)

Komponent	LFL	UFL
Metaan, CH_4	6,90	15,00
Etaan, C_2H_6	5,60	17,20
Propaan, C_3H_8	7,20	20,70
Butaan, C_4H_{10}	5,10	18,90
Pentaan, C_5H_{12}	1,40	7,80
Eteen, C_2H_4	2,70	36,00
Propeen, C_3H_6	2,15	11,20
Buteen, C_4H_8	1,60	10,00
Süsinikoksiid, CO	12,50	74,20
Vesiniksulfiid, H_2S	4,00	44,00
Vesinik, H_2	4,00	75,00

Segu LFL ja UFL arvutamine:

Õhuvaba komplekse segu LFL leiame tabelite 5.3 ja 5.4 järgi (vt Tabel 5.3 ja 5.4):

$$LFL_{\text{mix}} = \frac{100}{\frac{18,636}{6,90} + \frac{14,864}{5,60} + \frac{8,52}{7,2} + \frac{3,26}{5,10} + \frac{6,76}{1,40} + \frac{10,80}{2,70} + \frac{7,91}{2,15} + \dots}$$

$$\frac{100}{\frac{2,70}{1,60} + \frac{9,77}{12,50} + \frac{2,26}{4,00} + \frac{14,52}{4,00}} = 3,79 (\%)$$

Õhuvaba komplekse segu UFL leiame tabelite 5.3 ja 5.4 andmete järgi (vt [Tabel 5.3](#) ja [Tabel 5.4](#)):

$$UFL_{\text{mix}} = \frac{100}{\frac{18,636}{15,00} + \frac{14,864}{17,20} + \frac{8,52}{20,70} + \frac{3,26}{18,90} + \frac{6,76}{7,80} + \frac{10,80}{36,00} + \frac{7,91}{11,20} + \frac{100}{\frac{2,70}{10,00} + \frac{9,77}{74,20} + \frac{2,26}{44,00} + \frac{14,52}{75,00}}} = 19,19 (\%)$$

Leitud piirväärtused on õhuvaba segu kohta. Kuna õhuvaba segu on 99,04% kogu segust, siis:

$$LFL_{\text{mix}} = 3,79 \cdot \frac{100}{99,04} = 3,83 (\%)$$

$$UFL_{\text{mix}} = 19,19 \cdot \frac{100}{99,04} = 19,38 (\%)$$

Segu LOC arvutamine valemi (2.10) järgi kasutades tabeli väärtusi (vt [Lisa 2](#) ja [Tabel 5.2](#)):

$$(LOC)_{\text{mixt}} = \sum x_i R_i / \sum x_i L_i^* = \sum x_i R_i / \sum x_i R_i / (LOC)_i$$

kus

$(LOC)_i$ – komponendi i LOC väärtus;

$(LOC)_{\text{mixt}}$ – arvutatud LOC segu kohta;

L_i^* - komponendi i LFL;

L_{mixt}^* - segu LFL;

x_i – komponendi i mooliosa, %

R_i - hapniku ja i komponendi stöhhiomeetriline molaarsuhe;

R^* - hapniku ja segu stöhhiomeetriline suhe;

Tabel 5.5 Andmed tabelitest Tabel 5.1 (vt [Tabel 5.1](#)) segu LOC leidmiseks

Nr	Komponent	Tuleohtlikud komponendid, vol%	O ₂ stöhhiomeetriline koefitsient (R _i)	LOC _i , % [11: 22]
1	Metaan, CH ₄	18,80	2	11

2	Etaan, C ₂ H ₆	10,15	3,5	8,8
3	Propaan, C ₃ H ₈	3,43	5	9,8
4	Butaan, C ₄ H ₁₀	1,37	6,5	9,6
5	Pentaan, C ₅ H ₁₂	8,19	8	9,3
6	Eteen, C ₂ H ₄	13,08	3	7,6
7	Propeen, C ₃ H ₆	9,57	4,5	9,3
8	Buteen, C ₄ H ₈	3,26	6	9,7
9	Süsinikoksiid, CO	11,83	0,5	4,7
10	Vesiniksulfiid, H ₂ S	2,74	1,5	4,6
11	Vesinik, H ₂	17,58	0,5	4,3

$$(LOC)_{mixt} = \frac{\sum x_i R_i}{\left(\frac{\sum x_i R_i}{LOC_i}\right)} = \frac{(18,80 \cdot 2 + 10,15 \cdot 3,5 + 3,43 \cdot 5 + 1,37 \cdot 6,5 + 8,19 \cdot 8 + 13,08 \cdot 3 + 9,57 \cdot 4,5 + 3,26 \cdot 6 + 11,83 \cdot 0,5 + 2,74 \cdot 1,5 + 17,58 \cdot 0,5)}{\frac{18,80 \cdot 2}{11} + \frac{10,15 \cdot 3,5}{8,8} + \frac{3,43 \cdot 5}{9,8} + \frac{1,37 \cdot 6,5}{9,6} + \frac{8,19 \cdot 8}{9,3} + \frac{13,08 \cdot 3}{7,6} + \frac{9,57 \cdot 4,5}{9,3} + \frac{3,26 \cdot 6}{9,7} + \frac{11,83 \cdot 0,5}{4,7} + \frac{2,74 \cdot 1,5}{4,6} + \frac{17,58 \cdot 0,5}{4,3}} = 8,60 (\%)$$

Segu T_{Ci} ja T_{Ci,F} arvutamine valemite (1.5, 1.7 ja 1.8) järgi kasutades tabeli väärtusi (vt Lisa 3):

$$T_{Ci,mix} = \frac{\sum A_i}{\sum \left(\frac{A_i}{T_{Ci}}\right)}$$

kus

T_{Ci,mix} - tulehtlikest gaasidest koosneva segu maksimaalne sisaldus, mis segatuna lämmastikuga ei ole õhus süttiv, %;

T_{Ci} - tulehtliku gaasi maksimaalne sisaldus, mis segatuna lämmastikuga ei ole õhus süttiv, %;

A_i - tulehtliku gaasi sisaldus, %;

$$T_{Ci,mix} = \frac{81,81}{\left(\frac{15,38}{8,7} + \frac{8,3}{4,5} + \frac{2,81}{3,7} + \frac{1,12}{3,6} + \frac{6,7}{2,0} + \frac{10,7}{4,1} + \frac{7,83}{4,2} + \frac{2,67}{3,3} + \frac{9,68}{15,2} + \frac{2,24}{8,9} + \frac{14,38}{5,5}\right)} = 4,86(\%);$$

$$T_{Ci,F} = T_{Ci} \cdot (1 - OP/21\%);$$

$$OP = \frac{\sum_{i=1}^n x_i C_i}{\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{k=1}^p K_k B_k};$$

kus

OP – oksüdatsioonivõime; mõõtmeter arv, mis võrdleb gaasi või gaasisegu oksüdatsioonivõimet hapniku omaga;

x_i – komponendi kontsentratsioon, vol/vol;

C_i – oksüdeerivate gaaside koefitsient;

K_k – lämmastiku ekvivalentsuse koefitsient;

B_k – inertgaaside molaarsed fraktsioonid;

$$OP = \frac{(O_2 \cdot 1)}{(N_2 + (N_2 \cdot 1) + (CO_2 \cdot 1,5))} =$$

$$= \frac{(0,02 \cdot 1)}{(0,0849 + (0,0849 \cdot 1) + (0,095 \cdot 1,5))} = 0,0064$$

$$T_{Ci,F} = 4,86 \cdot (1 - (0,0064 \cdot 100)/21\%) = 4,72 \%$$

Segu klassifitseerimine ÜRO GHS dokumendi ja ISO10156:2017 standardi järgi:

Enne klassifitseerimist tuleb segu koostis ümber arvutada nii, et ainuke inertne gaas oleks lämmastik. Selleks kasutame inertgaaside ekvivalentsuskoefitsiente tabelist 5.6 (vt Tabel 5.6)

Tabel 5.6 Inertgaaside ekvivalentsuskoefitsiendid K_k lämmastiku suhtes [11: 8]

Gaas	N ₂	CO ₂	He	Ar	Ne	Kr	Xe	SO ₂	SF ₆	CF ₄	C ₃ F ₈	C ₂ HF ₅
K _k	1,0	1,5	0,9	0,55	0,7	0,5	0,5	1,5	4,0	2,0	1,5	3,5

Enne ümberarvutamist:

Segu süttiv osa (A_i) = 81,81 %

Segu LFL = 3,83 %

O₂ sisaldus (x_0) = 0,2 %

CO₂ sisaldus = 9,5 %

N₂ sisaldus = 8,49 %

Segu T_{Ci} = 4,86 %

$$\text{Segu LOC} = 8,60 \%$$

Ümberarvutused:

$$\text{Segu koostis: } 81,81 \% + 0,2 \% + (1,5 \cdot 9,5 \%) + 8,49 \% = 104,75 \%$$

$$\begin{aligned} \text{Üleviimine } 100\% - \text{le: } & \frac{100}{104,75} \cdot (81,81 \% + 0,2 \% + (1,5 \cdot 9,5 \%) + 8,49 \%) = \\ & = 78,10 \% (\text{süttiv osa}) + 0,19 \% (\text{O}_2) + 21,71 \% (\text{N}_2) = 100 \% \end{aligned}$$

Kasutades võrrandit (1.1) saame öelda, et [3, 55]:

$$\sum_i^n \frac{V_i \%}{T_{Ci}} > 1;$$

$$\frac{78,10 \%}{4,86 \%} > 1 \Rightarrow 16,10 \% > 1 \text{ ehk segu on süttiv õhus.}$$

Samuti segu on [11, 21]:

- mitteoksoksüdeeruv, kuna hapniku sisaldus on väiksem kui 23,5 %; [11, 21]
- süttiv, kuna: [11, 22]

$$\text{segu süttiv osa } (A_i) \geq \text{segu LFL} \Rightarrow 78,10 \% \geq 3,83 \% \text{ ning}$$

$$\text{segu süttiv osa } (A_i) \geq T_{Ci,F} \Rightarrow 78,10 \% \geq 4,72 \%$$

- potentsiaalselt mitte plahvatusohtlik, kuna [11, 21]

$$\text{segu O}_2 < \text{segu LOC} \Rightarrow 0,19 \% < 8,60 \%$$

5.1.1 Arvutusandmed ja nende hinnang

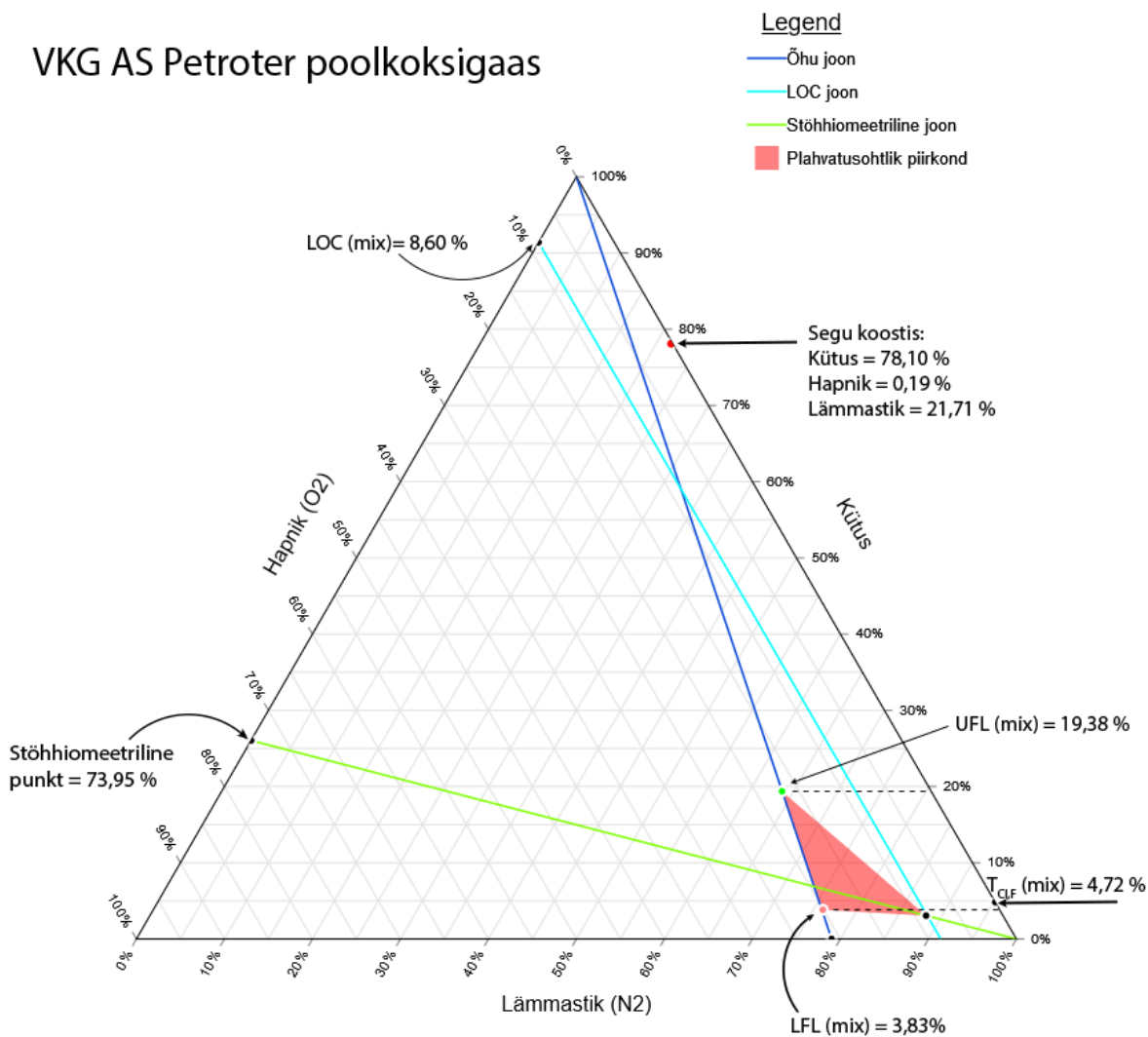
Arvutusi teostati H. F. Coward ja G. W Jones poolt pakutud meetoodika järgi, mis põhineb Le Chatelier reeglil. [6] Arvutuste koondtabel on välja toodud lisas 11 (vt [Lisa 11](#)).

Segued alumine süttivuspiir osutus 3,13 ja 4,16 % vahemikku. Ülemine piir jäi 17,23 ja 20,72 % vahel. LOC väärtused osutusid 8,53 kuni 8,88 % vahemikus. T_{Ci} väärtused jäid 4,36 ja 6,04 % vahel. Sellised lähedased väärtused on tingitud sellest, et need segud on nii kvalitatiivselt kui ka kvantitatiivselt väga lähedased. Koostise poolest näiteks erinevad ainult Kiviõli Keemiatööstus poolkoksigaas, mis ei sisalda divesiniksulfiidi ning VKG OILS AS küttegaas ja VKG Petroter 1, 2, 3 uttegaas, mis mõlemad ei sisalda pentaani. Kõik segud on rikkad põleva osa poolest (81,81 – 95,24 %) ja vased hapniku sisalduse poolest (0,12 – 0,2 %). Inertne osa jääb 4,76 % ja 17,99 % vahemikku.

5.2 Andmete graafiline presenteerimine

Joonis 5.3 süttivuse diagrammil on näidatud VKG AS Petroter poolkoksigaasi segu olek

(vt [Joonis 5.3](#)). Diagrammil on välja toodud plahvatusohtlik piirkond (punane), segu LFL, UFL ja $T_{Ci,F}$ punktid. Samuti õhu-, LOC- ja stöhhiomeetriline joon. Nagu näha segu koostise punkt ei asu plahvatusohtlikus piirkonnas, seega ei ole segu antud koostisega ohtlik. See kehtib ka kõigi teiste arvutatud segude jaoks. Nende diagramme saab näha lisan 13 (vt [Lisa 13](#)).



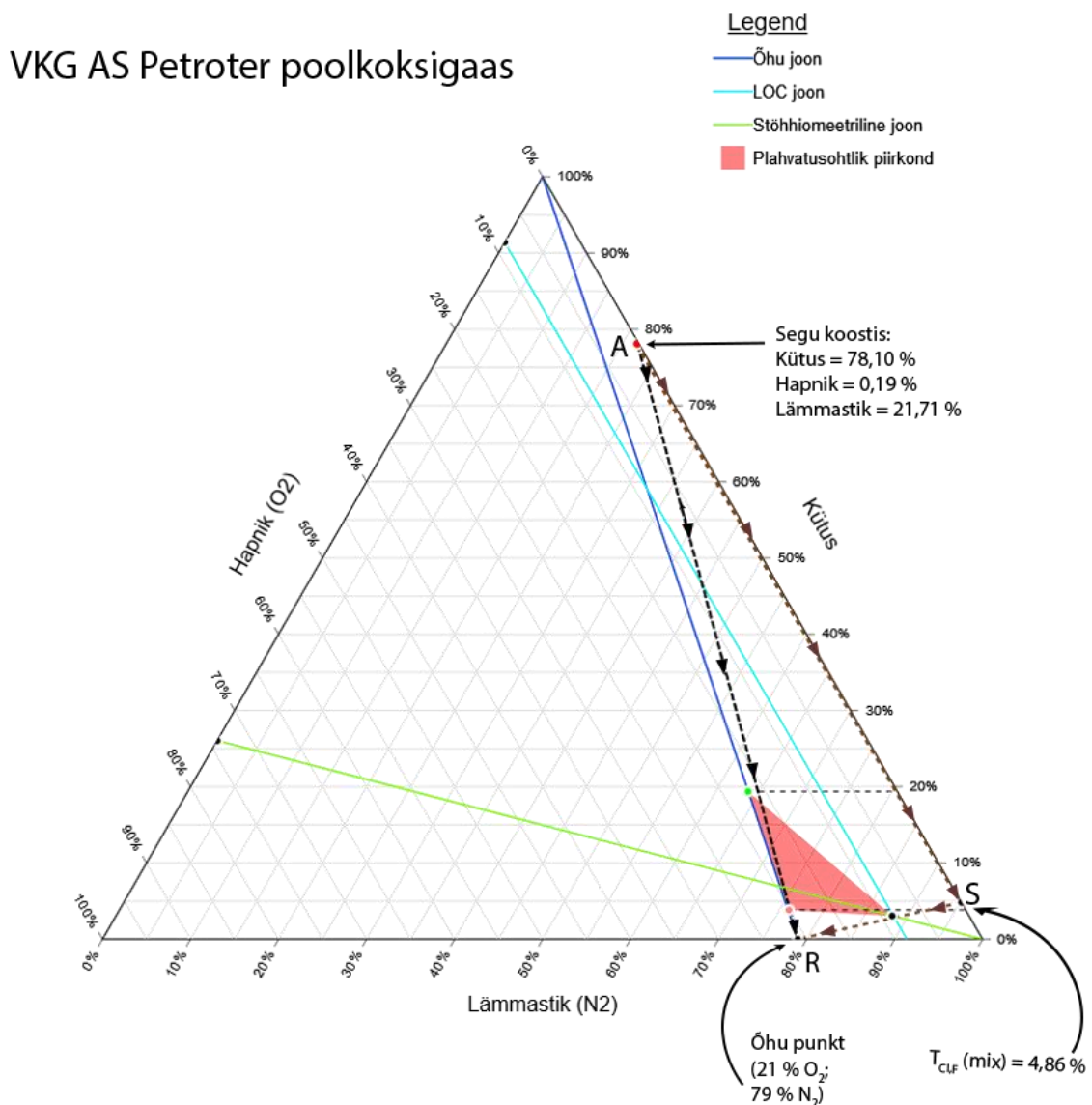
Joonis 5.3 VKG AS Petroter poolkoksigaasi süttivuse diagramm

Segusid, mille koostis määrab nende asukohta väljaspool plahvatusohtlikku kolmnurka, saab näiteks ilma riskita transportida torujuhtmete kaudu; hoiustada punkrites või tsisternides. Sellist järeldust saab teha, sest:

- 1) süttivate komponentide kontsentratsioon on suurem ülemisest piirist (UFL)
- 2) süttivate komponentide kontsentratsioon on alla alampiiri (LFL);
- 3) hapniku kontsentratsioon on väiksem kui maksimaalne lubatud piir (LOC).

Teatud hapnikusisalduse korral on segu mõnel juhul mitteplahvatusohtlik nii kütusekomponentide kontsentratsioonidel, mis on madalamad kui UFL, kui ka kütusekomponentide kontsentratsioonidel, mis on suuremad kui LFL (näiteks $T_{ci,F}$ lähedal). Seda on diagrammil hästi näha (vt Joonis 5.3). Seetõttu ei ole kütusekomponentide kontsentratsiooni valimine segu plahvatusohtlikkuse pideva jälgimise kriteeriumiks põhjendatud. Sobivam on hapniku piirkontsentratsioon (LOC). Kuigi see ka pole täiuslik. Diagrammilt on näha, et segu ei ole teatud juhtudel plahvatusohtlik ka hapniku kontsentratsioonil, mis on suurem kui LOC (näiteks tsoonides plahvatusohtliku kolmnurga kohal ja selle all). Sellele vaatamata, kasutatakse laialdaselt hapniku kontrolli segudes selleks et tagada nende mitteplahvatusohtlikust. Lisaks soovivad NFPA standardid mitte ületada 60% LOC-st.

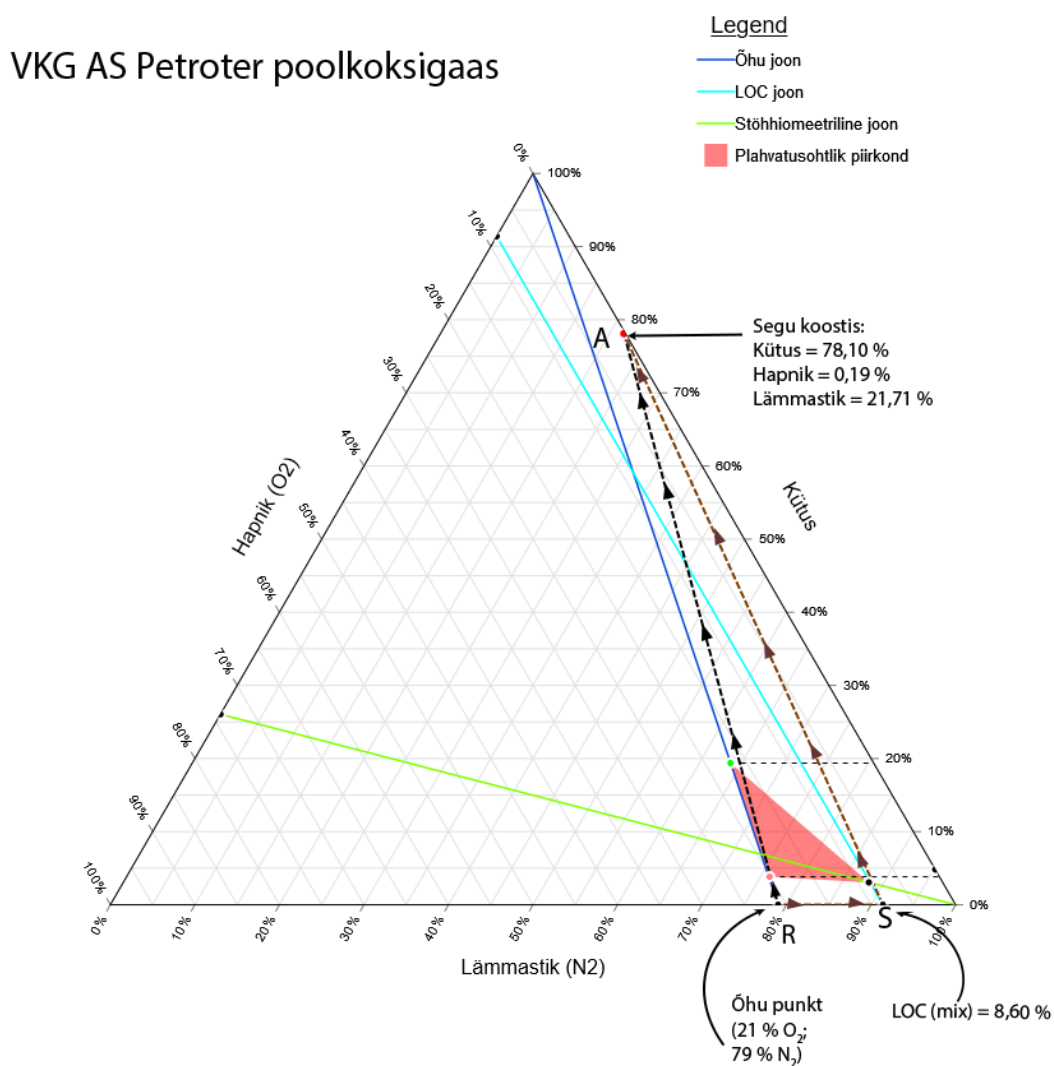
5.2.1 Segu inertimine



Joonis 5.4 Protsessi seadme kasutusest mahavõtmise protseduur ohutsooni vältimisega

Kõik analüüsitud segud on potentsiaalselt süttivad õhuga segunemisel. Joonis 5.4 illustreerib segu ühinemist õhuga (vt Joonis 5.4). Punkt A tähistab segu koostist. Kui toimub õhuga segunemine, siis liigub punkt A punkti R poole sirgjooneliselt. On näha, et mingil kontsentratsioonil satub segu ohtlikku piirkonda (punane kolmnurk), milles segu võib süttida. Sellist olukorda vältimiseks tuleb kasutada lämmastikuga inertimist. Segule A on vaja lisada lämmastiku, et saavutada segu koostiseks punkt S. Seejärel võib õhku sisse lasta. Selline võtte tagab ohtlikku piirkonda möödumist kui näiteks protsessi seadet (torustik, tsistern, punker jt), milles asub segu (A) tuleb puhastada, remontida jt sarnastes olukordades, millal on vaja tühjendada seadet. Punkt S tähistab segu $T_{Ci,F}$ punkti, mis antud konkreetse segu korral on 4,72 %.

Joonisel 5.5 on näidatud protsessiseadme (nt tsisterni või toru) kasutuselevõtu protseduur. Tsisternis on õhk, mis on näidatud punktina R (vt Joonis 5.5). Lämmastikku pumbatakse tsisterni kuni punkti S saavutamiseni. Seejärel pumbatakse kütust sisse, järgides joont SA kuni punkti A saavutamiseni.



Joonis 5.5 Protsessi seadme kasutuselevõtmise protseduur ohutsooni vältimisega

5.3 Plahvatusohutsoonide määramine

Antud lõputöö raames oli võetud näiteks VKG OIL AS õlilaos asuv punker, mahuga 73 m³ (vt Lisa 14). Põlevkivivaikude filtratsiooni ajal raske- ja kergekeskõlde ettevalmistuse ning õliäratuse seadmel (RKEÕS), filtratsiooni osakonnas, moodustub filtrielementides kütuse peendisperse tuha kiht (KPT). See jõuab läbi torukonveieri vastuvõtupunkrisse. Samuti võtab punker vastu KPT-d tsirkulaarse õlipuhastusseadmest (TÕPS). [17]

Filtratsiooni KPT-s sisaldub kuni 11 % bensiinifraktsiooni ja kuni 25 % vaiku. TÕPS KPT-s sisaldub kuni 25 % bensiinifraktsiooni ja kuni 15 % vaiku. Kõrge temperatuuri (50 – 60 °C) tõttu, tekib punkris auru-gaasi segu (taustaheitmed). Samuti tekkivad heitmed järgmistel põhjustel: [17]

- Ühekordsed heitmed – KPT väljalaadimisel filtritest (~40 väljalaadimist ööpäevas). Antud protsessi juures võib filtrist punkrisse sattuda kuni 10 nm³ väävlit kahjulike heitmete sisaldusega;
- Pidevad heitmed – punkrisse etteandmise ajal TÕPS KPT-s kuni 7 t/tunnis pumbaga.

Punkri ja sellega seotud torukonveierite hermeetilisuse puudumise tõttu tungib gaasi-õhu segu välja hoone ruumidesse ja operaatorite tööpiirkonda. Osa segust eemaldatakse filtreerimishoones olemasoleva ventilatsioonisüsteemi kaudu. [17]

Vastuvõetava gaasisegu kulu punkrist on leslmiselt 15nm³/t. [17]

5.3.1 Punkris oleva gaasi-õhu segu andmed

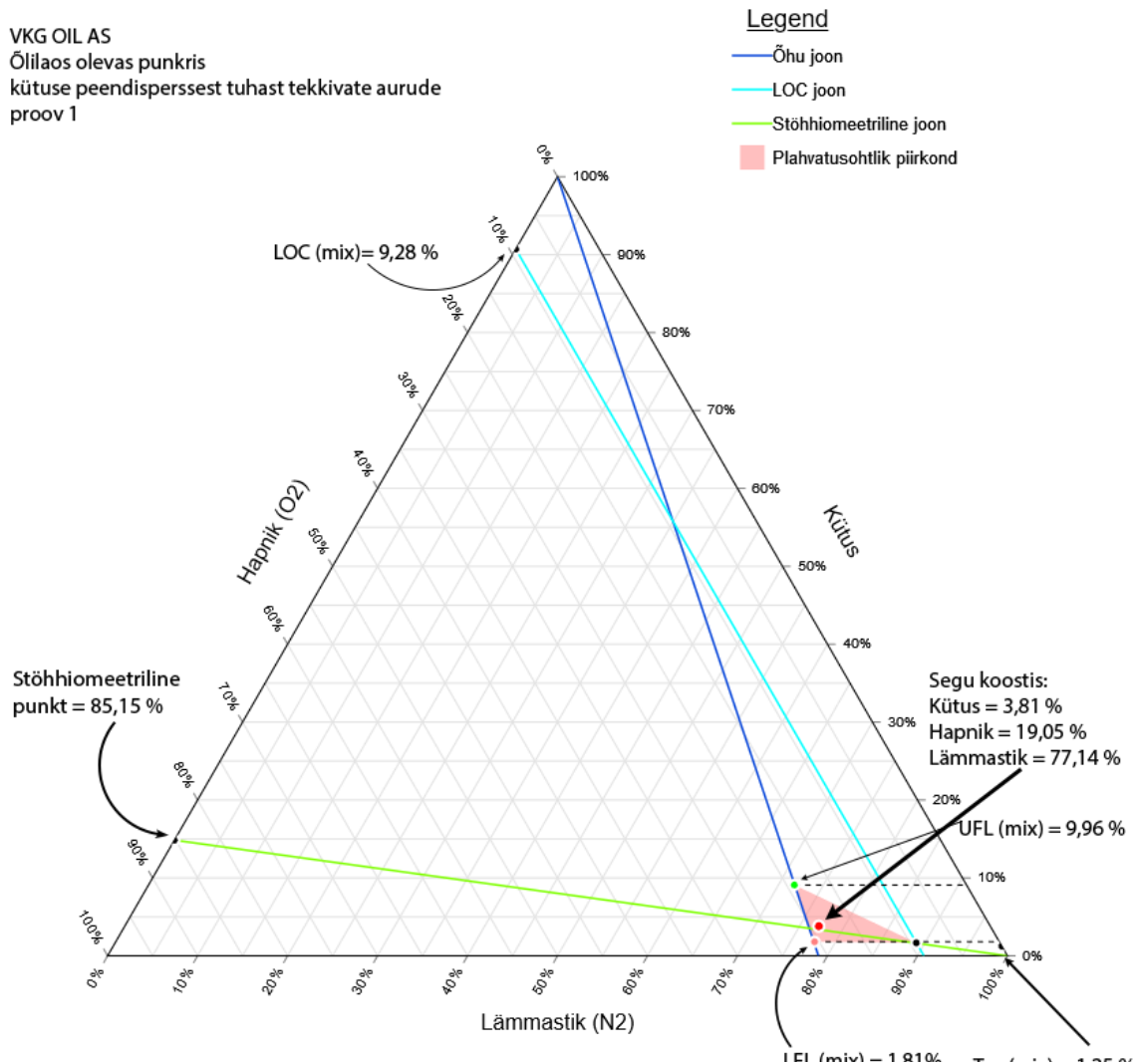
Tabel 5.1 Punkris oleva aurugaasi segu koostis [17]

Nr	Komponent	Valem	Proov 1	Proov 2	LFL	UFL	LOC	T _{ci}
1	Süsinikdioksiid	CO ₂	0,69	0,00	-	-	-	-
2	Eteen	C ₂ H ₄	0,16	0,04	2,7	36,0	7,6	4,1
3	Etaan	C ₂ H ₆	0,28	0,07	3	12,4	8,8	4,5
4	Propeen	C ₃ H ₆	0,49	0,35	2,15	11,2	9,3	4,2
5	Propaan	C ₃ H ₈	0,25	0,17	2,1	9,5	9,8	3,7
6	Buteen	C ₄ H ₈	0,66	1,41	1,6	10,0	9,7	3,3
7	n-Butaan	C ₄ H ₁₀	0,41	0,84	1,6	8,4	9,6	3,6
8	Pentaan	C ₅ H ₁₂	1,23	4,58	1,4	7,8	9,3	2,0
9	Vesinik	H ₂	0,00	0,00	4,0	75,0	4,3	5,5
10	Lämmastik	N ₂	76,37	81,02	-	-	-	-
11	Metaan	CH ₄	0,15	0,00	5,0	15,0	11,0	8,7

12	Süsinikoksiid	CO	0,06	0,00	12,5	74,2	4,7	15,2
13	Hapnik	O ₂	19,12	11,52	-	-	-	-
14	Vesiniksulfiid	H ₂ S	0,13	0,00	4,0	44,0	4,6	8,9
15	Kokku		100,00	100,00				
16	LFL(mix)		1,81	1,50				
17	UFL(mix)		9,96	8,44				
18	LOC(mix)		9,29	9,39				
19	T _{ci} (mix)		3,06	2,40				

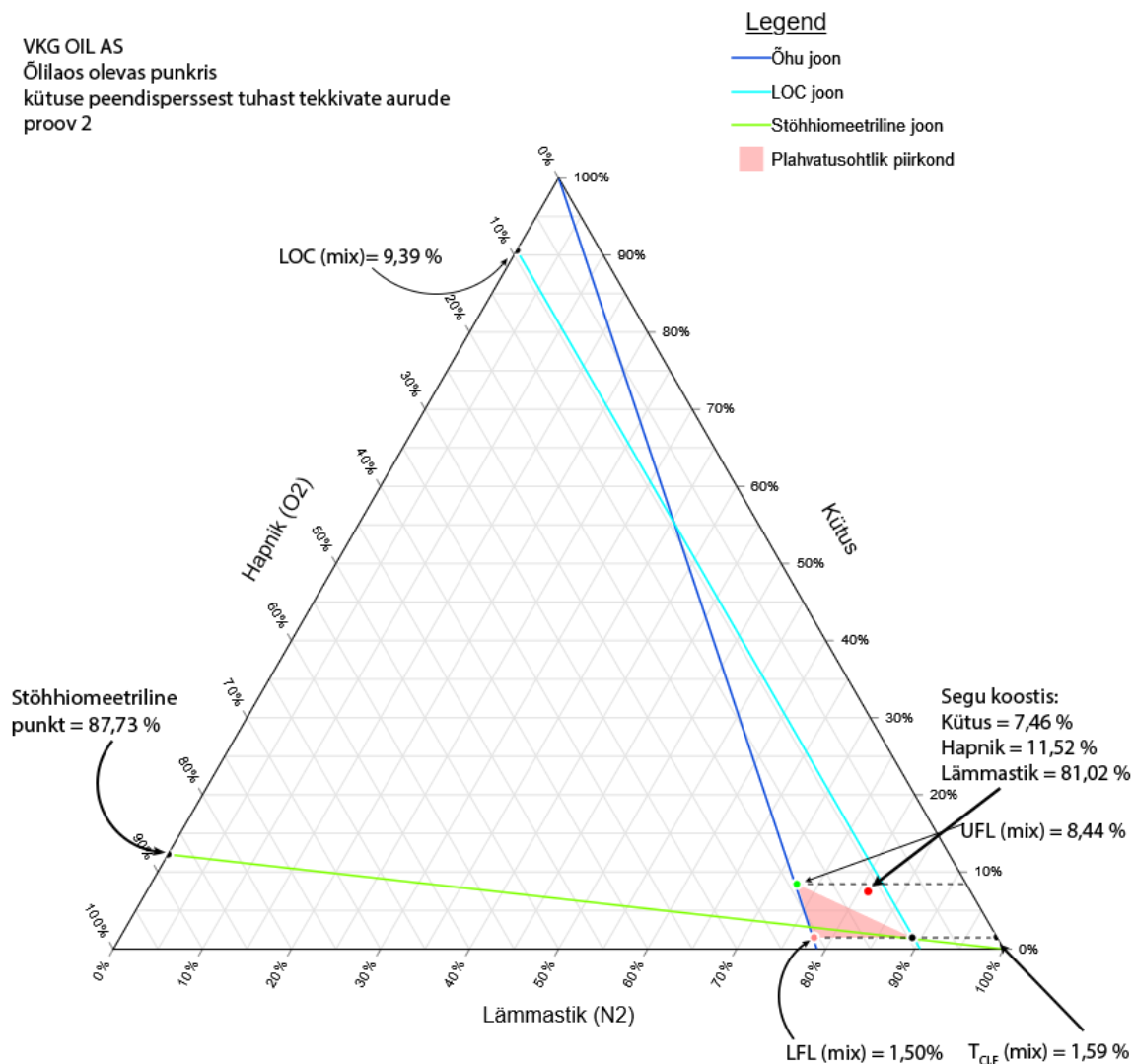
Antud segude piirväärtused (LFL, UFL, LOC ja T_{ci}) on arvatud süttivuspiiride osa analoogia põhjal ehk H. F. Coward ja G. W Jones poolt pakutud metodika järgi, mis põhineb Le Chatelier reeglil. [6]

Joonistel 5.6 ja 5.7 on välja toodud gaasi-õhu segu arvutatud parameetrid (vt Joonis 5.6 ja Joonis 5.7).



Joonis 5.6 VKG OIL AS õlilaos olevas punkris kütuse peendispersest tuhandest tekkivate aurude proov 1

Joonis 5.6 on proovi 1 kohta ning joonis 5.7 on proovi 2 kohta. On näha, et proovi 1 segu asub plahvatusohtlikus tsoonis, aga proovi 2 segu asub plahvatusohtlikust tsoonist kõrgemal. Proov 2 segu ei ole hetkel plahvatusohtlik, kuid see muutub selliseks õhu lisamisel. Selle riski kõrvaldamiseks on vajalik lämmastiku lisamine punkrisse, et viia hapnikusisaldus ohutule tasemele (alla LOC) ja ennetavalt asendada KPT mahalaadimisel punkrisse sattuda võivat õhku.

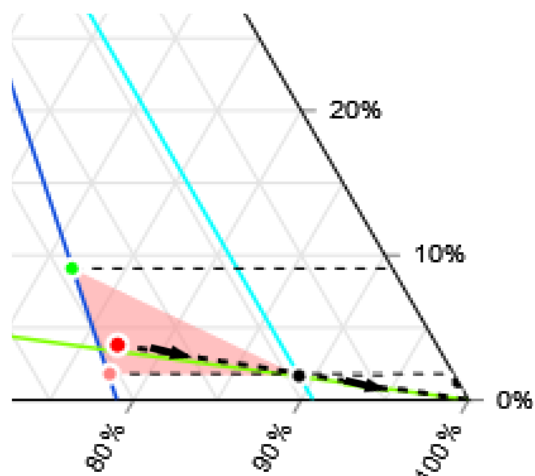


Joonis 5.7 VKG OIL AS õlilaos olevas punkris kütuse peendispersest tuhandest tekkivate aurude proov 2

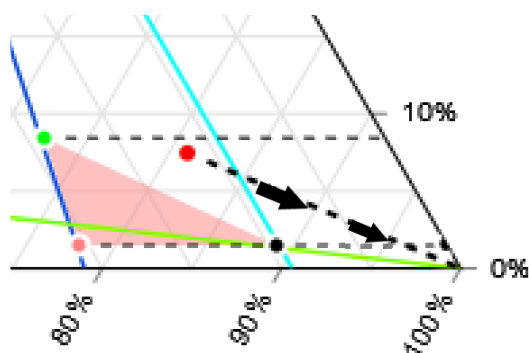
Standardi NFPA 56-2017 järgi tuleb inertgaasiga läbipuhumistoiminguid jätkata seni, kuni torustiku väljalaskekohas leitud hapniku kontsentratsioon on väiksem kui 60 protsenti oksüdeerija piirkontsentratsioonist – LOC-ist [20: 56-10]. Sellest lähtuvalt tuleks antud segu plahvatuskindlaks muutmiseks vähendada hapnikusisaldust selles olemasolevalt 19,12 %-lt, soovitatud ohutule 5,57 %-le proovi 1 jaoks ning

analoogiliselt 11,52 %-lt 5,63 %-le.

Joonistel 5.8 ja 5.9 on näidatud mõlema proovi lämmastikuga inertimise olukorda (segu koostise punkt liigub noolega näidatud suunas lämmastiku 100 % punkti suunas) (vt Joonis 5.8 ja Joonis 5.9).



Joonis 5.8 Segu proovi 1 inertimine lämmastikuga



Joonis 5.9 Segu proovi 2 inertimine lämmastikuga

Lämmastikuga inertimisel tekib põlevate komponentide mitteplahvatusohtliku kontsentratsiooniga segu, mis ei saa plahvatada punkris ja torustikus isegi siis, kui sinna äkki tekib süüteallikas. Lisaks, tänu punkti langemisele joonest allapoole jäävasse tsooni ($T_{ci} - O_2 = 21\%$), ei saa see segu õhku eraldumisel põleda isegi süüteallika olemasolul.

Ohutuse tagamiseks tuleb punkri sees olevat gaasisegu pidevalt eemaldada lämmastikuga lahjendades. Lisatava lämmastiku koguse arvutamiseks, mis tagab hapniku kontsentratsiooni languse punkris ohutu tasemeni, võib kasutada (ligikaudsena) plokkvoolureaktori mudelit või täiusliku segamisreaktori mudelit. Teine

udel on tegelikkusele lähemal. Valem lisatava lämmastiku koguse arvutamiseks segu algmahu suhtes on järgmine: [17]

$$\frac{\Delta V_{N_2}}{V_{segu}} = \frac{C_{O_2\ segu}}{C_{O_2\ piir}} - 1$$

Võttes arvesse, et

$$V_{segu} = 15 \frac{nm^3}{t};$$

$$C_{O_2\ segu} = 19,12\ %;$$

$$C_{O_2\ piir} = 5,57\ %;$$

siis proovi 1 jaoks:

$$\Delta V_{N_2} = V_{segu} \cdot \left(\frac{C_{O_2\ segu}}{C_{O_2\ piir}} - 1 \right) = 36,50 \frac{nm^3}{t};$$

ehk ~1: 2,4 lämmastiku suhtes

Analoogiliselt proovi 2 jaoks:

$$\Delta V_{N_2} = 15,69 \frac{nm^3}{t};$$

ehk ~1: 1

5.3.2 Plahvatusohutsoonide ulatuste ja lahjendusmäärade leidmine

Tabel 5.2 Punkri andmed plahvatusohutsooni ja segu lahjendusmäära määramiseks [17]

VKG OIL AS punker			
Gaasi-õhu segu vabanemise omadused			
	Ühikud	Hoone sees	Väljaspool
Segu		Gaasi-õhu segu punkris	Gaasi-õhu segu torustikus
LFL	vol/vol	0,0181	0,0181
Isesüttimise temperatuur	°C	350	350
Liigitus isesüttimise temperatuuri järgi		T2	T2
Plahvatusohu kategooria		IIA	IIA
Universaalne gaasikonstant, R	J/(kmol·K)	8314,5	8314,5
Molaarmass, M	kg/kmol	29,85	29,85
Tihedus, ρ _g	kg/m ³	1,331	1,331
Vabanemise aste		sekundaarne	sekundaarne

Tühjenduskoefitsient, C_d		0,85	0,85
LFL-ile omistatud ohutustegur, k		0,5	0,5
Ava pindala, S	m^2	0,0000025	0,0000025
Gaasisegu vabanemise kiirus, W_g	kg/s	$4,44 \cdot 10^{-4}$	$4,44 \cdot 10^{-4}$
Töörõhk, p	Pa	101325	101325
Töotemperatuur, T	K	333	333
Polütroopne indeks, γ		1,1	1,1
Kokkusurutavuse tegur, Z		1,0	1,0
Asukoha omadused			
Välisolukord			takistuseta ala
Siseolukord		hoone loomuliku ventilatsiooniga	
Ventilatsiooni olemasolu		halb	hea
Ventilatsiooni kiirus, u_w	m/s	0,01	0,3
Vabanemise omadused, $W_g/(\rho_g \cdot k \cdot LFL)$	m^3/s	0,037	0,037
Segu vabanemise mõjud			
Lahjendusaste		keskmine	keskmine
Tsooni tüüp		tsoon 2	tsoon 2
Tsooni suurus	m	4	4

Antud näide puhul on tegemist kahe plahvatusohutsooniga. Üks tsoon asub hoone sees pukri ja sellele kinnitatud torustiku juures ning teine tsoon asub väljas (õues) ventiili juures.

Tsoonide ulatuse määramiseks on vaja leida gaasisegu vabanemise kiirust W_g .

Selleks kasutati valemit (4.8):

$$W_g = C_d \cdot S \cdot p \cdot \sqrt{\gamma \cdot \frac{M}{Z \cdot R \cdot T} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} ;$$

kus

W_g – gaasi lekkemäär, kg/s ;

C_d – tühjenduskoefitsient;

S – ava ristlõikepindala, mille kaudu gaas lekib, m^2 ;

p – rõhk paagi sees, Pa;

γ – adiabaatilise paisumise polütroopne indeks või erisoojusmahtude suhe;

M – gaasi molekulaarmass, kg/kmol;

T – absoluutne temperatuur paagi sees, K;

R – universaalne gaasikonstant, 8314,5 J/(kmol·K);

Z – kokkusurutavuse tegur (Ideaalsete gaaside kokkusurutavustegur on 1,0. Madala kuni keskmise rõhu korral võib kasutada $Z = 1,0$. Kõrgema rõhu korral, nt üle 50 bar ja kui on vaja suuremat täpsust, tuleks rakendada tegelikku kokkusurutavustegurit.);

$$W_g = 0,85 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 101325 \text{ Pa} \cdot$$

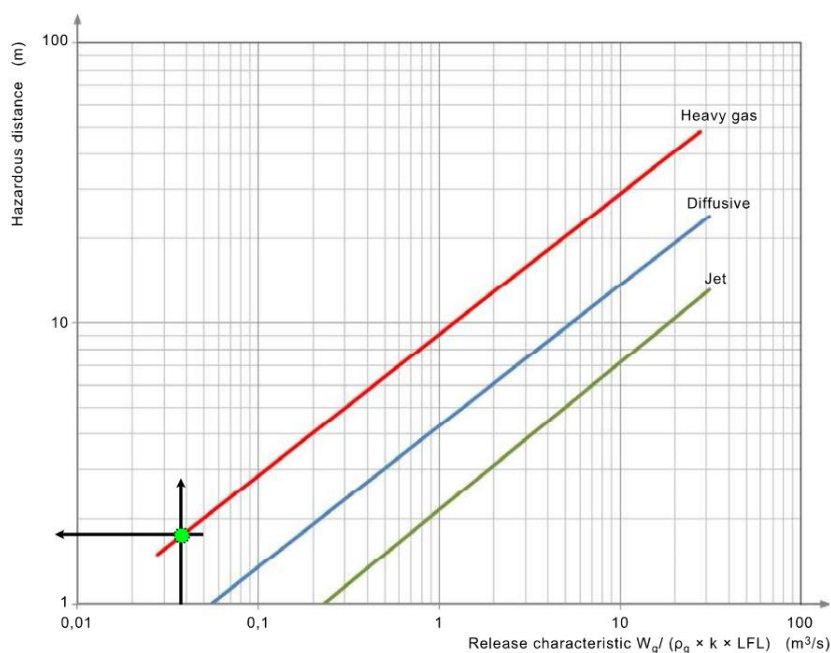
$$\cdot \sqrt{1,1 \cdot \frac{29,85 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{1,0 \cdot 8314,5 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \cdot 333 \text{ K}} \cdot \left(\frac{2}{1,1 + 1}\right)^{\frac{1,1+1}{1,1-1}}} =$$

$$= 0,000444 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 4,44 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$W_g/(\rho_g \cdot k \cdot \text{LFL})$ suhte arvutamine:

$$\frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot \text{LFL}} \Rightarrow \frac{4,44 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}}{1,331 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,5 \cdot 0,0181} = 0,037 \text{ m}^3/\text{s}$$

Väljas- ja seesoleva tsooni ualutus on leitud joonisel 5.10 (vt Joonis 5.10).

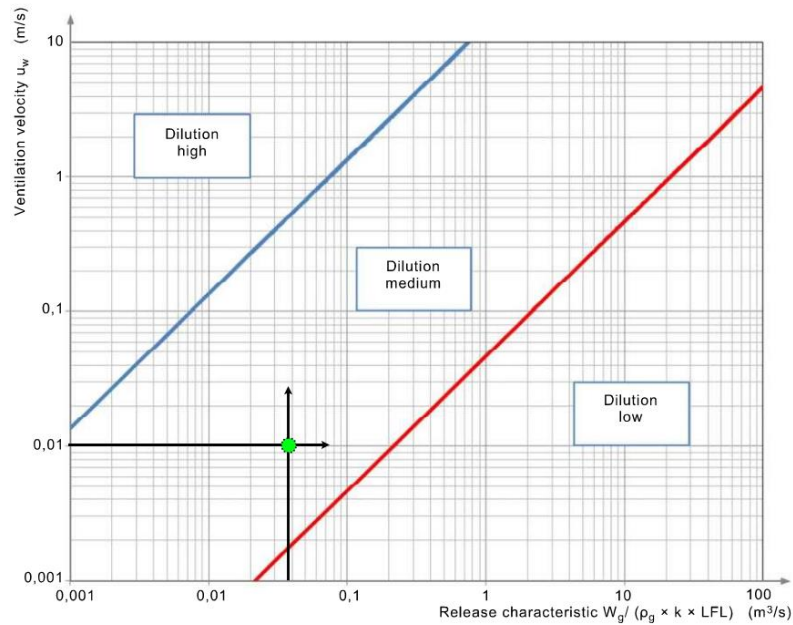


Joonis 5.10 Plahvatusohutsoonide (nii hoone sees oleva kui ka väljas õues oleva) ulatus

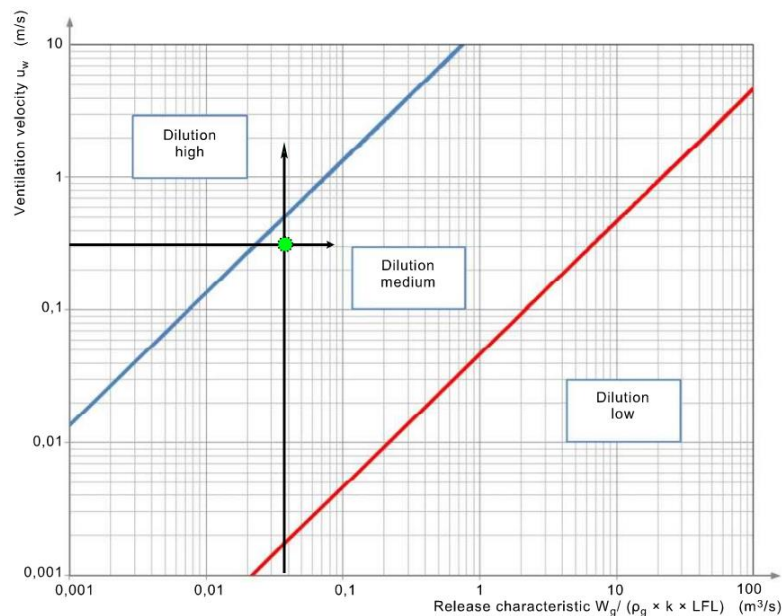
Graafikult leitud tsoonide ulatus on umbes 1,8 m lekkeavast ehk plahvatusohtlikala ulatub 1,8 m kaugusele kõikidesse suundadesse avast väljumisel.

Lekke lahjenduse määrade leidmine:

Lahjenduse määr hoone sees ja väljas leiti vastavalt joonistel 5.11 ja 5.12 kujutatud graafikutel (vt [Joonis 5.11](#) ja [Joonis 5.12](#)).



Joonis 5.11 Lahjenduse määr hoone sees



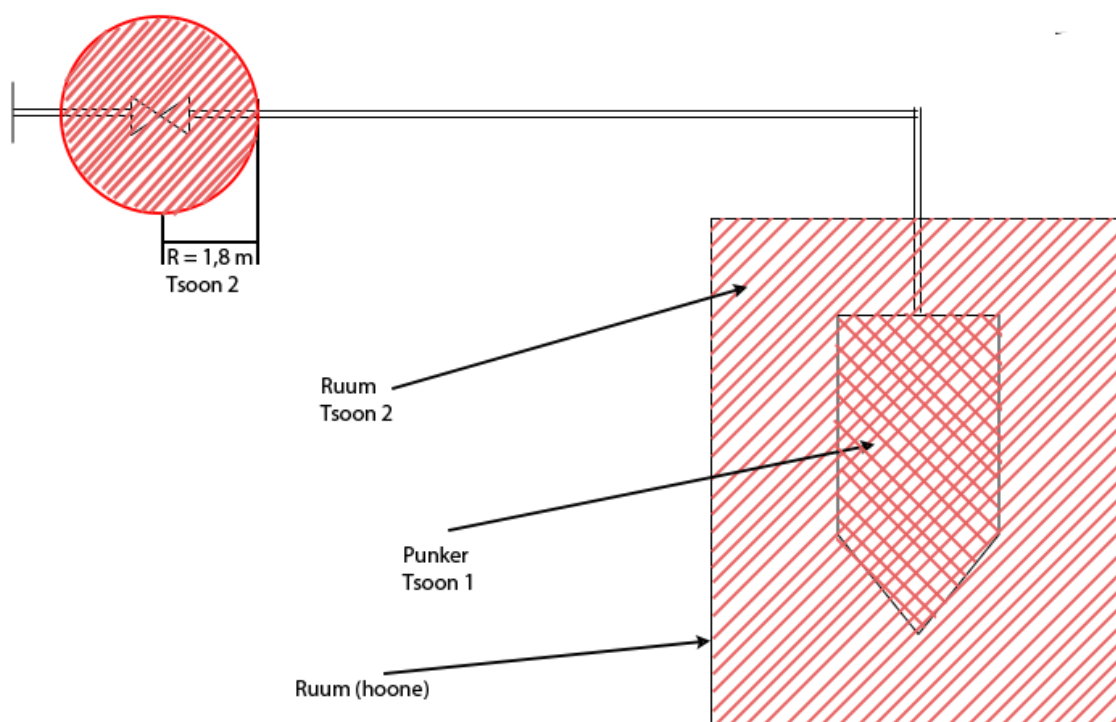
Joonis 5.12 Lahjenduse määr väljas

Tsoonide määramine ja andmete analüüs:

Tsoonide ulatuse arvutamiseks valiti tühjenduskoeffitsiendiks 0,85, mis on umbes keskmine väärtus. Segu tiheduseks oli $1,331 \text{ kg/m}^3$ ehk segu oli raskem kui õhk. Molaarmass oli $29,85 \text{ kg/kmol}$ ning vabanemiseaste mõlema tsooni puhul oli sekundaarne. LFL väärtust võeti tabelist 5.1, milleks oli 1,81 % ehk $0,0181 \text{ vol/vol}$ (vt Tabel 5.1). Ava pindalaks, kokkusurutavuse teguriks ja polütroopseks indeksiks valiti vastavalt $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; 1,0 ja 1,1 väärtusi. Töötemperatuuriks ja – rõhuks olid vastavalt 333 K ja 101325 Pa . Arvutatud segu vabanemise kiiruseks saadi $4,44 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$. Diagrammi kasutamiseks leiti $W_g/(\rho_g \cdot k \cdot LFL)$ suhet, mis osutus $0,037 \text{ m}^3/\text{s}$. Vastavalt diagrammile (vt Joonis 5.10) leiti tsoonide ulatuseks umbes 1,8 m avast.

Hoone sees oleva ventilatsiooni olemasoluks valiti „halb“ ja kiiruseks $0,01 \text{ m/s}$. Väljas oli ventilatsioon „hea“ ja kiirus $0,3 \text{ m/s}$. Diagrammi abil jõuti järeldusele, et mõlema tsooni puhul on lahjendusmäär keskmine (vt Joonis 5.11 ja Joonis 5.12).

Kasutades tabelit lisas (vt Lisa) leiti, et tegemist on tsoonidega 2. Punkri sees on tsoon 1. Joonisel 5.13 on kujutatud tsoonid skemaatiliselt (vt Joonis 5.13).



Joonis 5.13 Tsoonide skemaatiline kujutus

KOKKUVÕTE

Süttivuspiirid ja plahvatusohutsoonid on mis tahes tule- või plahvatusohtlike segude olulised ohutusparameetrid. Segu süttimispiiride ja plahvatusohtlike tsoonide mõistmine on selle segu ohutu käitlemise, ladustamise ja transportimise tagamiseks ülioluline.

Antud lõputöö peamiseks ülesandeks oli põlevkivitööstuse produktide süttivuspiiride ja plahvatusohutsoonide arvutuste tegemine ja tulemuste analüüsimine.

Lõputöös tehti ülevaade süttivuse ja plahvatusohu teooriast. Töötati läbi ISO10156:2017 standardi ja ÜRO GHS dokumendi ning sooritati gaasi- ja auru segude analüüs ja klassifitseerimist antud dokumentide põhjal. Kirjeldati süttivuse diagrammi. Tehti ülevaade erinevatest teguritest (LOC, Stõhhiomeetriline punkt, T_{ci}), mis on vajalikud diagrammi koostamiseks.

Samuti toodi välja plahvatusohutsoonide teooriat. Vaadati läbi erinevaid tegureid, millest sõltub plahvatusohutsoonide ulatus ja lahjendusmäär.

Vaadeldi läbi süttivuspiiride arvutamise metoodikat, mis põhineb Le Chatelier reeglil. Teostati selliste segude nagu poolkoksigaas (VKG Petroter, Enefit-140, Enefit-280 ja Kiviõli Keemiatööstus OÜ), küttegaas (VKG OIL AS) ja uttegaas (VKG Petroter 1, 2, 3) LFL ja UFL arvutusi antud metoodika järgi. Segude kvalitatiivse ja kvantitatiivse sarnasuste puhul tulid arvutatud väärtused väga lähedaseks (3,13 – 4,04 % LFL-i puhul ning 17,23 – 20,72 % UFL-i puhul). Sooritati segude klassifitseerimine ISO10156:2017 standardi järgi, mille kohaselt kõik antud segud osutusid süttivateks, mitteeksüdeerivateks ja mitteplahvatusohtlikeks. Koostatud süttivuse diagrammid kinnitavad saadud tulemusi.

Samuti toodi välja ka plahvatusohutsoonide ulatuse ja lahjendusmäära arvutamise metoodika ning sooritati vajalikud arvutused konkreetse näide puhul - VKG OIL AS õlilaos asuv punker, milles toimub kütuse peendisperse tuha (KPT) aurustumine. Süttivuspiiride arvutatud väärtused näitasid, et üks proovidest (proov 1) on plahvatusohtlik ning selle alusel sooritati kahte plahvatusohutsoonide (hoone sees ja väljas) ulatuse ja lahjendusmäära arvutused. Tulemused näitasid, et tsooni ulatus on umbes 1,8 m ning lahjendusmäär on mõlema tsooni puhul keskmine. Mõlemad tsoonid klassifitseeriti teise gruppi (tsoon 2). Ohu vältimiseks oli pakutud punkri inertimine lämmastikuga.

Seega on lõputöö eesmärk ning püstitatud ülesanded saavutatud – on sooritatud põlevkivitööstuse produktide süttivuspiiride ja plahvatusohutsoonide arvutused ja analüüs.

Lõputöö teemat võiks jätkata: teha arvutusi ja analüüse kõikidest produktidest ja kõrvalsaadustest, mis suurel või vähesel määral üks või teine keemia- ja energeetika ettevõtte saab ja kasutab igapäevaselt.

SUMMARY

The topic of this graduation thesis is: „Identification and analysis of the flammability limits and explosive zones of the main products of the oil shale industry“. It was written by Margus Koppel. The topic was proposed by the ENTEH Engineering AS company.

Oil shale production companies do contribute to the economy of Estonia. However, the economic benefits of oil shale come with significant safety risks due to its flammability and explosiveness. This thesis highlights the importance of analyzing oil shale products and calculating the necessary parameters for detecting flammability and explosion limits. This information is crucial for ensuring safe working conditions in the industry.

The aim of the thesis is the calculation and analysis of flammability limits and explosion hazard zones of products of the oil shale industry. Accordingly, the following tasks are set:

- familiarizing with the theoretical bases of ignition and explosion hazard;
- getting to know existing standards on this topic;
- familiarizing with the methodologies for calculating flammability limits and explosion hazard zones and performing the necessary calculations;
- drawing conclusions based on the given calculation results.

Thesis is structured into an introduction, a theoretical section (sections 1-4), a computational section with conclusions (section 5), and a summary.

The first section provides an overview of the theory of flammability and explosion, including definitions and explanations of terms, as well as the dependence of flammability on various factors. The second section discusses the quantities related to the calculation of flammability limits, such as stoichiometric concentration and limiting oxygen concentration, and describes the flammability diagram. The third section examines the methods for calculating flammability limits and highlights their limitations. The fourth section introduces the theory of explosion limits and their calculation methods. This section also provides a brief overview of the requirements of electrical equipment to work in potentially dangerous gaseous atmospheres. The computational section is the most important part of the thesis. It is where the calculations of flammability and explosion limits are performed, the flammability diagram is constructed, and the explosion limits and heat of combustion are determined using graphs.

LFL and UFL calculations of mixtures such as semi-coke gas (VKG Petroter, Enefit-140, Enefit-280 and Kiviõli Keemiatööstus OÜ) and heating gas (VKG OIL AS) were performed according to the given methodology. For the qualitative and quantitative similarity of the mixtures, the calculated values came very close (3,13 – 4,04 % for LFL and 17,23

- 20,72 % for UFL). Classification of the mixtures was carried out according to the ISO10156:2017 standard, according to which all given mixtures were found to be flammable, non-oxidizing and non-explosive. The prepared flammability diagrams confirm the obtained results.

The methodology for calculating the extent of explosion danger zones and the dilution rate was also brought out, and the necessary calculations were performed for a specific example - a bunker located in the oil storage of VKG OIL AS, in which the evaporation of fuel fine ash takes place. The calculated values of the flammability limits showed that one of the samples (sample 1) is explosive, and on the basis of this two calculations of the extent and dilution rate of the explosion hazard zones (inside and outside the building) were performed. The results showed that the extent of the zone is about 1.8 m and the dilution rate is average for both zones. Both zones were classified into the second group (zone 2). In order to avoid danger, it was proposed to inert the bunker with nitrogen.

Thus, the aim of the thesis and the set tasks have been achieved - the calculations and analysis of the flammability limits and explosion hazard zones of the products of the oil shale industry have been performed.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Eesti Põlevkivitööstuse aastaraamat 2022. [Online] https://www.vkg.ee/wp-content/uploads/2023/11/polevkivitoostuse_aastaraamat_2022_est.pdf (10.04.2024)
2. Green, D. W., Perry, R. H. (2019). Perry's Chemical Engineers' Handbook, 9th edition.
3. Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals. [Online] <https://unece.org/sites/default/files/2023-07/GHS%20Rev10e.pdf> (10.05.2024)
4. Ma, T. Ignitability and Explosibility of Gases and Vapors.
5. Zabetakis, M. G. (1965). Flammability characteristics of combustible gases and vapors, Washington, U.S. Dept of the Interior, Bureau of Mines, Bulletin 627.
6. Coward, H. F., Jones, G. W. (1952). Limits of flammability of gases and vapors, Washington, U.S. Dept of the Interior, Bureau of Mines, Bulletin 503.
7. Crowl, D. A. (2003). Understanding explosions.
8. Molnarne, M., Schroeder, V. (2017). Flammability of gases in focus of European and US standards – Journal of Loss Prevention in the Process Industries. [Online] <https://sci-hub.se/10.1016/j.jlp.2017.05.012> (20.03.2024)
9. Schroeder, V. (2016). Calculation of Flammability and Lower Flammability Limits of Gas Mixtures for Classification Purposes – Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM). [Online] <https://opus4.kobv.de/opus4-bam/files/41830/Schroeder++Calculation+of+Flammability+Limits.pdf> (19.03.2024)
10. UNECE. [Online] <https://unece.org/about-ghs> (19.03.2024)
11. EVS-EN ISO 10156:2017. Gas cylinders – Gases and gas mixtures – Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets.
12. Zlochower, I. A., Green, G. M. (2009). The limiting oxygen concentration and flammability limits of gases and gas mixtures – Journal of Loss Prevention in the Process Industries. [Online] <https://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/tloca.pdf> (18.03.2024)
13. ГОСТ IEC 60079-10-1-2013. ВЗРЫВООПАСНЫЕ СРЕДЫ – Классификация зон. Взрывоопасные газовые среды.
14. Riigi Teataja – Plahvatusohutsoonide määramise nõuded. [Online] <https://www.riigiteataja.ee/akt/107082015003> (10.04.2024)
15. EVS-EN 6079-10-1:2016. Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of areas

– Explosive gas atmospheres.

16. LGM Products. [Online] <https://lgmproducts.com/resources/atex-explained/>
(10.04.2024)
17. ENTEH Engineering AS
18. Кузнецов Н.В. (1998). Тепловой расчет котлов – Нормативный метод. Санкт-Петербург.
19. Branan, C. R. (2002). Rules of Thumb for Chemical Engineers, Third Edition.
20. NFPA 56-2017. Fire and Explosions Prevention during cleaning and Purging of Flammable Gas Piping System

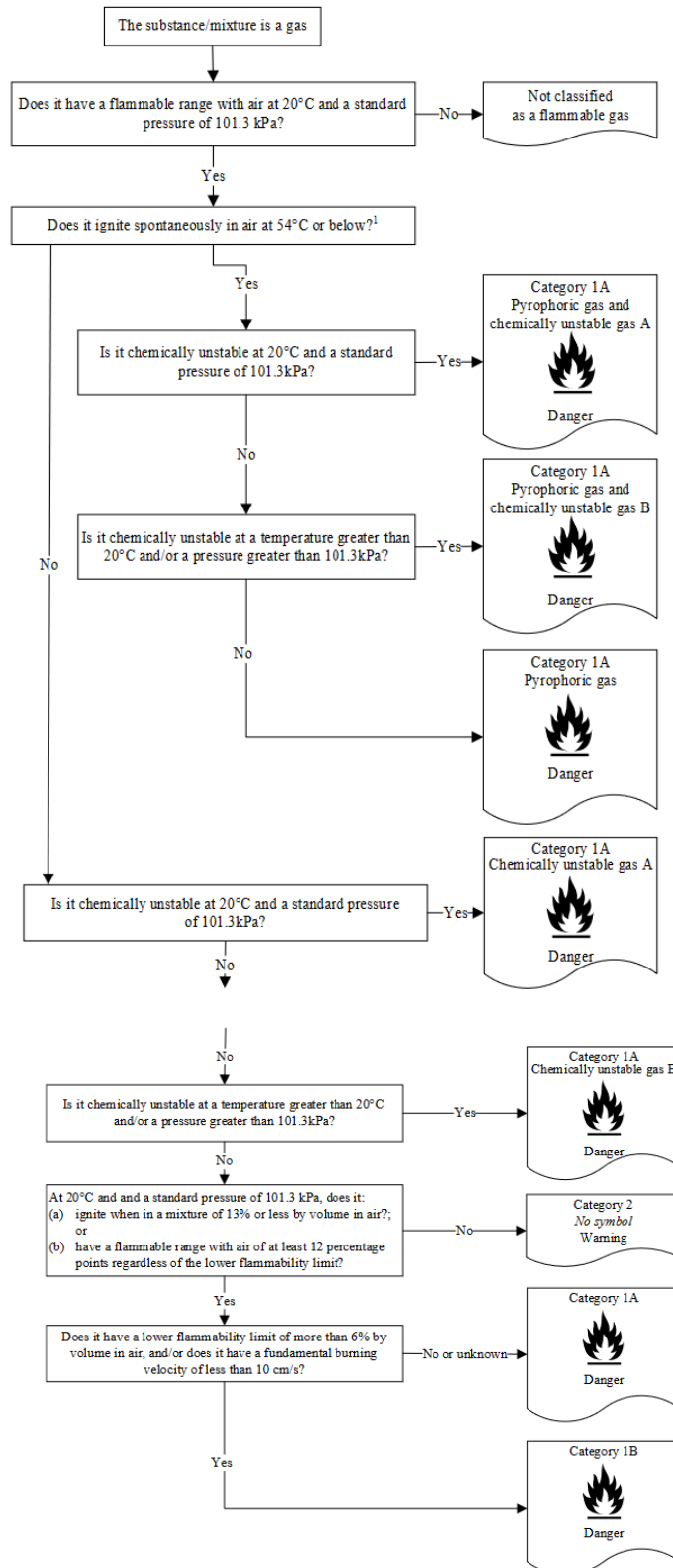
LISA 1 MÕNEDE KEMIKAALIDE PÕLEMISOOJUS, LEEKPUNKT JA ISESÜTTIMISTEMPERatuur [7: LISA C]

Kemikaal	Põlemissoojus, kJ/mol	Leekpunkt, °C	Isesüttimistemperatuur, °C
Parafiini süsivesinikud			
Metaan	-89,3	-222,5	632
Etaan	-1559,8	-130,0	472
Propaan	-2219,9	-104,4	493
Butaan	-2877,5	-60,0	408
Isobutaan	-2869,0	-	462
Pentaan	-3536,6	<-40,0	579
Isopentaan	-3527,6	-	420
2,2-dimetüülpropaan	-3514,1	-	450
Heksaan	-4194,5	-23,0	487
Heptaan	-4780,6	-4,0	451
2,3-dimetüülpentaan	-4842,3	-	337
Oktaan	-5511,6	13,3	458
Nonaan	-	31,1	285
Dekaan	-6737,0	46,1	463
Olefiinid			
Eteen	-1411,2	-	490
Propeen	-2057,3	-107,8	458
1-Buteen	-2716,8	-80,0	384
2-Buteen	-2708,2	-73,3	435
1-Penteen	-3361,4	-17,8	273
Atsetüleenid			
Atsetüleen	-1299,6	-17,8	305
Aromaatsed ühendid			
Benseen	-3301,4	-11,1	740
Tolueen	-3947,9	4,4	810
1.2-Ksüleen	-4567,6	17,0	496
Tsükliilised süsivesinikud			
Tsüklopropaan	-2091,3	-	498
Tsükloheksaan	-3953,0	-17,0	259
Metüültsükloheksaan	-4600,7	-	265
Terpeenid			
Tärpentiin	-	35,0	252
Alkoholid			
Metanool	-764,0	12,2	574
Etanool	-1409,2	12,8	558
Prop-2-en-1-ol	-1912,2	21,1	389
n-Propanool	-2068,9	15,0	505
Isopropanool	-2051,0	11,7	590

n-Butanool	-2728,3	35,0	450
Amüülalkohol	-3320,8	32,8	409
Isoamüülalkohol	-	-	518
Aldehüüdid			
Atseetaldehüüd	-764,0	-37,8	185
(2E)-but-2-enaal	-2268,1	12,8	-
2-furaankarboksaldehüüd	-234,9	-	-
2,4,6-trimetppl-1,3,5-trioksaan	-	17,0	541
Eetrid			
Dietüüleeter	-2751,1	-45,0	229
Divinüüleeter	-2416,2	<-30,0	360
Ketoonid			
Atsetoon	-1821,4	-17,8	700
Metüületüülketoon	-2478,7	-4,4	514
Metüülpropüülketoon	-3137,6	7,2	505
Metüülbutüülketoon	-3796,3	-	533
Haped			
Etaanhape	-926,1	42,8	599
Vesiniktsüaniidhape	-	-17,8	538
Estrid			
Metüülformiaat	-1003,0	-19,0	236
Etüülformiaat	-1638,8	-20,0	577
Metüülatsetaat	-1628,1	-9,4	654
Etüülatsetaat	-2273,6	-4,4	610
Propüülatsetaat	-	14,4	662
Isopropüülatsetaat	-2907,0	-	572
Butüülatsetaat	-3587,8	22,2	423
Amüülatsetaat	-4361,7	-	399
Anorgaanilised			
Vesinik	-285,8	-	572
Ammoniaak	-382,6	-	651
Tsüaan	-1080,7	-	850
Oksiidid			
Etüleenoksiid	-1264,0	-20,0	429
Propüleenoksiid	-	-37,2	748
Dioksaan	-	12,2	266
Sulfiidid			
Süsinikdisulfiid	-1031,8	-30,0	149
Vesiniksulfiid	--562,6	-	292
Karbonüülsulfiid	--546,0		
Kloriidid			
Klorometaan	-687,0	0,0	632
Kloroetaan	-1325,0	-50,0	516
1-kloropropaan	-2001,3	<-17,7	520

Klorobutaan	-	-12,0	460
1-kloro-2-metüülpropaan	-	-	-
Allüülkloriid	-	-31,7	487
Amüülkloriid	-	-	259
Vinüülkloriid	-	-8,0	-
1,2-dikloroetaan	-1133,8	-	413
1,2-dikloropropaan	-	-51,7	557
Bromiidid			
Bromometaan	-768,9	-20,0	537
Bromoetaan	-1424,6	-	588
Allüülbromiid	-	-	295
Amiinid			
Metüülamiin	-1085,1	0,0	430
Etüülamiin	-1739,9	-	384
Dimetüülamiin	-1768,9	-	402
Propüülamiin	-2396,6	-	318
Dietüülamiin	-3074,3	-	312
Trimetüülamiin	-2443,0	-	-
Trietüülamiin	-4134,5	-	-

LISA 2 AINE VÕI SEGU KLASSEERIMISE LOOGIKA [3: 53]



LISA 3 MÕNEDE SÜTTIVATE GAASIDE SÜTTIVUSPIIRID JA T_{ci} VÄÄRTUSED [11: 9]

Gaas	CAS nr.	ÜRO nr.	T _{ci} (%)	LFL (%)
Atsetüleen	74-86-2	3374	3,0	2,3
Ammoniaak	7664-41-7	1005	40,1	15,4
Arsiin	7784-42-1	2188	3,9	3,9
Bromometaan	74-83-9	1062	13,9	8,6
1,2 - Butadien	590-19-2	1010	2,0	1,4
1,3 - Butadien	106-99-0	1010	2,0	1,4
n-Butaan	106-97-8	1011	3,6	1,4
1- Buteen	106-98-9	1012	3,3	1,5
cis - Buteen	590-18-1	1012	3,3	1,5
trans - Buteen	624-64-6	1012	3,3	1,5
Süsinikoksiid	630-08-0	1016	15,2	10,9
Karbonüülsulfid	463-58-1	2204	6,5	6,5
Klorodifluoroetaan (R142b)	75-68-3	2517	26,4	6,3
Kloroetaan	75-00-3	1037	5,8	3,6
Klorotrifluoroetüleen (R1113)	79-38-9	1082	7,4	4,6
Tsüaan	460-19-5	1026	3,9	3,9
Tsüklobutaan	289-23-0	2601	2,9	1,8
Tsüklopropaan	75-19-4	1027	3,4	2,4
Deuteerium	7782-39-0	1957	6,7	6,7
Diboraan	19287-45-7	1911	0,9	0,9
Diklorosilaan	4109-96-0	2189	2,5	2,5
Difluoroethane (R152a)	75-37-6	1030	8,7	4,0
Difluoroetüleen (R1132a)	75-38-7	1959	6,6	4,7
Dimetüüleeter	115-10-6	1033	3,8	2,7
Dimetüülamiin	124-40-3	1154	2,8	2,8
Dimetüülpropaan (neopetaan)	463-82-1	2044	2,1	1,3
Etaan	74-84-0	1035	4,5	2,4
Etüülmetüüleeter	540-67-0	1039	2,8	2,0
Etüülatsetüleen	107-00-6	2452	1,8	1,3
Etüleen	74-85-1	1962	4,1	2,4
Etüleenoksiid	75-21-8	1040	4,8	2,6
Fluoroetaan	353-36-6	2453	6,1	3,8
Fluorometaan	593-53-3	2454	9,0	5,6
Germaan	7782-65-2	2192	1,0	1,0 (hinnanguline)
Vesinik	1333-74-0	1049	5,5	4,0

Vesinikseleniid	7783-07-5	2202	4,0	4,0
Vesiniksulfiid	7783-06-4	1053	8,9	3,9
Isobutaan	75-28-5	1969	3,4	1,5
Isobuteen	115-11-7	1055	4,0	1,6
Metaan	74-82-8	1971	8,7	4,4
Metüülkloriid	74-87-3	1063	12,3	7,6
Metüülmerkaptaan	74-93-1	1064	5,7	4,1
Metüülnitrit	624-91-9	2455	5,3	5,3
Metüülsilaan	992-94-9	3161	1,3	1,3
Metüülatsetüleen (propüün)	74-99-7	3161	2,5	1,8
Metüülamiin	74-89-5	1061	6,9	4,9
Metüülbuteen (3- metüülbut-1-een)	563-45-1	2561	2,4	1,5
Monoetüülamiin	75-04-7	1036	5,7	3,5
Fosfiin	7803-51-2	2199	1,7	1,6
Propadieen	463-49-0	2200	2,7	1,9
Propaan	74-98-6	1978	3,7	1,7
Propeen	115-07-1	1077	4,2	1,8
Silaan	7803-62-5	2203	1,0	1,4
Tetrafluoroetüleen (R1114)	116-14-3	1081	10,5	10,5
Trifluoroethane (R143a)	420-46-2	2035	11,3	7,0
Trifluoroetüleen (R1123)	359-11-5	1954	13,1	10,5
Trimetüülamiin	75-50-3	1083	3,2	2,0
Trimetüülsilaan	993-07-7	3161	1,3	1,3
Vinüülbromiid	593-60-2	1085	9,0	5,6
Vinüülkloriid	75-01-4	1086	6,1	3,8
Vinüülfluoriid	75-02-5	1860	4,7	2,9
Vinüülmetüüleeter	107-25-5	1087	3,6	2,2

LISA 4 MÕNEDE SÜTTIVATE AURUDE SÜTTIVUSPIIRID JA T_{ci} VÄÄRTUSED [11: 10]

Aur	CAS nr.	ÜRO nr.	T _{ci} (%)	LFL (%)
Atseetaldehüüd	75-07-0	1088	6,5	4,0
Atsetoon	67-64-1	1090	4,0	2,5
Benseen	71-43-2	114	2,3	1,2
Süsinikdisulfiid	75-15-0	1131	1,3	0,6
Tsükloheksaan	110-82-7	1145	1,8	1,0
n-Dekaan	124-18-5	2247	1,1	0,7
Dietüüleeter	60-29-7	1155	2,4	1,7
Dimetüülsetüleen (2-butüün, krotonüleen)	503-17-3	1144	2,0	1,4
2,2-dimetüülbutaan (neoheksaan)	75-83-2	1208	1,9	1,2
n-Dodekaan	112-40-3	-	1,0	0,6
Etanool	64-17-5	1170	5,6	3,1
Etüülsetaataat	141-75-6	1173	4,6	2,0
Etüülkloriid (kloroetaan)	75-00-3	1037	5,8	3,6
Etüülformiaat	109-94-4	1089	3,8	2,7
n-Heptaan	142-82-5	1206	1,3	0,8
n-Heksaan	110-54-3	1208	2,3	1,0
Vesiniktsüaniid	74-90-8	1051	5,4	5,4
Isooktaan (2,2,4- Trimetüülpentaan)	540-84-1	1262	1,6	1,0
Isopentaan (2- metüülbutaan)	78-78-4	1265	2,1	1,3
Pliitetraetüül (tetraetüüplii)	78-00-2	1649	1,8	1,8
Metanool	67-56-1	1230	12,5	6,0
Metüülsetaataat	79-20-9	1231	5,0	3,1
Metüületüülketoon (butanoon)	78-93-3	1193	2,4	1,5
Metüülformiaat	107-31-3	1243	8,1	5,0
Metüleenkloriid (Diklorometaan)	75-09-2	1592	21,0	13,0
Monoklorosilaan	13465-78-6	2986	1,0	1,0 (hinnanguline)
Nikkelkarbonüül (tetrakarbonüülnikkel)	13463-39-3	1259	0,9	0,9
n-Nonaan	11-84-2	1920	1,1	0,7
n-Oktaan	11-65-9	1262	1,3	0,8
n-Pentaan	109-66-0	1265	1,8	1,1
Propüülformiaat	110-74-7	1281	4,6	2,1

Propüleenoksiid	75-56-9	1280	3,7	1,9
Tolueen	108-88-3	1294	2,3	1,0

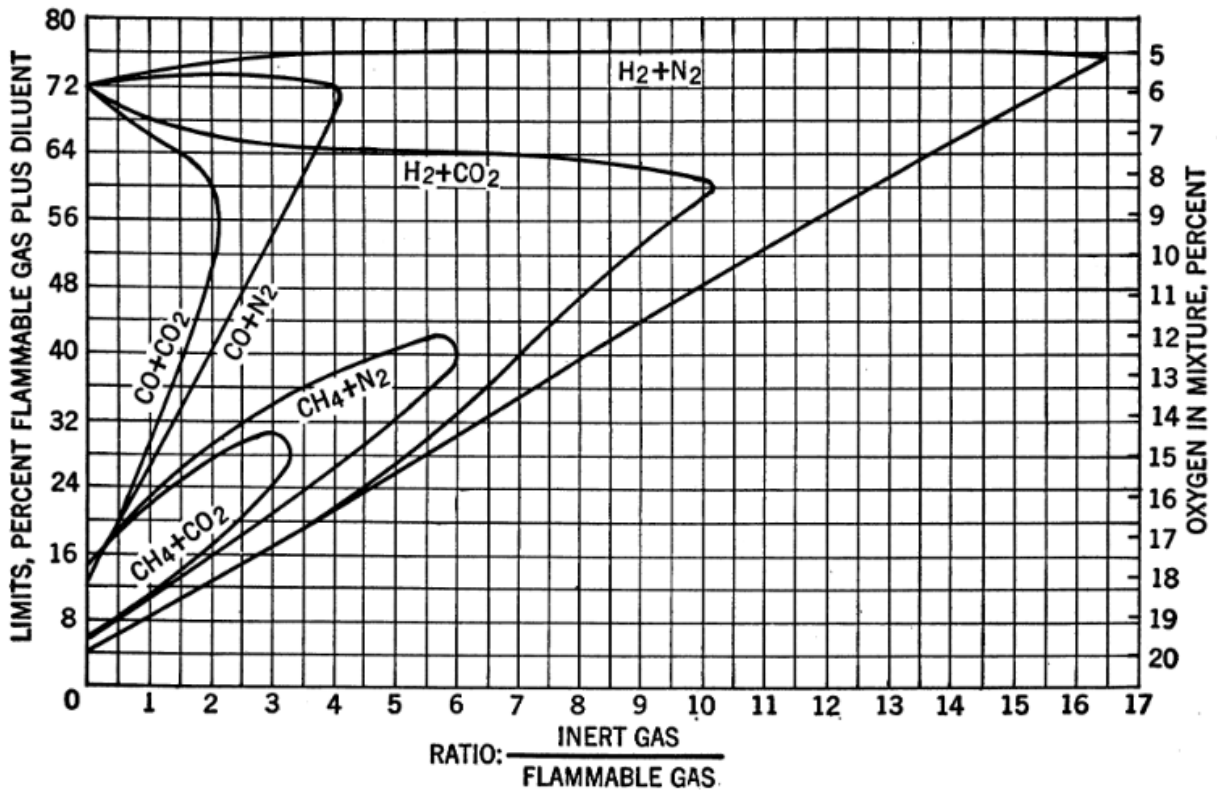
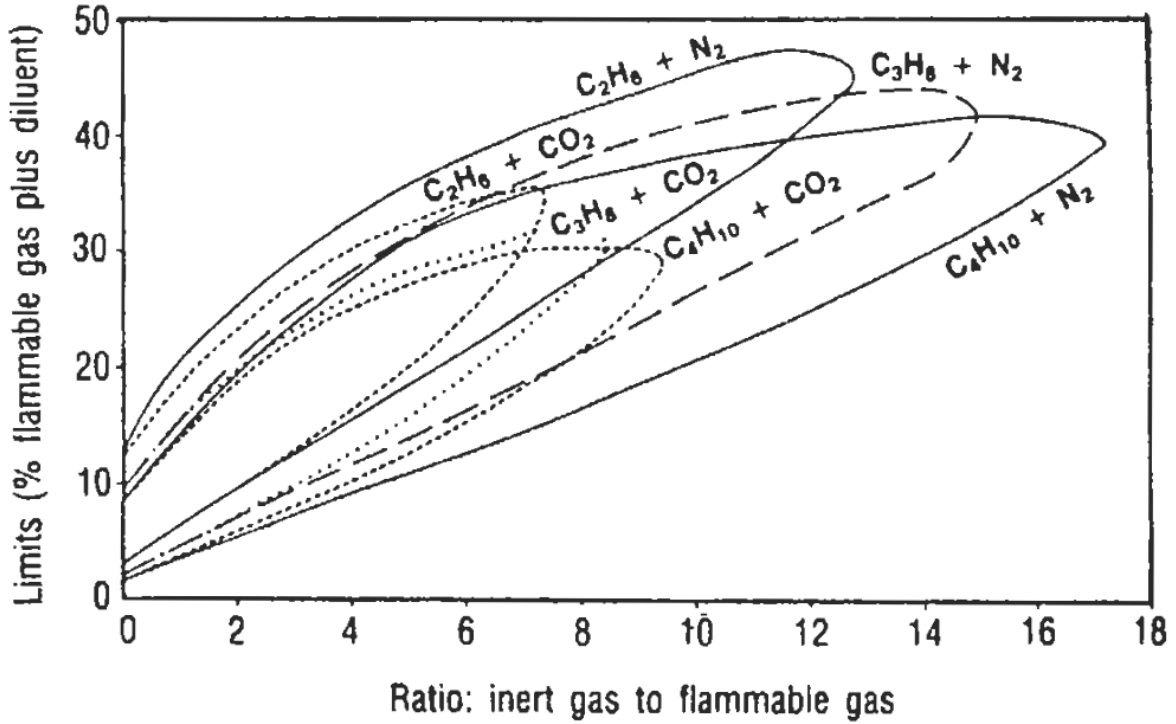
**LISA 5 HAPNIKU PIIRKONTSETRATSIOONIDE (LOC)
TABEL [2: 23-8]**

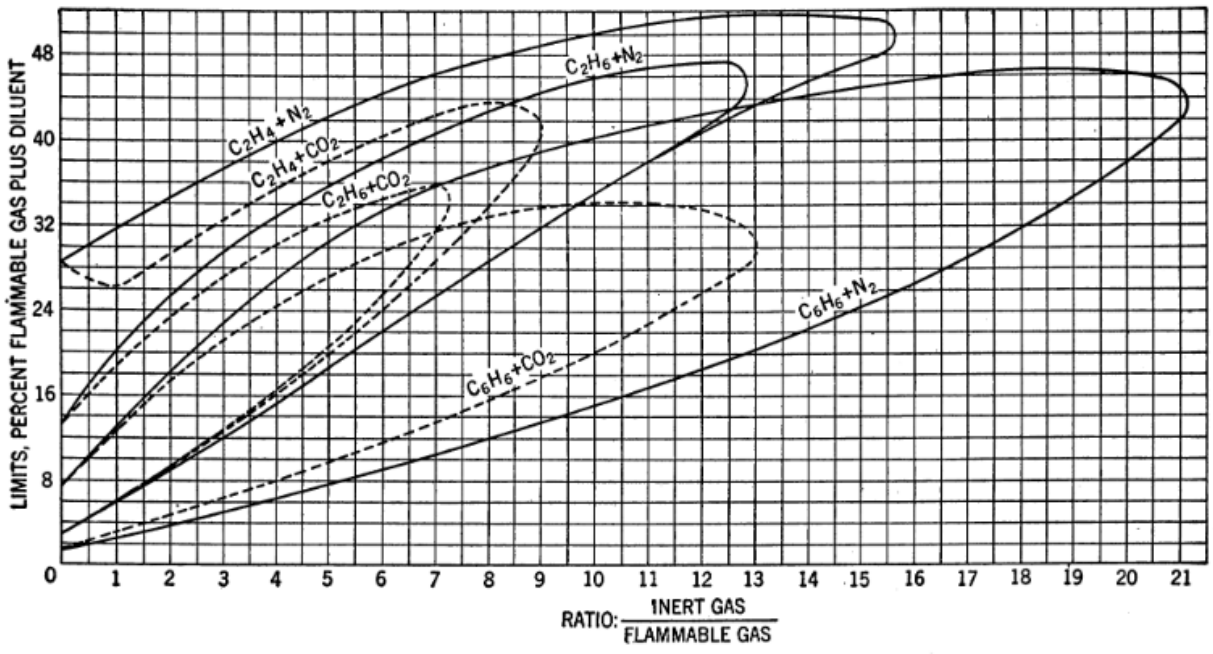
Gaas või aur	N ₂ /õhk	CO ₂ /õhk	
Metaan	12	14,5	
Etaan	11	13,5	
Propaan	12,5	14,5	
n-Butaan	12	14,5	
Isobutaan	12	15	
n-Pentaan	12	14,5	
Isopentaan	12	14,5	
n-Heksaan	12	14,5	
n-Heptaan	11,5	14,5	
Etüleen	10	11,5	
Propüleen	11,5	14	
1-Buteen	11,5	14	
Isobutüleen	12	15	
Butadieen	10,5	13	
3-Metüül-1-buteen	11,5	14	
Benseen	11,4	14	
Tolueen	9,5	-	
Stüreen	9,0	-	
Tsüklopropaan	11,5	14	
Bensiin			
	(73/100)	12	15
	(100/130)	12	15
	(115/145)	12	14,5
Petrooleum	10 (150°C)	13 (150°C)	
JP-1 kütus	10,5 (150°C)	14 (150°C)	
Maagaas	12	14,5	
Atsetoon	11,5	14	
t-Butanool	-	16,5 (150°C)	
Süsinikdisulfiid	5	7,5	
Süsinikoksiid	5,5	5,5	
Etanool	10,5	13	
Etüüleeter	10,5	13	
Vesinik	5	5,2	
Vesiniksulfiid	7,5	11,5	
Isobutüülformiaat	12,5	15	
Metanool	10	12	
Metüülatsetaat	11	13,5	

**LISA 6 KASUTUSEL OLEVA HAPNIKU
KONTSENTRATSIOON (ISOC) JA KASUTUSEST VÄLJAS
OLEVA KÜTUSE KONTSENTRATSIOON (OSFC)
EKSPERIMENTAALSED ANDMED [Z: 119]**

Kemikaal	OSFC, %vol kütus	ISOC, %vol hapnik
Metaan	14,5	13,0
Etaan	7,0	11,7
Propaan	6,2	12,0
Butaan	5,8	12,5
n-Pentaan	4,2	12,0
n-Heksaan	3,8	12,2
Maagaas	11,0	12,8
Eteen	6,0	10,5
Propeen	6,0	12,0
Isobuteen	5,5	12,5
1-buteen	4,8	11,7
3-metüülbuteen	4,0	11,5
1,3-butadien	4,9	10,8
Atsetüleen	4,0	7,0
Benseen	3,7	11,8
Tsüklopropaan	7,0	12,0
Metanool	15,0	10,8
Etanool	9,5	11,0
Dimetüüleeter	7,1	11,0
Dietüüleeter	3,8	11,0
Metüülformiaat	12,5	11,0
2-metüülpropüülformiaat	6,5	12,7
Metüülatsetaat	8,5	11,7
Atsetoon	7,8	12,0
Metüületüülketoon	5,3	11,5
Süsinikdisulfiid	2,5	6,0
Bensiin (115/145)	3,8	12,0
JP-4	3,5	11,7
Vesinik	5,0	5,7
Süsinikmonooksiid	19,5	7,0

**LISA 7 JAGATUD SEGUDE SÜTTIVUSPIIRIDE
ARVUTAMISE JOONISED [6: 7] [19: 280]**





LISA 8 VENTILATSIOONIKIIRUSE VÄÄRTUSED VÄLISTINGIMUSTES [15: 52]

Väliskohtade tüüp	Takistusteta alad			Takistatud alad		
	≤ 2 m	> 2 m kuni 5 m	> 5 m	≤ 2 m	> 2 m kuni 5 m	> 5 m
Kõrgus maapinnast	≤ 2 m	> 2 m kuni 5 m	> 5 m	≤ 2 m	> 2 m kuni 5 m	> 5 m
Ventilatsiooni soovituslikud kiirused õhust kergemate gaaside/aurude eraldumise hindamiseks	0,5 m/s	1 m/s	2 m/s	0,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s
Ventilatsiooni soovituslikud kiirused õhust raskema gaasi/auru eraldumise lahjenduse hindamiseks	0,3 m/s	0,6 m/s	1 m/s	0,15 m/s	0,3 m/s	1 m/s
Ventilatsiooni soovituslikud kiirused vedeliku basseini aurustumiskiiruse hindamiseks mis tahes kõrgusel	> 0,25 m/s			> 0,1 m/s		

LISA 9 AVA RISTLÕIKE PINDALA JA ALLIKA RAADIUS

[13: 21]

Varustus	Lekke hindamine	Ava ristlõikepindala S, mm ²	Allika raadius r ₀ , mm
Äärikud koos tihendiga valmistatud kokkusurutud kiust või sarnastest vahetükkidest	Tüüpiline väärtus kuni 10 baari rõhu all olevate süsteemide jaoks. Kõrgema rõhu korral tuleb vältida ava suurenemist lekke korral.	2,5	0,892
	Tõsine rike kahe poldiaugu vahelise tihendisegmendi täieliku rikke tõttu. Kasutamiseks süsteemides rõhuga üle 10 baari	segment kahe poldi vahel x vahekihi paksus	Määratakse S-ga vastavusel
Äärikud spiraalselt keeratud tihendiga või sarnaste tihenditega	Tüüpiline väärtus, kui on kasutusele võetud meetmed, et vältida suurenemist ava	0,25	0,089
	Tõsine rike tihendi segmendi hävimise tõttu	segment x 0,05 mm	Määratakse S-ga vastavusel
O-rõngad	Tüüpiline väärtus	0,1	0,178
	Tõsine rike ühenduse tõrke tõttu	0,5	0,398
Klapid	Tüüpiline väärtus kõikidele klappidele nominaalläbimõõduga kuni 150 mm	0,25	0,089
	Tüüpiline väärtus raske töökoormusega ventiilidele ja ventiilidele, mille nominaalläbimõõt on suurem kui 150 mm	2,5	0,892
Kaitseklapid	Tüüpiline väärtus rõhuga töötavate kaitseklappide jaoks, mis võivad protsessi rikke tõttu rakenduda	0,1 x ava pindala	Määratakse S-ga vastavusel
Tsentrifugaalpumbad ja kompressorid	Kliirensi ja läbimõõdu väärtused (I ja d) määratakse vastavalt seadme tootja dokumentatsioonile. Summutuskoefitsienti k kasutatakse tihendamist parandavate vahendite kasutamisel	$\pi \times l \times d \times k_r$	-

Kolbkompressorid	Tüüpiline väärtus, kui võetakse kasutusele meetmeid, et vältida ava suurenemist	2,5	0,892
Drenaaži- ja proovivõtuavad	Tüüpiline väärtus äravoolu- ja proovivõtuportide jaoks avatud vooluringis. Teiste elementide (ääratud, ventiilid jne) puhul viiakse läbi eraldi hindamine	0,1 x toru läbimõõt	Määratakse S-ga vastavusel
Väikese läbimõõduga torude ühendused	Tüüpiline väärtus, kui võetakse kasutusele meetmeid, et vältida ava suurenemist	0,25	0,089

LISA 10 PRODUKTIDE KOOSTISE KOONDTABEL [17]

Produkt	CH₄	C₂H₆	C₃H₈	C₄H₁₀	C₅H₁₂	C₂H₄	C₃H₆	C₄H₈	CO	H₂S	H₂	N₂	CO₂	O₂
VKG Petroter (poolkoksigaas)	15,38	8,30	2,81	1,12	6,07	10,70	7,83	2,67	9,68	2,24	14,38	8,49	9,50	0,20
Enefit-140 (poolkoksigaas)	13,73	9,15	3,66	1,55	10,34	9,15	7,35	6,00	7,32	3,20	13,73	3,66	10,98	0,18
Enefit-280 (poolkoksigaas)	15,42	8,62	3,63	1,68	11,17	7,25	6,38	6,49	7,25	0,18	18,14	12,70	0,91	0,18
Kiviõli Keemiatööstus OÜ (poolkoksigaas)	19,60	9,29	2,55	0,91	6,43	14,34	9,83	5,62	7,98	-	18,69	3,97	0,66	0,13
VKG OIL AS (küttegaas)	28,02	10,55	4,04	1,71	-	6,79	5,36	3,73	6,97	1,99	19,86	2,94	7,92	0,13
VKG Petroter 1, 2, 3 (uttegaas)	17,37	9,04	3,06	1,13	-	12,47	8,26	5,87	10,22	2,53	13,90	5,05	10,98	0,12

LISA 11 SEGUDE ARVUTATUD ANDMED

Segu	LFL(mix), %	UFL(mix), %	LOC(mix), %	T _{Cl} (mix), %	T _{Cl,F} (mix), %	Stõhhiomeetriline punkt, %	Tuleohtlikud komponendid, %	Inertne osa, %	O ₂ sisaldus, %	Segu olek
VKG Petroter (poolkoksigaas)	3,73	19,42	8,60	4,86	4,72	74,04	81,81	17,99	0,20	süttiv; mitte oksüdeeruv; mitte plahvatusohtlik
Enefit-140 (poolkoksigaas)	3,21	17,47	8,76	4,40	4,25	76,82	85,18	14,82	0,18	süttiv; mitte oksüdeeruv; mitte plahvatusohtlik
Enefit-280 (poolkoksigaas)	3,22	17,23	8,88	4,36	4,22	76,57	86,21	13,79	0,18	süttiv; mitte oksüdeeruv; mitte plahvatusohtlik
Kiviõli Keemiatööstus (poolkoksigaas)	3,13	18,04	8,73	4,78	4,44	74,35	95,24	4,76	0,13	süttiv; mitte oksüdeeruv; mitte plahvatusohtlik
VKG OIL AS Küttegaas	4,04	19,49	8,72	5,75	5,55	69,97	89,01	10,99	0,13	süttiv; mitte oksüdeeruv; mitte plahvatusohtlik
VKG Petroter 1, 2, 3 uttegaas	3,99	20,72	8,53	5,44	5,32	71,90	83,85	16,15	0,12	süttiv; mitte oksüdeeruv;

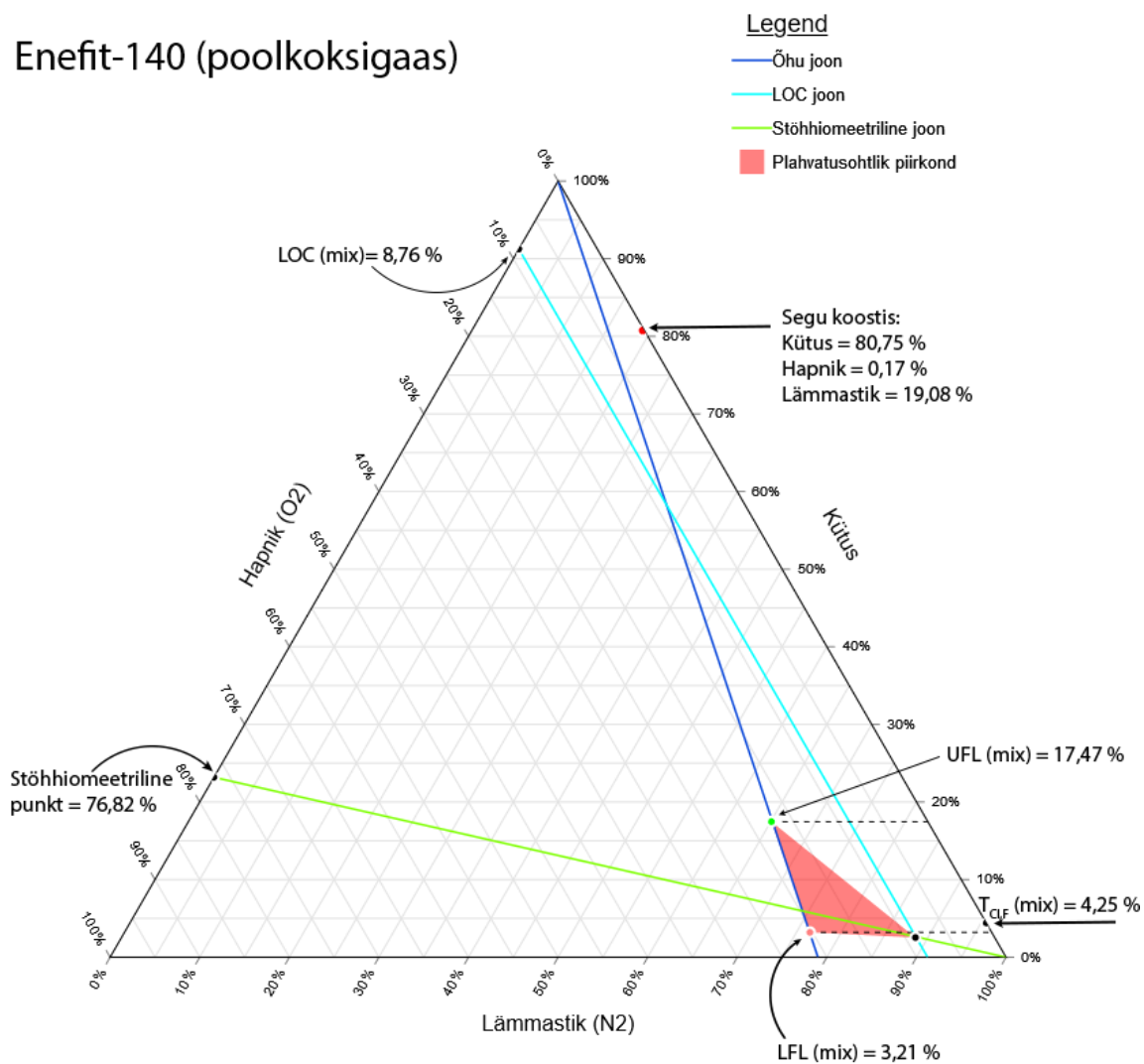
										mitte plahvatusohtlik
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--------------------------

**LISA 12 SEGUDE PÕLEVA OSA, LÄMMASTIKU JA
HAPNIKU SISALDUS, CO₂ ÜMBERARVUTAMISEL N₂
EKVIVALENTSUSELE**

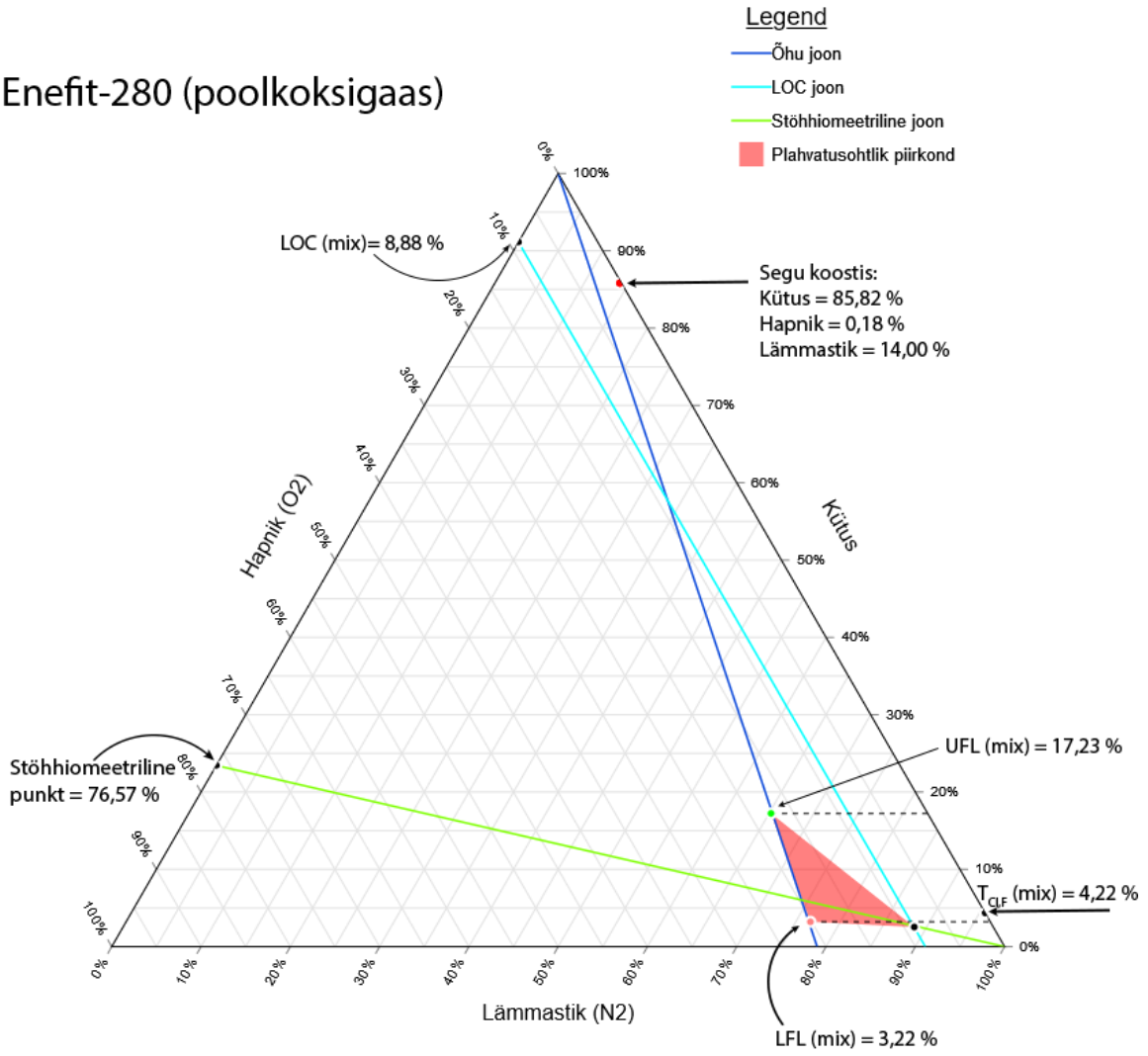
Segu	Põlev osa, %	Hapnik, %	Lämmastik, %
VKG Petroter (poolkoksigaas)	78,10	0,19	21,71
Enefit-140 (poolkoksigaas)	80,75	0,17	19,08
Enefit-280 (poolkoksigaas)	85,82	0,18	14,00
Kiviõli Keemiatööstus OÜ (poolkoksigaas)	94,93	0,13	4,94
VKG OIL AS Küttegaas	85,62	0,12	14,25
VKG Petroter 1, 2, 3 uttegaas	79,49	0,11	20,40

LISA 13 SEGUDE SÜTTIVUSE DIAGRAMMID

Enefit-140 (poolkoksigas)



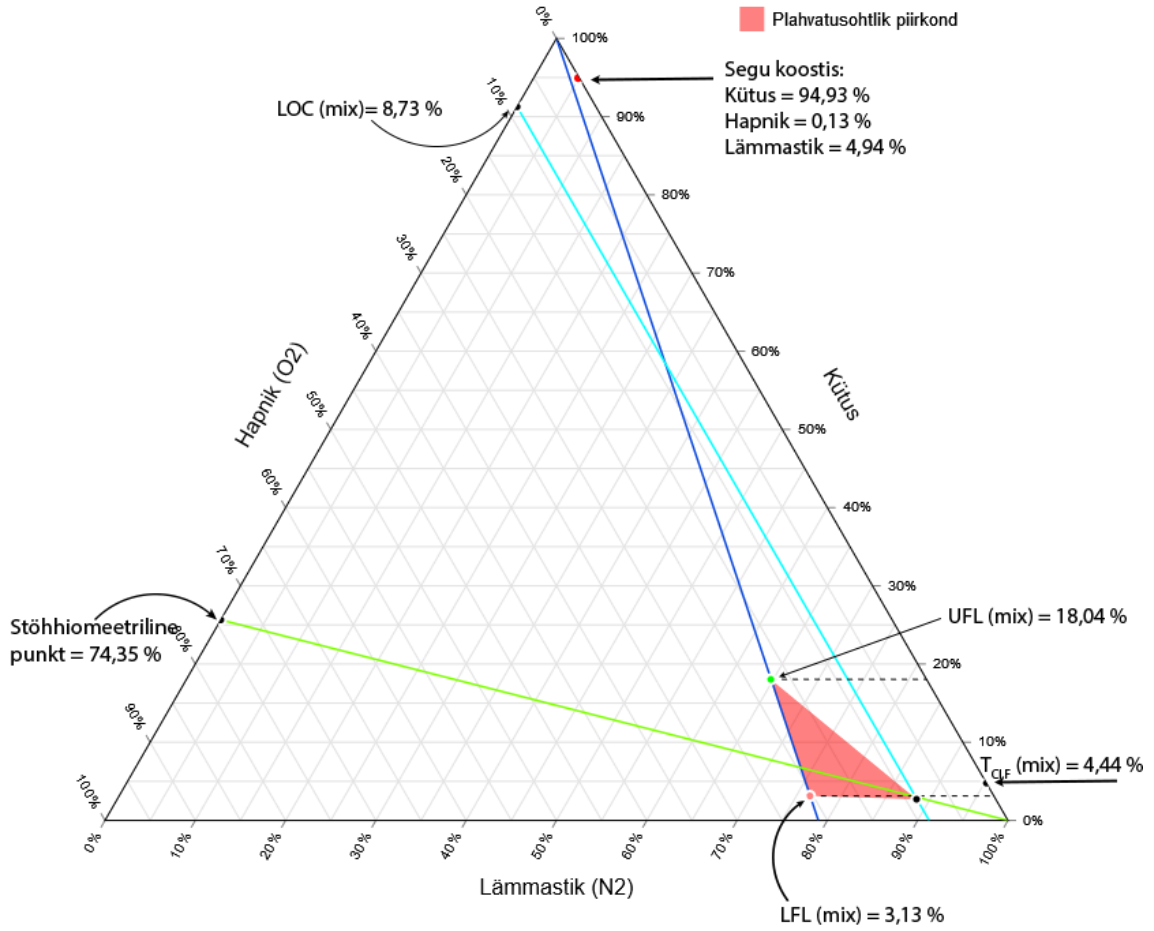
Enefit-280 (poolkoksigaas)



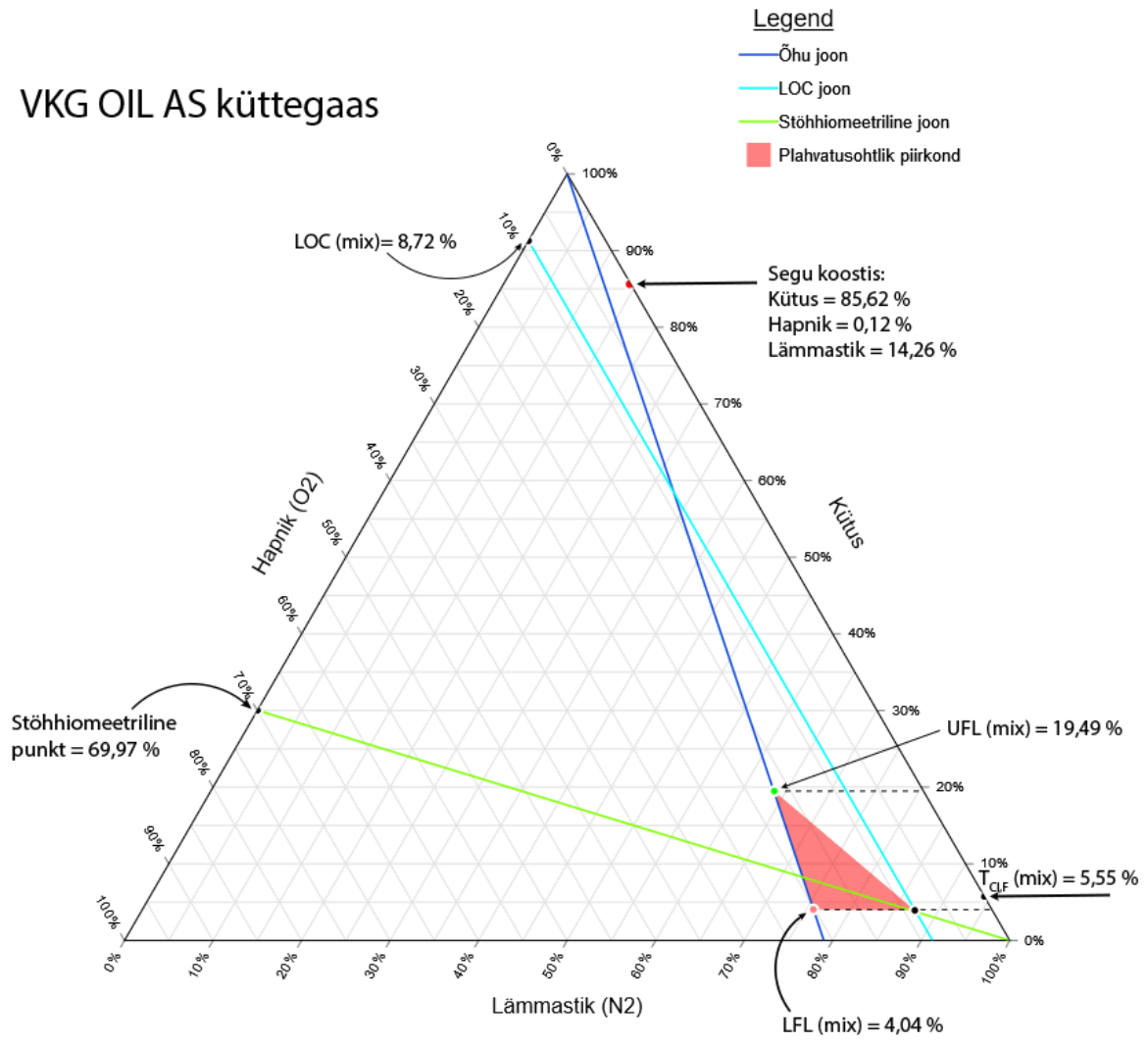
Kiviõli Keemiatööstus (poolkoksigaas)

Legend

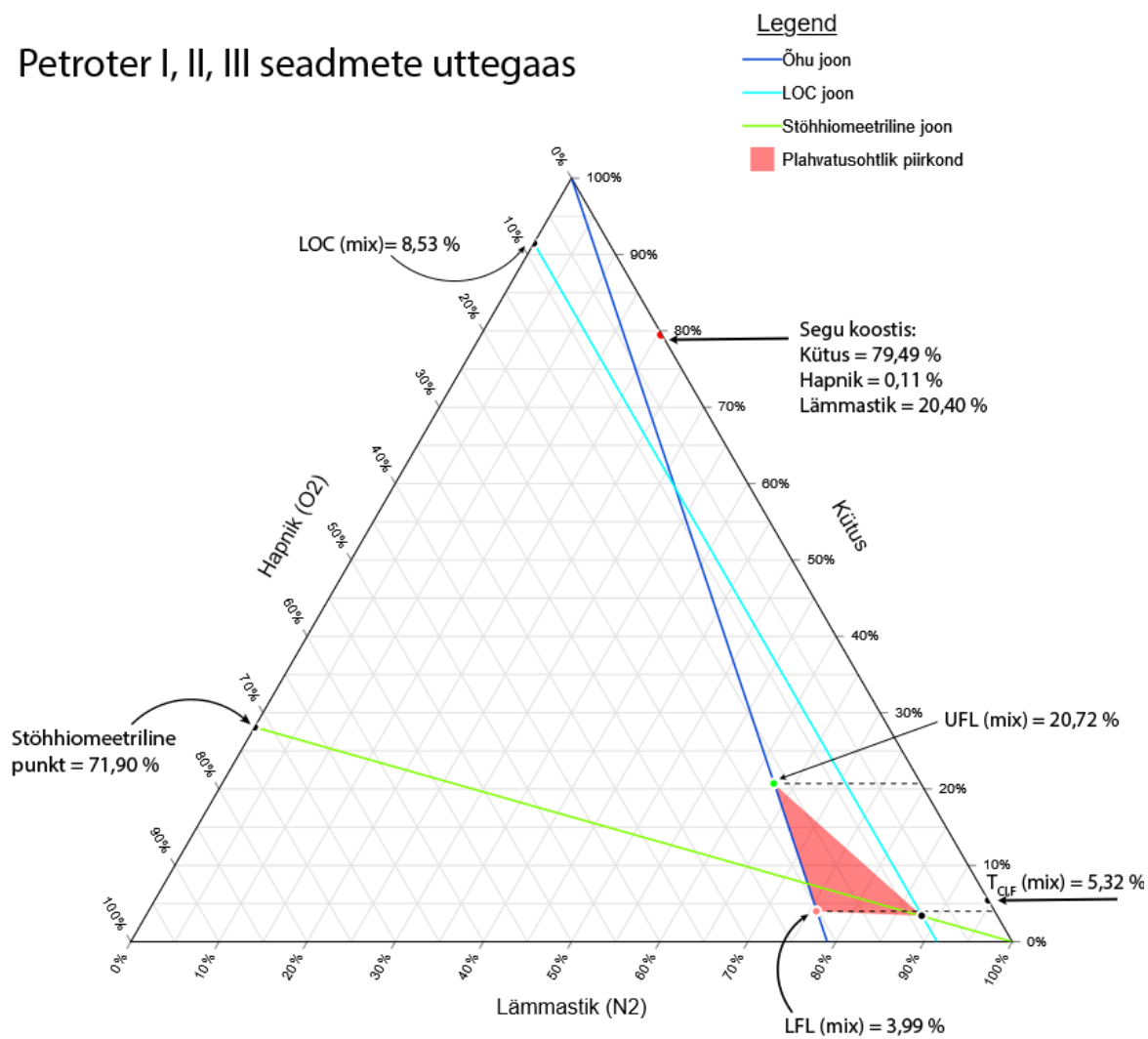
- Öhu joon
- LOC joon
- Stöhhiomeetriline joon
- Plahvatusohtlik piirkond



VKG OIL AS küttegaas



Petroter I, II, III seadmete uttegaas



LISA 14 VKG OIL AS ÕLILAOS ASUVA PUNKRI P&ID SKEEM [17]

