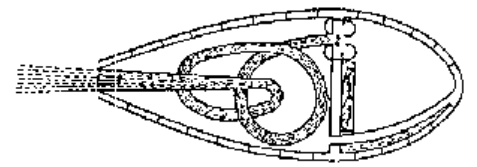


Nestemäiset rakettien ajoaineet



Tsiolkovskin raketti 1903

Historia, nykypäivä ja tulevaisuus

Juhani Hemmi

Vuonna 1903 Venäjällä, Pietarin kaupungissa julkaistiin aikakauslehti, jonka nimi voidaan kääntää ”*Tieteellinen Julkaisu*”. Sen vaikuttavin luku on suomennettuna ”*Avaruuden tutkimus reaktiovoimaan perustuvien laitteiden avulla*” ja sen kirjoittaja oli kouluopettaja *Konstantin Eduardovitch Tsiolkovski (1857-1935)*. Artikkelin sisältö voidaan jakaa seuraaviin kohtiin:

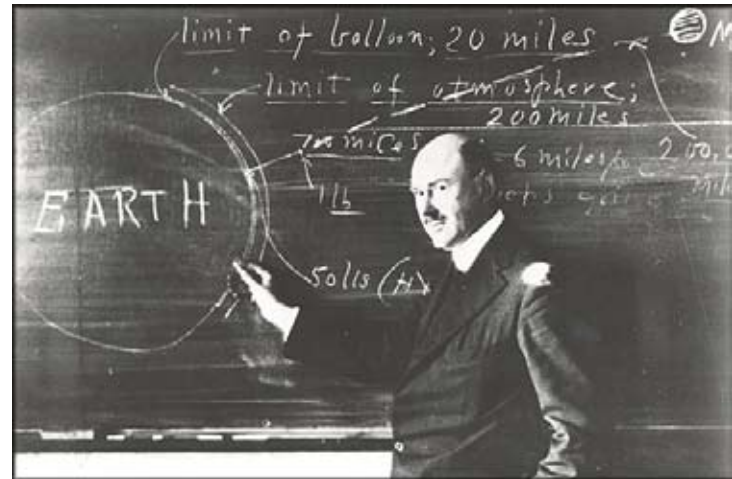
1. Avaruusmatkat ovat mahdollisia
2. Avaruusmatkat voidaan tehdä vain ja ainoastaan rakettien avulla, sillä raketti on ainoa reaktiovoimaan perustuva laite, joka toimii ilmatomassa avaruudessa
3. Mustaruutiraketteja tähän tarkoitukseen ei voida käyttää, koska musta ruuti, kuin myös savuton ruuti eivät sisällä tarpeeksi energiaa tähän tarkoitukseen
4. Tietyt nesteet sensijaan sisältävät tarpeellisen energiamäärän.
5. Nestemäinen vety ja nestemäinen happi olisivat sopiva ajoaineyhdistelmä tähän tarkoitukseen.

*Michael Faraday*stä (v. 1823) lähtien kaikkialla Euroopassa yritettiin nesteyttää tavallisia kaasuja. Ensin pystyttiin nesteyttämään kloori ja sitä seurasivat ammoniakki ja hiilidioksidi sekä monet muut kaasut. Happi onnistuttiin nesteyttämään vuonna 1883 ja typpi onnistuttiin nesteyttämään muutama vuosi myöhemmin. Vuonna 1895 Linde kehitti käyttökelpoisen menetelmän ilman nesteyttämiseksi, josta nestehappi ja nestetyppi erotettiin jakotilausmenetelmällä. Vetyä onnistuttiin nesteyttämään pieniä määriä vuonna 1898 ja suurempia määriä (n. 5 litraa) vuonna 1901. Vasta tämän jälkeen Tsiolkovsky kirjoitti avaruusmatkailusta rakettien avulla, jotka käyttivät ajoaineenaan nestevetyä ja nestehapetta. Jos happea ja vetyä ei olisi nesteytetty juuri tähän aikaan, ei Tsiolkovsky olisi pystynyt koko asiasta kirjoittamaan yhtään mitään.



Michael Faraday, 1791-1867, kädessään sauvamagneetti. (Johnson Fryn kaiverrus Toronton lääketieteakatemian)

Mies, jota pidetään käytännön nesterakettien luojana, on amerikkalainen tohtori *Robert H. Goddard*. Maailman ensimmäinen nesteraketti oli hänen valmistamansa, ja se lensi onnistuneesti 16.3.1923. Se saavutti 184 jalan korkeuden (n. 60 m) 2,5 sekunnissa polttamalla bensiiniä nestehapessa siten, että jokaista paunaa bensiiniä kohden hän käytti palamiseen 1,3 tai 1,4 paunaa



Robert H. Goddard (1882-1945), Clark University, 1924. Goddardilla oli kuollessaan yli 200 rakettitekniikan patenttia.

happea. Oikea suhde olisi ollut 2,2 - 3,0 yksikköä happea yhtä bensiiniyksikköä kohden. Tästä syystä hänen rakettimeoottorinsa olivat heikkotehoisia ja hän saavutti korkeintaan 170 sekunnin ominaisimpulssin.

Goddard kehitti raketteja *Charles Lindbergin* Guggenheim säätiön rahoituksella (Lindberg ylitti ensimmäisenä Atlantin lentokoneella) ja hän kehitti polttoaineen syötön turbopumppujen avulla. Hän myös kehitti hyrriin (gyroskooppeihin) perustuvan ohjausjärjestelmän raketteihin.

Myös Euroopassa, lähinnä Saksassa, Itävallassa ja Italiassa sekä myös Venäjällä tehtiin kokeita nesterakettimeoottoreilla. Näissä kokeissa käytettiin monenlaisia ajoaineyhdistelmiä. Mainittakoon tässä Itävaltalainen tohtori *Eugen Sänger* Wienin yliopistosta, joka suoritti rakettkokeita kevyellä polttoöljyllä, jota hän poltti nestehapessa. Hän keksi loistavan kemiallisen menetelmän ajoaineiden sytyttämiseksi moottorissa. Hän täytti osan polttoaineputkesta juuri ennen injektoria dietyylisinkillä, joka toimi ns. hypergolisenä sytytyspanoksena. Kun dietyylisinkki suihkutetaan injektorin kautta nestehappisuihkuun, se syttyy spontaanisti ja kun varsinainen polttoaine suihkuu tämän jälkeen moottoriin on siellä jo hyvä palaminen meneillään. Tätä sytytysmenetelmää käytetään nykyisin lähes kaikissa nestehappi-kerosiinimoottoreissa, sillä se on osoittautunut kaikkein varmimmaksi sytytysmenetelmäksi. Tosin dietyylisinkkiä ei nykyään käytetä, vaan se on korvattu trietylalumiinilla ja trietylboorilla seoksella.

Toisen maailmansodan aikana tai ehkä jo sitä ennen saksalaiset saivat käsiinsä Goddardin muistiinpanot hänen suorittamistaan rakettkokeista. Tältä pohjalta saksalaiset *Wernher von Braunin* johdolla kehittivät 70 % etanolia

nestehapessa polttavan V2 -raketin. Sodan loputtua von Braun muutti Yhdysvaltoihin, jossa hän myöhemmin toimi kantorakettien pääsuunnittelijana. Von Braunin johdolla tehtiin myös Saturnus V kantoraketti, joka vei ensimmäiset ihmiset kuuhan.

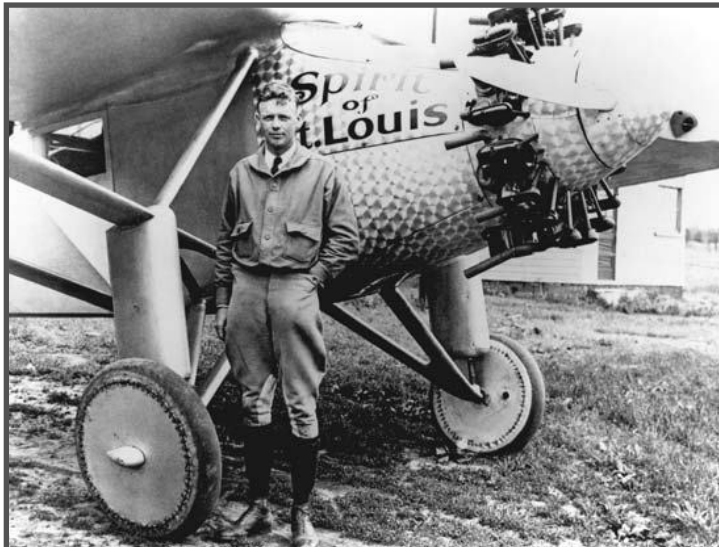
HYPERGOLISTEN AJOAINEIDEN KEHITTÄMINEN

Sana HYPERGOLINEN on USA:ssa keksitty sana ajoaineelle, jonka polttoainekomponentti yhdistyessään hapettajakomponenttiin sytty spontaanisti. Yksi tällainen ajoaineyhdistelmä tiedettiin jo varhain, nimittäin aniliini ja typpihappo. Typpihaposta yleisin muoto on RFNA mikä tarkoittaa Red Fuming Nitric Acid eli punainen sumuava typpihappo. RFNA on erittäin hankala hapetin, sillä se on äärimmäisen syövyttävä, ja lisäksi, kun sitä joutuu käsittelemään, se muodostaa erittäin myrkyllisiä NO₂-höyryjä ja iholle läikkyessään RFNA aiheuttaa vaikeita palovammoja.

Aniliini on melkein yhtä paha käsitellä. Jos sitä läikkyi iholle ja ellei sitä huuhtelee välittömästi pois, voi siitä tulla kuolemaan johtava myrkytystila. Vaikka aniliini-RFNA-yhdistelmän syttyvyys on hyvä, niin edellä mainittujen haittojen takia sen käytöstä on luovuttu.

Kokeissa, joita USA:ssa aikoinaan suoritettiin hypergolisten ajoaineiden löytämiseksi, käytettiin RFNA:n lisäksi myös WFNA:ta (White Fuming Nitric Acid, eli valkoinen sumuava typpihappo). Silloin tutkittiin monenlaisia polttoaineita, jotka hapetettiin RFNA:lla tai WFNA:lla. Näissä tutkimuksissa ilmeni, että monilla ajoaineyhdistelmillä syttyminen tapahtui hitaasti. Näytti siltä, että tietyllä ajoaineyhdistelmällä on tietty syttymisviive ja jos viive on suuri, jolloin syttyminen on hidasta, palaminen on erittäin epävakaa ns. Rough Combustion, jolloin palokaasut sisältävät paljon palamattomia jakeita ja moottori voi pahimmassa tapauksessa räjähtää.

Eri ajoaineyhdistelmistä joita kokeiltiin, mainittakoon aniliini-furfuraalialkoholi-typpihappoyhdistelmä siitä syystä, että muistaakseni *Pasi Pölonen* Joensuusta kokeili nesterakettimoottoria jossa ajoaineena oli furfuraalialkoholi-typpihappo. Hänen kokeensa ei tainnut onnistua ehkä siitä syystä, että pelkällä furfuraalialkoholi-typpihappoyhdistelmällä on niin suuri syttymisviive, ettei kyseinen ajoaineyhdistelmä toimi kunnolla rakettimoottorissa. USA:ssa huomattiin, että aniliinin (40-50%) lisäys furfuraalialkooliin pienensi syttymisviivettä niin paljon, että ko. yhdistelmän syttyvyys on hyvä.



Charles Augustus Lindbergh II (1902 - 1974) ja yksimoottorinen koneensa, jolla hän lensi 1927 Atlantin yli 33,5 tuntia kestäneellä lennolla. Library of Congress.

Kun USA:ssa edelleen tutkittiin asiaa, huomattiin, että yleensäkin tyydyttymättömät yhdisteet, kuten furaanit, aromaattiset amiinit ja etenkin tertiääriset amiinit olivat erittäin hyvin hypergolisia typpihapon kanssa. Sensijaan tyydytetyt yhdisteet ja alifaattiset alkoholit eivät olleet. Myös tietyt silaanit huomattiin hyvin hypergoliseksi typpihapon kanssa. Lentopetroolia JP 1 – JP 4 (Jet Propellant) sekä bensiiniä kokeiltiin typpihapon kanssa. Tällöin syttämiseen käytettiin hypergolista aloituskapselia. Joskus moottori toimi näillä ajoaineyhdistelmillä kauniisti, mutta usein moottori "yski" eli paloi epätasaisesti, huusi (Screaming) ja harmillisen usein se myös räjähti kappaleiksi. Siirtymävaihe, jolloin sytytyskapselista siirrytään varsinaiseen polttoaineeseen oli huono, josta syystä seurauksena oli edellä mainitut ongelmat

Monenlaisia polttoaineita tutkittiin. Tällöin käytettiin ajoaineesta riippuen joko hypergolista alotuspanosta tai sitten menttiin ilman sitä. Ja lopulta alettiin tutkia hydratsiiniä N₂H₄. Huomattiin, että hydratsiini on typpihapon kuin myös typpitetraoksidin N₂O₄ kanssa ihanteellinen polttoaine. Syttyminen oli hypergolinen ja nopea, palaminen hyvin tasaisista (Smooth Combustion) ja muutenkin moottori toimi erittäin hyvin. Ainoa hydratsiinin haitta oli sen jähmettymispiste -1,5 °C, joka on liian korkea, jotta sitä voitaisiin käyttää taktisissa ohjuksissa. Tähän ongelmaan löydettiin ratkaisu, sillä huomattiin, että monometyylihydratsidin (MMH) jähmettymispiste on -52,4 °C ja ei-symmetrisen dimetyylihydratsidin (UDMH) jähmettymispiste on -57,2 °C. Hydratsiinin kemiallinen kaava on N₂H₄ ja monometyylihydratsidissa on yksi vetyatomi korvattu metyyliiryhmällä -CH₃, joten MMH:n kaava on CH₃N₂H₃ ja dimetyylihydratsidissa on kaksi vetyatomia korvattu metyyliiryhmällä, joten sen

kaava on N₂H₂(CH₃)₂.

Näin oli löydetty hyvät hypergoliset ajoaineyhdistelmät. Sekoittamalla hydratsiinia UDMH:n ja MMH:n kanssa tai käyttämällä näitä yksin saatiin hyviä hypergolisia polttoaineita sekä typpihapon että N₂O₄:n kanssa. Näistä mainittakoon MHF-5 (Mixed Hydrazine Fuel 5) tai Hydene, Aerozine-50 (50% N₂H₄ ja 50 % UDMH) tai Hydrazoid N tai U- Deta jne.

Hydratsiinia tai hydratsiiniyhdisteitä on käytetty mm. Titan II-kantoraketeissa, joka vei miehityt Gemini- alukset kierto-radalle, Apollo kuuohjelmassa mm. kuumoduuleissa sekä huoltomuuleissa. Sitä käytetään mm. Avaruussukkulan rataohjausmoottoreissa. Hydratsiiniyhdisteillä on nykyäänkin hyvin laaja käyttö.

RFNA

Lähinnä taktisiin ohjuksiin hapettajaksi tarkoitettu RFNA on ihanteellinen hapettaja siitä syystä, että sen tiheys on yli 1,5 kertaa veden tiheys ja se on normaaliämpötilassa neste. Puhtaalla RFNA:lla oli kaksi ongelmaa, jotka piti ratkaista ennen sen laajempaa käyttöönottoa. Ensimmäinen pulma oli se, että RFNA hajoaa itsestään seuraavan reaktion mukaisesti:



Jos laitetaan 100% typpihappoa johonkin säiliöön, se hajoaa siellä edellisen kaavan mukaan, jolloin säiliön kaasutilaan syntyy jatkuvasti kasvava paine, joka jonkin ajan kuluttua rikkoo säiliön.

Edellä oleva kemiallinen reaktio menee kumpaankin suuntaan, siis sekä vasemmalta oikealle että oikealta vasemmalle. Lisäämällä yhtälön oikealla puolella olevia reaktiotuotteita, vettä ja N_2O_4 :ää HNO_3 :een saadaan hajoamisreaktio estetyksi. On käytetty seoksia $\text{HNO}_3 + 23\% \text{N}_2\text{O}_4 + 2\% \text{H}_2\text{O}$, jonka lyhenne on SFNA (Stable Fuming Nitric Acid) eli vakaa sumuava typpihappo.

Toinen ongelma oli typpihapon aiheuttama voimakas korroosio. Sitä ei näyttänyt mikään metalli kestävä. Keksittiin, että lisäämällä fluorivetyä HF tai ammoniumbifluoridia NH_4F HF (tai NH_4HF_2), siis sellaista yhdistettä, jossa on F-ioni, saadaan typpihapon aiheuttama voimakas korroosio estetyksi. Fluori-ioni muodostaa typpihapposäiliön pinnalle korroosiota kestävä metallifluoridin. On käytetty seoksia, jotka sisältävät 0,6 % HF:ää ja tällöin korroosio estyy kokonaan.

Näillä keinoin typpihapon käytössä ilmenneet ongelmat saatiin ratkaistua ja ajoineyhdistelmillä hydratsiini, MMH, UDMH ja niiden seoksilla yhdessä IRFNA:n kanssa tuli erinomaisia, kaikki vaatimukset täyttäviä hypergolisia ajoaineita taktisiin ohjuksiin. IRFNA tarkoittaa Inhibited Red Fuming Nitric Acid = estetty punainen sumuava typpihappo. Inhibitointi suoritetaan siis HF:llä tai ammoniumbifluoridilla.

Lähinnä kantoraketteihin ja avaruudessa tapahtuviin operaatioihin käytetään yleisesti hapettajana dityppitetroksidia N_2O_4 . Sen ominaispaino on hyvin korkea, noin 1,5 kertaa veden ominaispaino ja sen ominaisimpulssi hydratsiiniyhdisteiden kanssa on hieman parempi kuin IRFNA:n. Sen haittana on kapea lämpötila-alue, jossa se on nesteenä. Sen jäätymispiste on vain -11 astetta Celsiusta. Yleensä dityppitetroksidia käytetään sellaisenaan, mutta ainakin vanhemmissa Ariane-raketeissa käytettiin dityppitetroksidia, johon oli jähmettymispisteen alentamiseksi sekoitettu jonkin verran NO :ta eli typpioksidia. Tästä hapetta-

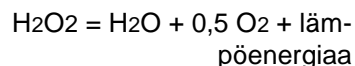
jayhdistelmästä on käytetty nimeä MON, joka tarkoittaa Mixed Oksides Of Nitrogen eli typen oksidien seos.

VETYPEROKSIDI, HAPETTAJA JOKA HYLÄTTIIN

Vetyperoksidista ei ole tullut yleisesti käytettävää hapettajaa ainakaan vielä. Se ei johtunut siitä, etteikö sitä kohti olisi tunnettu kiinnostusta – siitä oltiin kiinnostuneita sekä USA:ssa että varsinkin Englannissa, sekä monissa muissa maissa. Sen ominaisuudet useimpien polttoainesten kanssa ovat aika lähellä typpihapon vastaavia ominaisuuksia. Myös vetyperoksidin tiheys on lähellä typpihappoa ja nopeasti tarkasteltuna se onkin ylivoimainen hapetin. Ensinnäkin siitä ei synny myrkyllisiä höyryjä ja jos sitä läikkyä iholle, se ei aiheuta vakavia vammoja, kunhan sen huuhtelee heti vedellä pois. Yksi hyvä puoli on, että se ei syövytä metalleja kuten typpihappo.

Mutta (ajoainepuolella on paljon "muttia") sen jäätymispiste on vain $-0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (100 % H_2O_2). Jos siihen sekoittaa vettä niin, että peroksidiprosentiksi tulee 85 – 90 %, sen jäätymispiste alenee jonkin verran, mutta on aina tietenkin huono asia lisätä inerttiä nestettä (H_2O) ajoaineeseen.

Vetyperoksidi hajoaa seuraavan kaavan mukaan:



Hajoamisreaktio on siis ekso-terminen. Jos meillä on suljetussa tankissa vetyperoksidia ja se alkaa hajota, niin siitä vapautuva lämpö kiihdyttää hajoamista, josta seuraa, että peroksidi hajoaa yhä nopeammin, jolloin koko säiliö ennemmin tai myöhemmin räjähtää. Monet seikat voivat aloittaa hajoamisreaktion: näitä ovat esimerkiksi transitiometallit Fe, Co sekä Cu ja Ag ja monet muut sekä niiden seokset. Lisäksi vielä

hajoamista aiheuttavat tavallinen lika ja OH- ionit.

Tietyt aineet, kuten stannaatit ja fosfaatit heikentävät hieman vetyperoksidin hajoamista. Näidenkään käyttö ei ole hyvä keino hajoamisen estämiseksi. Ainoa keino jollain tavoin hillitä vetyperoksidin hajoamista on tehdä sen säiliö jostain metallista, joka ei aiheuta siinä hajoamisreaktiota. Puhdas alumiini on osoittautunut parhaaksi tässä suhteessa. Lisäksi peroksidi on pidettävä ehdottoman puhtaana. Kaikesta huolimatta peroksidi hajoaa hiljalleen. Tämän ongelman takia useat tahot menettivät kiinnostuksensa peroksidiin.

Englannissa sekä USA:ssa kokeiltiin peroksidia monien polttoainesten, kuten metanolin, kerosiinin, hydratsiinin ja etyleenidiamiinin kanssa. Tiedettiin, että vain hydratsiini on hypergolista peroksidin kanssa ja muiden polttoainesten kanssa käytettiin hypergolista aloituskapselia tai



Dr. Eugen Sänger (1905 - 1964) tulevan vaimonsa, matemaatikko Irene Bredtin (1911 - 1983) kanssa toisen maailmansodanaikaisessa laboratoriossa Trauenissa.

pyroteknistä sytytintä. Yleisesti ottaen nämä polttokokeet onnistuivat kohtalaisesti. Mainittakoon tässä yhteydessä että briteillä oli toisen maailmansodan loppuvaiheessa ja sen jälkeen kokeiltavana rakettilentokone, jossa hapettajana oli peroksidi. Tämä hävittäjälentokone toimi melkoisen hyvin kokeissa. Britit olisivat jopa voineet lentää sillä avaruuden rajoille ennen amerikkalaista X-15 rakettilentokonetta, mutta jostain syystä britit luopuivat em. rakettkoneesta. Joka tapauksessa peroksidin jähmettymispiste oli monien tahojen, etenkin laivaston mielestä liian korkea. Etsittiin monia yhdisteitä, joita peroksidiin lisäämällä alentaisivat sen jähmettymispistettä. Kuitenkaan mitään vakavasti otettavaa jähmettymispisteen alentajaa ei löytynyt.

Laivasto halusi alun perin H_2O_2 :n hapettejaksi sen alussa mainittujen hyvien ominaisuuksien takia ennen kun ilmeni nämä edellä mainitut ongelmat: hajoaminen ja korkea jäätymispiste, sekä ehdoton puhtausvaatimus. Mitä, jos ristelijässä on H_2O_2 :ta ja se saa kloridi-ioneja merivedestä, mikä varmasti merellä on väistämätöntä. Huomattiin nimittäin, että kloridit, joita merivedessä on, aiheuttavat vetyperoksidin kanssa alumiinin voimakkaan korroosion. Siis, jos taistelulaivassa on vetyperoksidiä alumiinisäiliössä ja se saa kloridia merivedestä, alumiinisäiliö syöpy nopeasti puhki, jolloin vetyperoksidi pääsee vuotamaan säiliöstä laivaan. Tuloksena on voimakas tulipalo ja ehkä koko taistelulaivan tuho. Niinpä monet amiraalit totesivatkin: "Ei vetyperoksidiä ainakaan minun laivaani".

Näiden negatiivisten ominaisuuksiensa takia vetyperoksidi hylättiin ja sen sijaan käytettiin IRFNA:ta yhdessä hydratsiinin tai hydratsiiniyhdisteiden kanssa.

HALOGEENIT JA ULKOAVARUUS

Halogeeneja hapettimena alettiin tutkia USA:ssa 40-luvun puolivälistä lähtien. Siihen aikaan tunnettiin yhdiste OF_2 . Sen kiehumispiste on niin alhainen, että sitä voidaan pitää kryogeenisenä. Sen jälkeen kehitettiin monia yhdisteitä, kuten O_2F_2 , NF_3 , ONF ja O_2NF . Fluorinitraatti FNO_3 ja fluoriperklooraatti $FCIO_4$ tunnettiin hyvin. Jälkimmäisestä tiedettiin, että se melkein aina räjähti joko lämmitettäessä tai jäädytettäessä, jäätyessään tai sulaessaan, höyrystyessään tai nesteytyessään ja usein se räjähti myös ilman mitään erillistä syytä.

Ensin alettiin vakavasti tutkia ClF_3 :a. Tämä klooritrifluoridi on väritön kaasu, vihertävä nesteenä ja valkoinen kiinteänä. Se kiehuu $+12\text{ }^\circ\text{C}$ ja jäätyy $-76\text{ }^\circ\text{C}$. Sillä on hyvä tiheys - ominaispaino on 1,81 huoneen lämmössä.

ClF_3 :n ominaisuudet raketthapettajana ovat hyvät. Vaikkakin se on äärimmäisen myrkyllistä, se on hypergolinen lähes kaikkien tunnettujen polttoaineiden kanssa. Se on niin nopean hypergolinen, ettei sen syttymisviivettä kyetty mittaamaan. Se on hypergolinen niin vaatteen, puun, tietenkin ihon sekä asbestin, soran ja veden kanssa. Kontaktista seuraa räjähdys. ClF_3 :a voi säilyttää tavallisesta metallista, kuten teräksestä, kuparista ja alumiinista jne. tehdystä säiliössä, koska se muodostaa metallin pinnalle suojaavan metallifluoridikalvon.

Yleensäkin ClF_3 :a hapettajana käytettäessä rakettimoottorit onnistuivat hyvin. Syttyminen oli ihanteellinen (pehmeä). Ominaisimpulssi oli hyvin lähellä teoreettisia laskelmia. ClF_3 :n käsittelyyn käytetyt putkistot ja säiliöt ym. on oltava erittäin puhtaat. Mitään likaa, rasvaa tai kumisia tiivistysrenkaita ei saanut olla ClF_3 :n ajoainesysteemeissä. Tiivisteiden ja O-renkaiden tuli olla metallia.



Wernher von Braun (1912 – 1977) tv-lähetystä tekemässä. Nasa

Klooritrifluoridia hapettajana käytettäessä moottorin lämpötila on lähellä $4000\text{ }^\circ\text{C}$. Se asettaa erikoisvaatimukset injektorille ja moottorille. Suuttimen kurkku on hyvin kriittinen alue.

Jos käytetään hiiltä sisältävää polttoainetta ClF_3 : kanssa, esimerkiksi MMH:ta tai UDMH:ta, on seokseen pakko lisätä happea niin, että palamistulokset ovat CO , HCl ja HF .

Kaikenlaisia kloorin, fluorin, hapen ja typen yhdisteitä kehitettiin. Näistä mainittakoon ClO_2F eli kloryylifluoridi. Sen ominaispaino huoneenlämmössä on aika pieni, nimittäin 1,411 verrattuna ClF_3 :n (kloorotrifluoridi) 1,809:n. Koska kloryylifluoridin kriittinen lämpötila on $95\text{ }^\circ\text{C}$, sillä on hyvin suuri tilavuuden lämpötilakerroin. Sen tilavuus kasvaa 20 %, kun lämpötila nousee $25\text{ }^\circ\text{C}$:sta $71\text{ }^\circ\text{C}$:een, joten hapettajatankin tilavuus täytyy olla ylimitoitettu. Kloryylifluoridia voidaan sekoittaa esim. ClF_3 :een, jolloin seoksessa on happea polttamaan polttoaineen hiili CO :ksi. Se lieneekin tulevaisuudessa ClO_2F :n pääasiallinen käyttötarkoitus.

Fluorin ja typen yhdiste N_2F_4 on myös lupaava hapettaja. Se on epäilemättä erittäin hyvät suoritusarvot antava hapetin (a High-performance Oxidizer). Se on suhteellisen helppo käsiteltävä. Sillä voi olla jotain käyttöä ulkoavaruudessa. Esimerkiksi Saturnuksen kiertoradalla ajoaineen pitää säilyä nesteenä vuosia ennen käyttöä. Ja vaikka avaruuden tyhjiö takaisi hyvän lämpöeristeen hapettajatankille, nestehappi haihtuisi tuona aikana tankista ja N_2O_4 luultavasti jäätyisi kiinteäksi. Sen sijaan N_2F_4 säilyisi nesteenä tankissa tämän ajan.

Halogeenihapettajia kehitettiin edelleen. ONF_3 eli typpioksidetrifluoridia ja OIF_3 :a tutkittiin. ONF_3 :lla on hyvät ominaisuudet. Sen kiehumispiste on $-87,5\text{ }^\circ\text{C}$ ja sen tiheys tässä lämpötilassa on 1,547. Se ei ole metalleja syövyttävää ja sen käsittely on helppoa. ONF_3 :lla on myös hyvät

suoritusarvot, melkein samanlaiset kuin N2F4:llä ja siitä lienee tulevaisuudessa hyötyä ulkoavaruuden tehtävissä.

Avaruuden tyhjiössä toimivat rakettimoottorit suunnitellaan yleensä siten, että polttokammiossa paine on melko alhainen noin 150 psia (10,2 bar absol.) ja tästä syystä tarvitaan vähemmän energiaa ajoaineiden syöttämiseen moottoriin. Merenpinnan tasolla (paine on noin 1,0 bar absol.) toimivien moottoreiden polttokammio paine on noin 1000 psia:n (n. 68 bar absol.) paikkeilla ja korkeapaineisessa ajoainesyötössä nykyisin yli 2500 psia (lähes 200 bar). Koska avaruuden olosuhteissa voidaan käyttää alhaista injektio painetta, jotkut näistä "avaruudessa varastoitavista" ajoaineista ovat aivan omaa luokkaansa. Kun avaruuden olosuhteissa tulee aika käyttää niitä, voidaan käyttää heikkotehoista energianlähdettä esimerkiksi pientä sähköllä lämmitettävää käämiä, tai muuta vastaavaa, lämmittämään kyseinen ajoainekomponentti sellaiseen lämpötilaan, jossa niiden höyrönpaine on sopivasti alhaisen polttokammio paineen yläpuolella eli injektio paineeseen. Dityypitetrafluoridi N2F4, typpioksitrifluoridi (nitryl fluoride) FNO2 ovat erikoisen sopivia tähän tarkoitukseen.

On hyvä idea valita hapettaja-polttoaine-pari siten, että niillä on samantapainen lämpötila-alue, jossa ne ovat nesteinä. Jos ne säilytetään avaruudessa lähekkäin tehtävää varten, joka kestää useita kuukausia, ajoainekomponenttien lämpötilat mahdollisesta eristyksestä huolimatta lähenevät toisiaan. Ja jos lämpötila, johon molemmat ajoainekomponentit päätyvät, on sellainen, että toinen komponentti on nesteinä ja toinen on kiinteä, on tiedossa vaikeuksia niiden käyttöhetkellä. Jos käytetään itsepainestavaa systeemiä (ajoaineen höyrönpainetta käytetään painestamiseen), on hyvä, jos molemmilla ajoainekomponenteilla on suht samanlainen höyrönpaine käyttölämpötilassa. Esimerkiksi, jos suunnittelija päättää käyttää hapettimena ONF3:a, jonka kiehumispiste on $-87,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, on etaani (kiehumispiste $-88,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) hyvä ratkaisu polttoaineeksi.

Varsinkin NASA oli aikoinaan keskittynyt tutkimaan OF2-hapetinta. Kokeet osoittivat, että kaikki hiilivedyt olivat hyviä polttoaineita sen kanssa, mutta metaani oli kaikkia muita luokkaa ylempänä, mitä tuli moottorin jäähdytykseen tapahtuipa se sitten joko transpiraatio- tai rege-

neratiivisella menetelmällä. OF2 – metaani- yhdistelmä näytti erittäin lupaavalta. Halogeenihapettajia tutkittiin edelleen intensiivisesti 60-luvulla ja kehitettiin hapettaja CIF5, joka on CIF3:n kaltainen, mutta sen ominaisimpulssi polttoaineiden kanssa on 20 s korkeampi kuin CIF3:n + vastaava polttoaine. CIF5:n kiehumispiste on $-13,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja sen ominaispaino on 1,735, kun lämpötila on $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. kaikki se tekniikka, mikä oli kehitetty CIF3:n käsittelyä varten, päti myös CIF5:n kanssa.

Aikoinaan tehtiin paljon työtä, jossa räätälöitiin hapettaja tiettyä polttoainetta varten. Tässä mainittakoon seos nimeltä "Triflox". Se on CIF3:n, FCIO3:n ja N2F4:n seos. Yksi tutkituista seoksista sai nimen "Halox". Se on CIF3:n ja FCIO3:n seos. CIF5:n ja FCIO3:n seosta suunniteltiin polttamaan MMH:ta eli monometyylhydratsiinia.

Lopuksi voidaan todeta, että halogeenit ja niiden happi- ja typpiyhdisteet ovat oivallisia ulkoavaruudessa tehtäviä operaatioita varten. Ensinnäkin niiden sisältämä fluori estää hapettajasäiliön korroosion. Toiseksi, ne ovat kaikki erittäin hyvin hypergolisia, toisin sanoen ajoaineen syttyvyys on hyvä eli syttymisviive on lähes olematon. Tästä myös seuraa, että palamisprosessi on hyvin nopea, joten rakettimoottorissa voidaan käyttää pienikokoista polttokammia. Syttyminen ja palaminen ovat hyvin pehmeitä ("soft combustion"). Lisäksi ne säilyvät nesteinä avaruuden olosuhteissa omissa säiliöissään kuukausikaupalla.

Kaikkien näiden hyvien ominaisuuksiensa ansiosta niillä lienee tulevaisuudessa (nykyään?) laajalti käyttöä ulkoavaruuden operaatioissa.

□

Tämä kirjoitus pohjautuu kirjaan *Ignition!: An informal history of liquid rocket propellants*, John D Clark, 232 pp., Rutgers University, USA 1972.

