



UNIVERSITY OF  
EASTERN FINLAND

# Liekkikokeet perinteisesti ja virtuaalisesti osana lukion kemian opetusta

Pasi Ranta

Pro gradu -tutkielma

Kemian laitos

Materiaalikemia

702/2022

# LIEKKIKOKEET PERINTEISESTI JA VIRTUAALISESTI OSANA LUKION KEMIAN OPETUSTA

Ranta, Pasi Antero

Ohjaajat: Professori Mika Suvanto, dosentti Leila Alvila ja dosentti Kari Sormunen

Itä-Suomen yliopisto, Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta

Kemian laitos, kemian aineenopettajan koulutusohjelma

Helmikuu 2022

## TIIVISTELMÄ

Opiskelijat muistavat kemian opetuksessa tehtävät liekkikokeet menetelmien kannalta, mutta alkuaineen kvalitatiivisen tunnistamisen yhteys atomin rakenteeseen jää usein vähemmälle huomiolle. Liekkikokeessa tutkittava aine höyrystetään liekissä kaasumaiseen tilaan, jolloin atomeissa tapahtuu elektronien virittymistä korkeammille energiatasoille. Virittymisen purkautuessa elektroni siirtyy alemmille energiatasoille ja näiden siirtymien väliset energiaerot voidaan havaita atomin emittoiman sähkömagneettisen säteilyn avulla. Kun säteily on näkyvän valon aallonpituusalueella, voidaan aine tunnistaa visuaalisesti. Alkali- ja maa-alkalimetallit sekä kupari ovat opetuskäytössä toimivia liekkikokeessa tunnistettavia aineita.

Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019 ehdottaa liekkikokeita tutkimisen taidoksi kaikille pakollisessa Kemia ja minä -moduulissa KE1, missä voidaan käsitellä teoriaopetuksessa Bohrin atomimallia ja energiatasokaavioita. Molekyylit ja mallit -moduulissa KE3 mukaan voidaan tuoda kvanttimekaaninen atomimalli, jonka avulla voidaan energiatasokaaviossa käsitellä myös monielektronisia atomeja. Aineiden yksilölliset emissiospektrit on hyvä esittää viivaspektreinä. Aihealueessa on myös mahdollisuus muodostaa yhteyksiä fysiikan Sähkömagnetismi ja valo -moduuliin FY7 sekä Aine, säteily ja kvantittuminen -moduuliin FY8.

Menetelmiä liekkikokeiden suorittamiseen on kehitelty kymmenittäin. Teknologian kehitys on mahdollistanut tehdä liekkikokeita laboratoriotiloja simuloivassa virtuaalisessa todellisuudessa. Virtuaalisia simulaatioita on useita, joista eräs on Hololab Champions -ohjelmiston klassista liekkikokeita mukaileva työ. Se soveltuu käytettäväksi lukiotason opetuksessa, mutta ei itsessään sisällä liekkikokeita avaavaa teoreettista runkoa. Kun todellisia liekkikokeita ei ole mahdollista tehdä tai tarvitaan lisäharjoittelua, niin virtuaalinen liekkikoe Hololab Champions -ohjelmistolla on hyvä vaihtoehto käytännön työn simulointiin.

**Asiasanat:** liekkikoe, lukio, kemian opetus, virtuaalinen todellisuus

# FLAME TESTS TRADITIONALLY AND VIRTUALLY AS PART OF HIGH SCHOOL CHEMISTRY TEACHING

Ranta, Pasi Antero

Supervisors: Professor Mika Suvanto, docent Leila Alvila and docent Kari Sormunen

University of Eastern Finland, Faculty of Science and Forestry  
Department of Chemistry, Chemistry Teacher Education Program  
February 2022

## ABSTRACT

Students often remember flame tests performed in the teaching of chemistry, but theory behind practical work does not always make necessary connections to understand structure of an atom. In a flame test, the substance is vaporized in a hot flame. Heat of the flame excites an electron, and the atom is in higher state of energy. When excited electron returns to original state, atom emits a photon. If the wavelength of the photon is in the range of visible light, color can be observed. Alkaline and alkaline earth metals as well copper are visually identifiable substances in flame tests.

The core curriculum for high school education suggests flame tests as research skill in compulsory KE1 module, where the Bohr model of the atom and energy level diagrams can be implemented in teaching. In the KE3 module, a quantum mechanical model can be introduced with energy level diagram to better visualize and present excited multielectron atoms. Useful way to produce easily distinguishable atomic emission spectrums is utilization of atom specific line spectra. Using this theoretical content, it is also possible to make connections with physics, especially in FY7 and FY8 modules.

Several dozen methods for performing flame tests have been published and suitable test for the situation can be found in the literature. Advances in technology have made it possible to conduct flame tests in a virtual reality that simulates laboratory facilities. Several virtual laboratory simulations are available, one of which is Hololab Champions software that contains wide range of laboratory simulations from which one practical work is classical flame test named Identiflame. The software is suitable to use in teaching in high school, although it does not contain necessary theoretical content to understand chemistry of flame tests. When it is not possible to do real flame tests or in need of additional practice then a virtual flame test with Hololab Champions software is a good alternative to simulate hands-on work.

**Keywords:** flame test, high school, chemistry education, virtual reality

# SISÄLLYS

LYHENTEET.....	4
1. JOHDANTO .....	5
2. LIEKKIKOKEIDEN TEOREETTISTA TAUSTAA.....	6
2.1 BOHRIN ATOMIMALLI LIEKKIKOKEISSA .....	7
2.2 ENERGIATASOKAAVIO .....	9
2.3 EMISSIOSPEKTRI.....	10
3. LIEKKIKOKEET KEMIAN OPETUKSESSA .....	12
4. PERINTEISET LIEKKIKOKEET .....	13
4.1 KLASSISEN LIEKKIKOKEEN SUORITUS .....	14
4.2 LIEKKITESTEJÄ PALAVIEN LIUOTTIMIEN AVULLA .....	15
4.3 PAPERIN AVULLA TEHTÄVÄT LIEKKIKOKEET .....	17
5. VIRTUAALISET LIEKKIKOKEET .....	18
5.1 HOLOLAB CHAMPIONS JA VIRTUAALINEN LIEKKIKOE.....	19
5.2 VIRTUAALISEN JA TODELLISEN LIEKKIKOKEEN VERTAILU .....	22
6. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	24
KIITOKSET .....	26
VIITTEET .....	27

## LYHENTEET

FY7	Sähkömagnetismi ja valo -moduuli
FY8	Aine, säteily ja kvantittuminen -moduuli
KE1	Kemia ja minä -moduuli
KE3	Molekyylit ja mallit -moduuli
LOPS19	Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019
VR	Virtuaalinen todellisuus

# 1. JOHDANTO

Kemian opetuksessa käytetyt opettajan demonstraatiot sekä opiskelijoiden itse tekemät työt sisältävät usein liekkikokeita. Liekkikokeet ovat parhaimmillaan näyttäviä ja mielenkiintoa herättäviä käytännön kokeita, mutta monesti näyttävyyden on ainoa mieleen jäävä asia opetuksesta. Opiskelijat jälkikäteen muistavat tehneensä tai nähneensä liekkikokeita, mutta ymmärrys liekkikokeiden sisältämän kemian teoreettisesta taustasta saattaa jäädä vähäiseksi.<sup>1</sup> Lukion opetussuunnitelman perusteissa 2019 (LOPS19) liekkikoe on ehdotettuna tutkimusmenetelmänä kaikille pakollisena olevassa KE1-moduulissa<sup>2</sup>. Sitä voidaan käyttää lisäämään ymmärrystä atomin rakenteesta, varsinkin tämän moduulin elektronikuorimallin käsittelyssä. Yhdistettynä Bohrin atomimallin perusolettamuksiin, energiatasokaavioon ja emissiospektriin saadaan liekkikokeiden makrotason näköhavainnosta kvanttitasoon syventyvä kokonaisuus.

Erilaisia tapoja tehdä ja hyödyntää liekkikokeita opetuksessa löytyy kymmenittäin<sup>3–33</sup>. Menetelmät kuitenkin seuraavat samaa ydinasetelmaa, missä silmillä nähtävän sähkömagneettisen säteilyn aallonpituudelle sijoittuvan värillisen liekkireaktion avulla tunnistetaan kvalitatiivisesti erilaisia alkuaineita. Tunnistettavimmat liekit muodostuvat maa-alkali- ja alkalimetalleista sekä muutamista metalleista.<sup>34</sup> Yksinkertaisimmillaan liekkikoe tehdään sytyttämällä petrimaljassa oleva metanoli, johon on lisätty tutkittavaa ainetta<sup>13</sup>. Liekkikokeita varten voidaan myös rakentaa laitteisto, missä tutkittavaa näyteliuosta sumutetaan liekkiin ja liekin väri kuvataan optisella kuidulla spektrometrin kautta tietokoneelle tarkemmin analysoitavaksi<sup>29</sup>. Klassinen tapa suorittaa liekkireaktio on kasta platina- tai nikkeli-kromilanka konsentroidussa suolahapossa ja käyttää kastettua lankaa tutkittavassa kuivassa aineessa. Lankaan tarttunut aine viedään bunsenliekin uloimpaan osaan. Muodostuneet kloridiyhdisteet ovat helposti haihtuvia ja mahdollinen väri näkyy liekissä.<sup>34</sup>

Liekin lähteenä on käytetty useita eri polttoaineita, kuten alkoholeja ja nestekaasua. Liekitettäviä näyteliuoksia on imeytetty puutikkuihin<sup>33</sup>, asbestikuituihin<sup>7</sup>, paperiin<sup>6,8,9,14</sup>, ihmesieneen (melamiinihartsin)<sup>27</sup>, huokoiseen tulitiileen<sup>32</sup> ja vanupuikkoihin<sup>21,22</sup>. Liekkireaktio on saatu aikaiseksi yhdistämällä tutkittavaa ainetta nitroselluloosaan<sup>12</sup> ja ruutiin<sup>10</sup>. Vedyllä täytettyjä ja räjäytettyjä ilmapalloja on käytetty kahdella tapaa; lisäämällä pallon sisään muutamia grammoja metallisuolaa ennen täyttöä tai sumuttamalla täytetyn pallon pinnalle metallisuolaliuosta<sup>25</sup>.

Materiaalikustannukset, käytettävyys ja näyttävyyden ovat olleet osallisena menetelmien kehittämisessä, mutta monia liekkikokeita ei välttämättä kannata käyttää opetuksessa aineiden tai menetelmän vaarallisuuden takia. Liekkikokeen korkeat lämpötilat sekä kaasumaiset yhdisteet aiheuttavat sen, että työturvallisuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Yhdysvalloissa kouluissa ja ulkotapahtumapaikoilla on vuosien 1998–2017 aikana raportoitu 32 liuottimien, etenkin metanolin palamiseen liittyvää tapaturmaa, joissa vahingoittui 164 ihmistä. Tapauksista 20 on yhdistetty liekkikokeisiin.<sup>35</sup>

Menetelmä klassisen liekkikokeen suorittamiseen on yksinkertainen, mutta kaikissa kouluissa ei välttämättä ole asianmukaisia varusteita kemian käytännön töiden tekemiseen. Liekkikokeet

saattavat myös olla tekijästä ja menetelmästä riippuen vaikeasti tulkittavia. Opiskelijoiden tekemät käytännön harjoitukset ovat tärkeitä kemian teorian sisäistämiseksi, mutta aina ei välttämättä ole tarpeellisia henkilöstöresursseja sujuvan ja turvallisen työskentelyn takaamiseksi. Näissä ja muissakin tapauksissa voidaan hyödyntää uusinta teknologiaa ja käyttää tietokoneen simuloimaa virtuaalisen todellisuuden (VR) ympäristöä opetuksen tukena. Esimerkki tämäntyyppisestä VR-ympäristöstä on vuonna 2018 julkaistu Hololab Champions<sup>36</sup>. Se on valmistettu Pennsylvanian Pittsburghissa opetus- ja viihdepeleihin keskittyvässä Schell Games -yhtiössä sekä osittain rahoitettu ja kehitetty Yhdysvaltojen kasvatustieteiden instituution kanssa<sup>37</sup>. Ohjelmiston avulla opiskelija voi harjoitella käytännön laboriotyöskentelyä turvallisesti kolmiulotteisessa VR-tilassa. Tässä tutkielmassa käsitellään lopuksi Hololab Champions -ohjelmiston soveltuvuutta opetuskäyttöön ja fokus on liekkikokeiden suorittamisessa. Ohjelmisto on sen tekijöiden mukaan suunnattu opintoasteille, jotka vastaavat suomalaisen peruskoulun 7.–9. luokkia ja lukio-opetusta. Tätä kirjoitettaessa ohjelmiston voi hankkia opetuskäyttöön ilmaiseksi.

## 2. LIEKKIKOKEIDEN TEOREETTISTA TAUSTAA

Liekkikokeet perustuvat liekin lämpöenergian avulla viritettyjen atomien lähettämän tunnistettavan liekkivärin havaitsemiseen. Liekkivärit ovat atomikohtaisia. Tunnistettavat alkuaineet ovat yhdisteinä, pääosin metallisuoloina, jotka höyrystetään liekin avulla kaasumaiseen tilaan. Paras anioni metallille on kloridi, koska kloridisuolat ovat helposti höyrystyviä ja kloori ei juurikaan häiritse liekin väriä. Kuvassa 1 on Itä-Suomen yliopiston kemian laitoksen TopLab -opetuslaboratoriossa kvalitatiivisen analyysin yhteydessä käytettyjä kloridisuoloja. Kaasumaisessa tilassa sopivan korkeassa lämpötilassa yhdisteen atomit virittyvät ja emittoivat sähkömagneettista säteilyä palatessaan perusenergiatasolle. Kun säteily on näkyvän valon aallonpituudella, liekki värjäytyy. Vaikka tunnistettavat partikkelit ovat ioneja, niin tämän hetkisen ymmärryksen mukaan on tarkempaa puhua atomeista, kun käsitellään liekissä tapahtuvia prosesseja.<sup>1,38–41</sup>



**Kuva 1.** Itä-Suomen yliopiston kemian laitoksen TopLab -opetuslaboratorion kvalitatiivisen analyysin vertailussa käytettäviä liekkikoesuoloja, nikkeli-kromilanka ja tunnistamisen apuna käytettävä koboltilasi.

Vain osasta alkuaineista saadaan tunnistettava värillinen liekki. Muiden aineiden sähkömagneettisen intensiteetiltään vahvimman säteilyn spektri on joko näkyvän valon ulkopuolella tai väriliikki on vaikeaselkoinen. Suurimmalla osalla jaksollisen järjestelmän 1 ja 2 ryhmien alkalimetalleilla ja maa-alkalimetalleilla on tunnistettavia värejä. Näiden s-lohkon aineiden ulkokuoren elektronit virittyvät helposti ja väri on vaivatta havaittavissa. Siirtymämetalleista kuparin emissiospektri on myös intensiteetiltään vahva ja helposti silmillä havaittavissa olevilla aallonpituusalueilla.<sup>38-41</sup> Seuraavaksi käydään läpi tarkemmin liekkikokeiden ymmärtämistä lisäävää teoreettista runkoa, joka sisältää Bohrin atomimallin perusolettamuksia, energiatasokaavioita ja emissiospektrin sekä energian kvantittumista aihealueen raameissa.

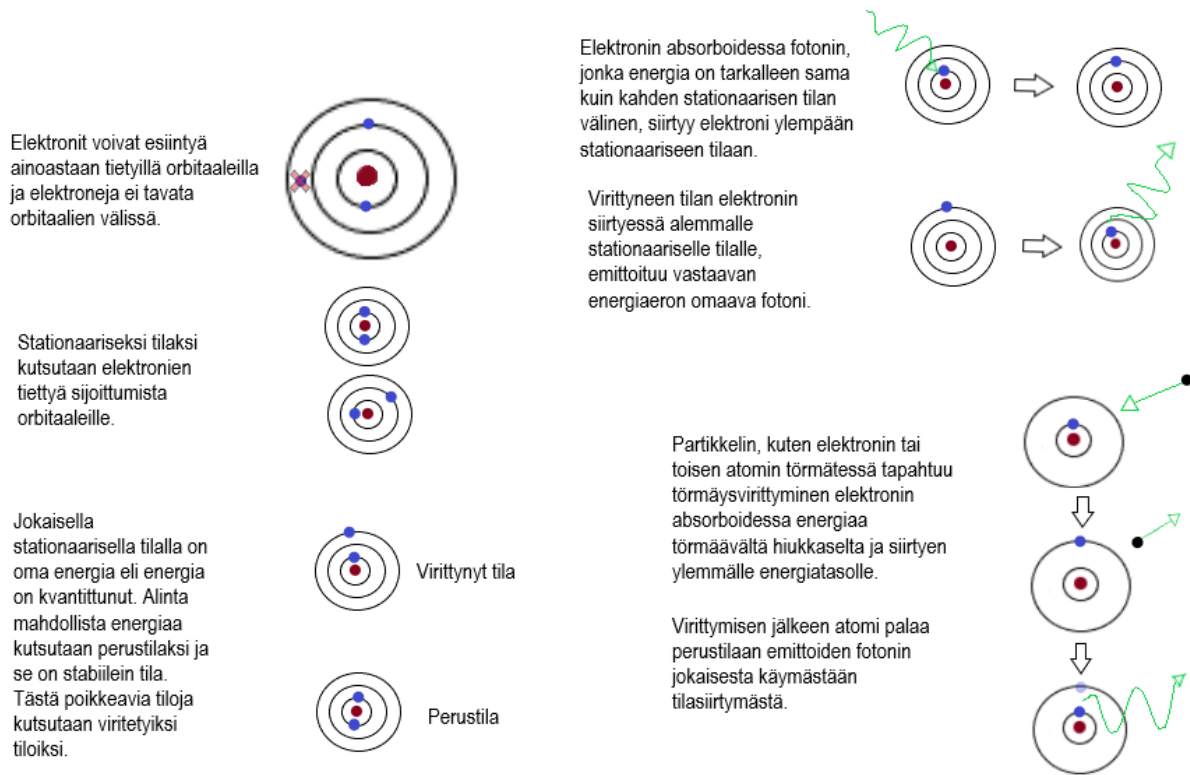
## 2.1 BOHRIN ATOMIMALLI LIEKKIKOKEISSA

1900-luvun alussa atomilla ajateltiin olevan jonkinlainen rakenne ja tiedettiin rakenteen koostuvan erimerkkisistä varauksista. Atomin rakennetta tällä aikakaudella kuvattiin kahdella erilaisella mallilla. Joseph John Thomsonin (1856–1940) malli esitti atomin rakenteen koostuvan koko atomin kattavasta positiivisesta varauksesta, joka pitää kiinni negatiivisista varauspartikkeleista. Ernest Rutherfordin (1871–1937) mallissa atomin rakenne esitettiin koostuvan positiivisesta keskelle sijoittuvasta varauksesta ja sitä ympäröivästä elektronien joukosta.<sup>39,42-44</sup>

Rutherfordin malli oli aikansa suosituin tapa esittää atomin rakenne, mutta se ei onnistunut selittämään atomien stabiilisuutta ja spektrien erilaisuutta. Albert Einsteinin (1879–1955) huomio vuonna 1905 valon kvantittumisesta auttoi ymmärtämään uudella tavalla atomin rakennetta. Tämä johti Niels Bohria (1885–1962) pohtimaan, voisiko atomin rakennetta selittää siihen absorboituvien ja emittoituvien valokvanttien avulla. Vuonna 1913 Bohr esitti uuden mallin atomin rakenteelle, jossa Rutherfordin malliin lisättiin kvantittuminen. Kuvassa 2 on esitetty Bohrin atomimallin perusolettamukset.<sup>39,45,46</sup>

Bohrin huomio oli, että elektronit voivat esiintyä vain tietyillä orbitaaleilla eli stationaarisilla tiloilla ja elektronit eivät voi olla näiden tilojen välisellä alueella. Elektronit kuitenkin voivat siirtyä orbitaaleilta toiselle, joko absorboiden tai emittoiden fotonin, jonka energia vastaa tarkalleen kyseisten stationaaristen tilojen energiaeroa. Atomi voi myös virittyä ulkopuolisen partikkelin törmätessä siihen. Tässä törmäysvirittymisessä siirtyy energiaa törmäävästä partikkelista elektroniin ja elektroni siirtyy ylemmälle energiatasolle. Elektronin palatessa alemmille tiloille, emittoituu tilojen erotusta vastaavan energian omaava foton. Fotonin virittäessä atomin foton häviää, mutta partikkelin virittäessä atomin partikkeli menettää energiaa, mutta ei häviä törmäyksessä. Ainoa ehto törmäysvirittymisessä on se, että partikkelin energia pitää olla suurempi tai yhtä suuri kuin atomin virittymiseen käytettävä energia.<sup>39-41</sup>





**Kuva 2.** Bohrin atomimallin perusolettamukset.<sup>mukaillen 39</sup>

Elektronin siirtyessä tilalta toiselle, joko absorboituu tai emittoituu fotoni ja sen energian suuruus on tilojen energiaeroja vastaava. Kuvan 3 esittämän fotonin emittoituessa, voidaan atomin energiamuutosta kuvata seuraavasti.<sup>40,41</sup>

$$\Delta E = E_i - E_f = hf \quad (1)$$

missä

$\Delta E$  = tilojen välinen energiaero (J)

$E_i$  = korkeampi energiatila (J)

$E_f$  = alempi energiatila (J)

$h$  = Planckin vakio,  $6,626 \cdot 10^{-34}$  Js

$f$  = fotonin taajuus (Hz,  $s^{-1}$ )

Kaavan 2 esittämä aaltoliikkeen perusyhtälö kuvaa sähkömagneettisen säteilyn ominaisuuksien välisiä yhteyksiä.

$$c = f\lambda \quad (2)$$

missä

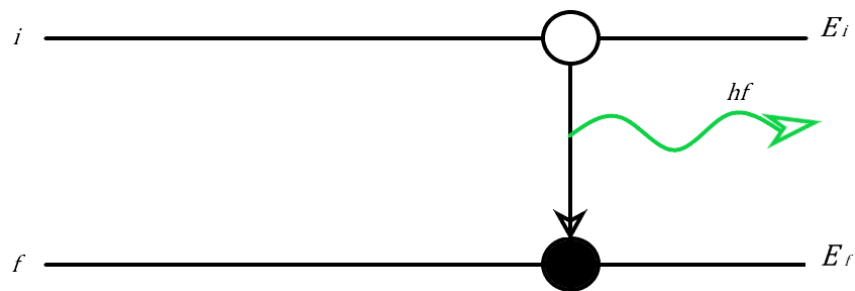
$c$  = valonnopeus tyhjiössä,  $2,998 \cdot 10^8$  m/s

$\lambda$  = säteilyn aallonpituus (m)

Kaavan 2 mukaisesti säteilyn aallonpituus on taajuuteen liittyvä suure ja yhdistämällä kaksi edellistä kaavaa saadaan energialle ja aallonpituudelle kaavan 3 mukainen esitys.<sup>40,41</sup>

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

Tilojen välinen energia kaavassa 1 on suuruusluokaltaan hyvin pieni ja on selkeämpi esittää elektronivolteina. Tällöin Planckin vakio saa arvon  $4,41 \cdot 10^{-15} \text{ eV}$ .<sup>39</sup>



**Kuva 3.** Atomi emittoi fotonin siirtyessään korkeammalta energiatasolta *i* alemmalle energiatasolle *f*.<sup>40</sup>

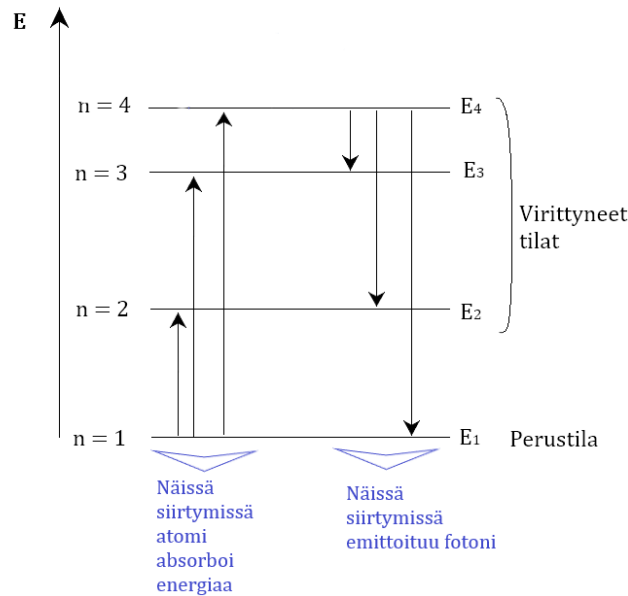
## 2.2 ENERGIATASOKAAVIO

Energiatasokaaviolla voidaan selkeästi ja helposti kuvata erilaisia stationäärisiä tiloja ja niiden välillä tapahtuvia muutoksia. Kaavio ei ole varsinaisesti kuvaaja ja sen luonne on enemmänkin esittää kuvallinen malli stationäärisistä energiatiloista. Kuvan 4 pysty akseli kuvaa energiaa ja vaaka-akselit ovat eri energiatiloja. Vaaka-akseleista tulee huomata, että ne eivät ole mittakaavaltaan tarkkoja ja niitä voidaan ajatella enemmän tikapuiden puolina, jotka esittävät energiatasoja. Alimman tason eli  $n = 1$  perustilassa energia  $E_1$  on matalimmillaan. Korkeammat tasot ovat numeroitu niiden kvanttinumeroilla, joissa  $n$  on suurempi kuin yksi. Näitä kvanttinumeroita kutsutaan pääkvanttiluvuiksi.<sup>39</sup>

Kuvan 4 nuolet ylöspäin esittävät siirtymiä perustilasta  $n = 1$  ylemmille  $n > 1$  tiloille, joissa energiataso on korkeampi. Näissä siirtymissä atomi absorboi energiaa ja tapahtuu atomin virittyminen. Atomi voi ainoastaan virittyä kvanttilukujen määräämille tasoille eikä virittymiset stationääristen tilojen väleille ole sallittuja. Alaspäin osoittavat nuolet kuvaavat siirtymiä, joissa tapahtuu viritystilän purkautuminen. Purkautumisessa tapahtuva energiatilan muutos johtaa fotonin emittoitumiseen.<sup>39</sup>

Siirtyminen tiloilta toisille tapahtuu välittömästi ja ei ole olemassa tapahtumaa, jossa elektroni olisi matkalla tilojen välissä. Virittyneen tilan elinikä on kuitenkin mitattavissa oleva suure ja se on nanosekuntien suuruusluokkaa. Viritystilän elinikä riippuu aineesta ja kokeellisesti sen on havaittu noudattavan eksponentiaalista vähenemistä ajan suhteen. Eli saman viritystilän omaavat atomit emittoivat fotonin hieman eri aikaan, mutta todennäköisyys fotonin havaitsemiseen vähenee ajan suhteen. On siis olemassa ajankohta, milloin käytännössä kaikki

virittetyt atomit ovat palanneet viritystä edeltävälle energiatasolle. Alimman mahdollisen viritetyn energiatason elinaika litiumatomilla on mitattu olevan  $27,29 \pm 0,04$  ns ja natriumatomilla vastaava aika on  $16,40 \pm 0,03$  ns.<sup>39,47</sup>



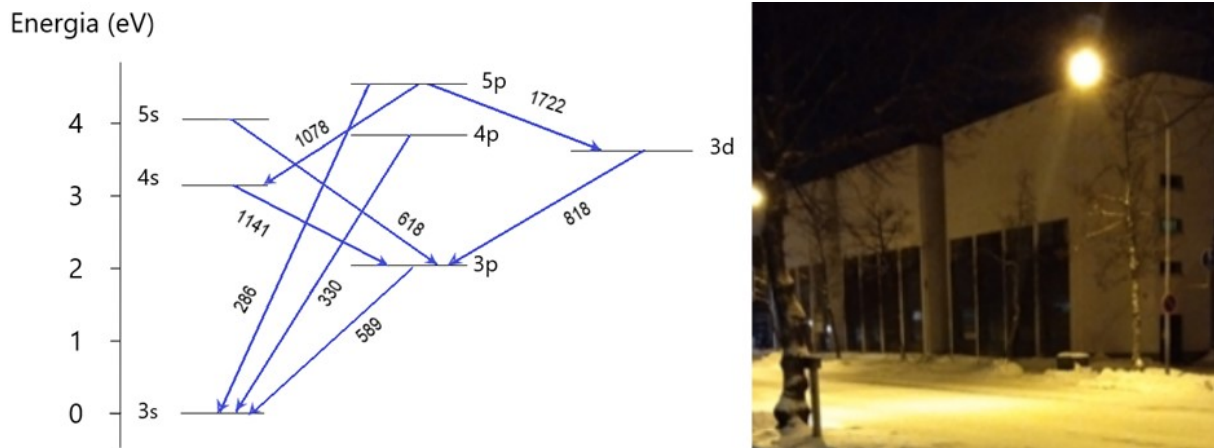
**Kuva 4.** Energiatasokaavio.<sup>mukaillen 39</sup>

## 2.3 EMISSIOSPEKTRI

Vain muutamien yksinkertaisten vedynkaltaisten atomien ja ionien, joilla on ydin ja yksi elektroni, kuten vedyn tai ionisoidun heliumin energiatasoja voidaan havainnollistaa edellä käsitellyllä kuvan 4 energiatasokaaviomallilla suhteellisen onnistuneesti. Kun käsitellään useamman elektronin systeemejä, on hyvä esittää energiatasot lisäksi orbitaalien kvanttiluvuilla, joita merkataan kirjaimella  $l$ . Arvoja, joita  $l$  voi saada ovat  $0, 1, 2, 3 \dots (n-1)$ . Nämä arvot vastaavat järjestyksessä eri muotoisten orbitaalien kirjaimia  $s, p, d$  ja  $f$ . Esimerkiksi kun pääkvanttiluku  $n = 2$ , orbitaalien kvanttiluvut ovat  $0$  ja  $1$  ja vastaavat kirjaimet  $s$  ja  $p$ . Jokainen atomiorbitaali on nimetty  $n$  ja  $l$  arvojen mukaan ja järjestys on  $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d$  ja niin edelleen.<sup>41</sup>

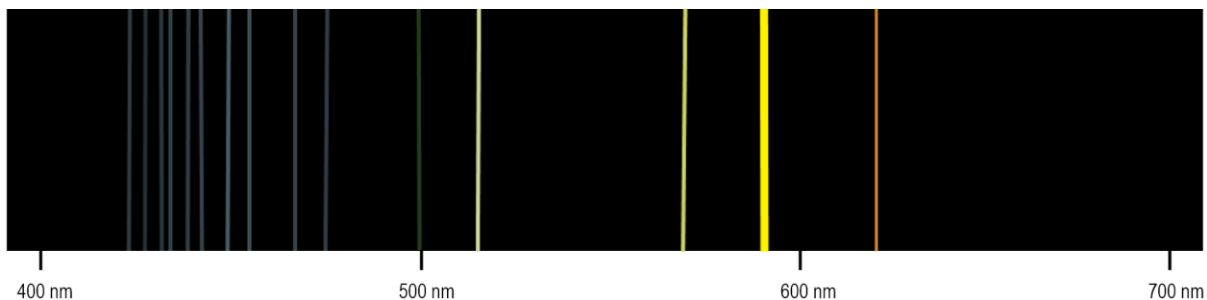
Hieman yksityiskohtaisemmassa tarkastelussa kuvassa 5 muodostetaan atomin energiatasot siten, että perustila on alhaisin mahdollinen tila, joka neutraalilla atomilla voi olla. Tässä energiatasokaaviossa esitetään atomin orbitaalit nousevissa energiatiloissa. Esimerkiksi natriumin, jonka elektronikonfiguraatio on  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ , perustila on valenssiorbitaalilla  $3s$ . Virittyneet tilat voidaan määrittää emittoituneen fotonin aallonpituuden avulla. Ylemmälle energiatasolle virittynyt natriumatom emittoi fotonin, kun elektroni palautuu korkeammalta tasolta alemmalle tasolle. Tasojen välinen energiaero määrittää fotonin aallonpituuden ja esimerkiksi  $3p$  orbitaalin virityksen palautuessa perustilaan  $3s$ , emittoituu fotoni, jonka aallonpituus on  $589$  nm. Tarkemmassa tarkastelussa Zeemanin ilmiön vaikutus jakaisi natriumin  $3p$  orbitaalin kahteen eri energiatasoon, joka näkyisi emissiospektrissä dublettina

kohdissa 589,0 nm ja 589,6 nm. Tässä ilmiötä ei käsitellä tämän tarkemmin, mutta se on hyvä tiedostaa korkean resoluution spektrien tarkastelussa.<sup>39–41</sup>



**Kuva 5.** Vasemmalla eräitä natriumin emissiospektrissä havaittavia siirtymiä ja vastaavat aallonpituudet nanometreinä. Oikealla katuvaloissa natriumkaasulamppujen tunnusomainen keltainen värivalo, joka vastaa siirtymää  $3p \rightarrow 3s$ .<sup>mukaiillen 39</sup>

Tämä silmillä havaittava valon spektrin keltaoranssisen alueella oleva voimakas tunnusomainen väri mahdollistaa natriumin tunnistamisen visuaalisesti liekkikokeiden avulla. Tätä ominaisuutta hyödynnetään esimerkiksi valaisimissa, lähinnä kuvan 5 mukaisissa katuvaloissa. Kun natriumatomin eri viritystilojen purkautumisesta emittoituneiden fotonien aallonpituudet yhdistetään, saadaan natriumin emissiospektri. Emissiospektri voidaan esittää kuvan 6 tavalla, jolloin sitä kutsutaan viivaspektriiksi. Viivaspektri saadaan muodostettua spektrometrillä, missä valonlähteen eri aallonpituudet hajotetaan joko prismalla tai hilalla. Kuvassa 6 on esitetty vain osa 400–700 nm aallonpituusalueen viritettyjen natriumatomien muodostamasta sähkömagneettisesta säteilystä. Viivojen intensiteetit suhteessa toisiinsa ovat havainnollisuuden vuoksi liioiteltuja. Tältä näkyvän valon aallonpituusalueelta on natriumatomille löydetty yhteensä 121 spektriviivaa<sup>48</sup>. Viivaspektri onkin eräänlainen sormenjälki aineesta ja sitä voidaan käyttää aineiden identifiointiin.<sup>39</sup>



**Kuva 6.** Hahmotelma natriumin viivaspektristä näkyvän valon aallonpituusalueella. Keltainen leveä viiva kohdassa 589 nm on natriumille tunnusomainen ja näkyy selkeästi. Muiden viivojen intensiteetit ovat yleensä liian heikkoja silmillä nähtäväksi, mutta havainnollisuuden vuoksi lisätty kuvaan.<sup>mukaiillen 39</sup>

Natriumin viivaspektrin intensiteetiltään vahvinta keltaista 589 nm viivaa kutsutaan myös historiallisista syistä D-viivaksi. Josef Fraunhofer (1787–1826) havaitsi vuonna 1817 auringon emissiospektrin sisältävän tummia viivoja ja viivat nimettiin aakkosten isoilla kirjaimilla. Myöhemmin vuonna 1859 Gustav Kirchhoff (1824–1887) toisti Fraunhoferin kokeet. Tutkittuaan metallisuolojen liekkispektrejä, Kirchhoff päätteli D-viivan olevan peräisin auringon kaasukehän natriumista. Kun natrium absorboi auringon säteilyä, niin natriumista emittoituvan säteilyn suunta on erittäin epätodennäköisesti sama kuin auringosta emittoituvan ja tämä ilmiö aiheuttaa maassa havaittavan auringon emissiospektrin tummat viivat.<sup>49–51</sup>

Jokaisella alkuaineella on siis oma tunnistettava emissiospektri, joka koostuu aallonpituudesta ja intensiteetistä. Mielenkiintoinen tapa havainnollistaa tätä on esittää emissiospektrit osana jaksollista järjestelmää<sup>52,53</sup>. Suurin osa alkuaineista ei kuitenkaan ole silmämääräisesti tunnistettavissa valon väristä. Liekkireaktiossa eräitä helpoiten visuaalisesti tunnistettavissa olevia alkuaineita on taulukossa 1 karakteristisine väreineen. Osalle on kirjattu myös voimakkaimpien spektriviivojen aallonpituusalueita.<sup>16,34,41,54,55</sup> Taulukosta voidaan varovasti päätellä elektronikonfiguraation kautta, että *s*-lohkon elektronien virittymisestä seuraa monesti silmin havaittavan värin muodostuminen.

**Taulukko 1.** Liekkikokeessa eräitä havaittavia alkuaineita, perustilan elektronikonfiguraatio, havaitun liekin väri ja joitain kirjallisuudesta löydettyjä spektriviivojen voimakkaimpia aallonpituuksia ja aallonpituusalueita.<sup>16,34,41,54,55</sup>

Alkuaine	Kemiallinen merkki	Elektronikonfiguraatio perustilassa	Liekin väri	$\lambda$ (nm)
Litium	Li	[He] $2s^1$	punainen	670
Natrium	Na	[Ne] $3s^1$	keltainen	589
Kalium	K	[Ar] $4s^1$	violetti	404, (767)
Rubidium	Rb	[Kr] $5s^1$	punavioletti	
Cesium	Cs	[Xe] $6s^1$	sininen	
Kalsium	Ca	[Ar] $3s^2$	tiilenpunainen	554, 622
Strontium	Sr	[Kr] $5s^2$	karmiininpunainen	605
Barium	Ba	[Xe] $6s^2$	vihreänkeltainen	488–604
Kupari	Cu	[Ar] $4s^1 3d^{10}$	sinivihreä	444, 537

### 3. LIEKKIKOKEET KEMIAN OPETUKSESSA

Liekkikoe, liekkireaktio ja liekkitesti tarkoittavat samaa asiaa ja on hyvin todennäköistä, että näihin on luonnontieteiden opetuksessa törmännyt muodossa tai toisessa joko opiskelijana tai opettajana. Kemian opetuksessa liekkikokeita tehdään usein niiden huomiota herättävän visuaalisuuden takia, mutta on hyvin vähän näyttöä siitä, että liekkikokeet tukisivat oppimista<sup>1</sup>. Opiskelijat kyllä muistavat liekkikokeet, mutta eivät osaa yhdistää niitä ilmiön taustalla olevaan kemiaan atomin rakenteesta. Atomiemissioon liittyvässä haastattelukyselyssä, missä

opiskelijoita erityisesti pyydettiin selittämään liekkikokeiden ja energiatasokaavioiden välistä yhteyttä, toisen asteen ja yliopiston perustutkinnon kemian opiskelijoilla oli vaikeuksia yhdistää punainen väri energiatasokaavioon. Opiskelijoiden keskittyminen kohdistui termeihin absorptio ja emissio sekä energiatasokaavion nuolien suuntaan. Energiatasojen merkitystä eri värien muodostumiseen ei ymmärretty. Toisen asteen opiskelijat myös suosivat Bohrin atomimallia energiatasokaavion sijaan selittäessään, kuinka atomi vapauttaa energiaa.<sup>1</sup>

Ihmisen kognitiiviset käsitykset kulkeutuvat usein opintoasteelta toiselle ja on hyvä tiedostaa, millaisia ymmärtämisen ongelmia liittyy erilaisiin malleihin<sup>1</sup>. Liekkikokeet vaikuttavat olevan irrallinen osuus opetuksessa, jota ei ole onnistuttu kytkemään teoreettiseen runkoon tarpeeksi selkeästi. Edellä käsitelty haastattelukysely piti sisällään energiatasokaavion, mutta sen malli on kuvan 4 kaltainen. Tästä on melko vaikeaa saada selkeää kuvaa atomissa tapahtuvista energiatasomuutoksista, koska elektronikonfiguraatiota ei ole tarkemmin huomioitu. Voi olla, että opetus jää helposti Bohrin atomimallin kautta vain vedyn emissiospektrin selittämiseen ja monielektronisia atomeja ei käsitellä tarpeeksi selkeästi. Tämä selittäisi haastattelukyselyn tuloksia, koska liekkikokeiden väri muodostuu atomeista, joiden viritettyjä energiatasoja ei pelkillä pääkvanttiluvuilla voi järkevästi esittää. Toimivampi malli voisi olla kuvan 5 esitys, joka selkeästi näyttää, kuinka eri energiatasojen siirtymät tuottavat eri aallonpituuksia.

Alemmilla opetusasteilla ei voida antaa oppilaiden itsenäisesti suorittaa palavien materiaalien kanssa työskentelyä. Liekkikokeet toimivat tässä tilanteessa esimerkiksi jännittävänä demonstraationa ilotulitteiden värimaailmasta. Oppilastöinä liekkikokeita voidaan alkaa teettää yläkoulussa, kun kaasupolttimen turvallinen käyttö on opittu. Tällä tasolla voidaan esimerkiksi lisätä liekkikokeet ioniyhdisteiden yhteydessä metalli-ionien kvalitatiiviseen tunnistamiseen.

Kun siirrytään lukiotason opetukseen, voidaan perehtyä kokonaisvaltaisemmin edellä käytyyn teoreettiseen taustaan. Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019 (LOPS19) ehdottaa liekkikokeita Kemia ja minä -moduulin KE1 tutkimisen taidoksi. Tässä moduulissa liekkikokeet voidaan yhdistää aineiden koostumuksen tutkimiseen ja Bohrin atomimalliin. Kvanttimekaanisen atomimallin opetuksessa Molekyylit ja mallit -moduulissa KE3 voidaan hyödyntää energiatasokaavioita ja käsitellä energian kvantittumista liekkireaktioiden kautta näyttävillä käytännön kokeilla. KE3 -moduulin keskeisessä sisällössä on myös mainittu tutustuminen spektrien antamaan informaatioon aineen rakenteesta, joka mahdollistaa viivaspektrien tulkinnan liittämisen opetukseen. Valoa, atomimalleja, energian kvantittumista ja emissiospektrejä käsitellään myös lukion fysiikan Sähkömagnetismi ja valo -moduulissa FY7 sekä Aine, säteily ja kvantittuminen -moduulissa FY8 ja tässä onkin mainio tilaisuus tehdä oppiaineiden välisiä kytköksiä. LOPS19 myös tukee ja jopa velvoittaa vahvistamaan opiskelijoiden monipuolista laaja-alaista osaamista.<sup>2</sup>

## 4. PERINTEISET LIEKKIKOKEET

Erilaisia menetelmiä tehdä liekkikokeita on lukuisia. Tässä on pyritty saamaan mahdollisimman monipuolinen katsaus liekkikokeiden laajaan kenttään ja antamaan mahdollisesti uusia ideoita työskennellä liekkireaktioiden parissa. Kaikkia mahdollisia liekkikokeita ei kuitenkaan

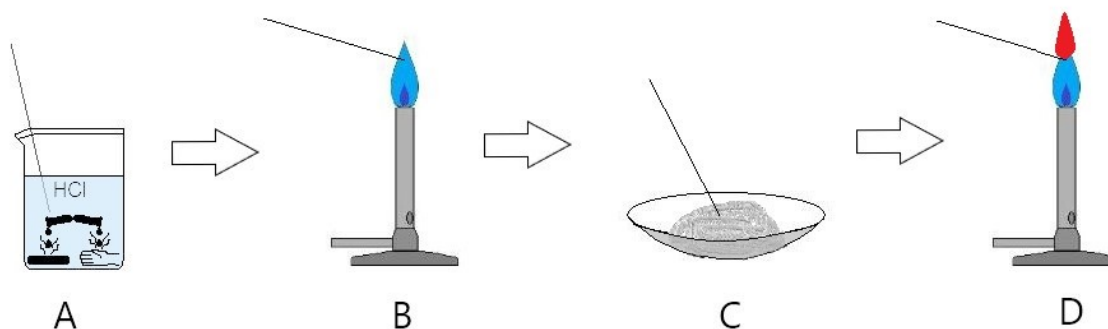
käsitellä. Osassa on käytetty erittäin vaarallisia aineita ja tarvikkeita, kuten vuonna 1947 julkaistussa menetelmässä, missä käytetään asbestikuituja imeyttämään tutkittavaa suolaliuosta<sup>7</sup>.

## 4.1 KLASSISEN LIEKKIKOKEEN SUORITUS

Liekkikokeen voi tehdä usealla eri tavalla, mutta yksinkertaisin ja selkein tapa tehdä koe, joka soveltuu hyvin aineen koostumuksen suuntaa antavaan kvalitatiiviseen analyysiin, on esitetty kuvassa 7. Platina- tai nikkeli-kromilanka puhdistetaan väkevässä suolahappoliuoksessa (A) ja viedään liekkiin (B).  $A \rightarrow B$  tapahtumia toistetaan, kunnes liekkiin ei enää synny ylimääräistä väriä. Tämän jälkeen lankaa käytetään tutkittavassa aineessa (C) ja viedään uudelleen liekkiin potentiaalisen värin havaitsemiseksi (D). Liekin lämpötila on matalin aivan liekin alaosassa keskellä liekkiä ja ensin kannattaa kokeilla helposti haihtuvia yhdisteitä tällä alueella. Kuumin alue ns. sulatusalue on kuvassa näkyvän sisemmän tummemman liekin kärkikohdassa.<sup>56,57</sup> Tällä kohtaa pitäisi vaikeamminkin kaasuuntuvat yhdisteet havaita.<sup>34,58</sup>

Tärkeä alkuvalmistelu on sopivan liekin käyttäminen. Esimerkiksi kynttilän liekki ei monesti sovellu liekkitesteihin, johtuen sen epätäydellisen palamisen värjäämästä liekistä. Kouluissa yleisesti käytössä olevat nestekaasupatruunalliset kaasupolttimet, joita myös bunsenpolttimiksi kutsutaan, soveltuvat hyvin liekkitesteihin. Kaasupolttimessa on oltava säädeltävä nestekaasuvirtaus sekä ilmanottoaukko, joiden avulla kellertävän oranssi liekki voidaan muuntaa haalean sinertäväksi. Tällöin ilman ja nestekaasun suhde on sopiva ja palaminen on täydellistä. Kun liekki ei lepata eli se on saatu mahdollisimman vakaaksi, siitä voidaan tunnistaa liekkireaktioita.

Suorituksessa on muutamia tekniikoita, joilla voidaan parantaa liekkikokeen onnistumista. Kastamalla lanka ensin suolahapossa, voidaan lisätä kiinteiden näytteiden kiinnittymistä lankaan sekä muodostaa helpommin haihtuvia kloridiyhdisteitä. Tekemällä silmukka langan päähän voidaan helpottaa näytteenottoa. Jos näyte on liuosmainen ja liekkikokeessa ei näy tunnistettavaa väriä, voidaan liuokseen lisätä pari pisaraa suolahappoliuosta kloridiyhdisteiden saamiseksi. Natrium myös usein peittää alleen muiden aineiden värit. Kuvassa 1 näkyvän sinisen koboltilasin läpi liekkiä katsottaessa voidaan natriumin väri suodattaa pois. Näin liekkitestillä voidaan havaita esimerkiksi kalium ja natrium samasta näytteestä, josta muutoin kaliumin violetti väri ei erottuisi.<sup>34,58</sup>



**Kuva 7.** Klassisen liekkikokeen vaiheet. Platina tai nikkeli-kromilangan puhdistus väkevässä suolahappoliuoksessa (A). Langan puhdistus (B). Näytteen otto (C). Näytteellisen langan vieminen liekkiin (D).<sup>34,58</sup>

Klassisella liekkikokeella voidaan suhteellisen turvallisesti tutkia tuntemattomia aineita. Liekitettävät ainemäärät ovat pieniä ja näin ollen mahdollisten vaarallisten kaasujen muodostuminen on vähäistä. Liekki on myös hallittavissa oleva ja voidaan nopeasti sammuttaa. Koe on kuitenkin tehtävä vetokaapissa ja asianmukaisine suojarusteineen. Väkevää suolahappoa on aina käsiteltävä varoen. Jos haluaa vähentää vaarallisten kaasujen muodostumista, voi suolahappopuhdistuksen jälkeen huuhtoa lankaa ionivaihdetulla vedellä. Suolahapon voi myös jättää kokonaan pois, jos tarkoituksena on pelkästään tehdä liekkitestit tunnetuilla liekissä helposti haihtuvilla aineilla ja jokaiselle aineelle on käytössä oma lanka.

Vanhin löydetty Journal of Chemical Education -julkaisu liekkikokeesta on vuodelta 1928 ja aivan toimiva idea vielä nykypäivänäkin. Siinä painopiste on ajan säästäminen liekkikokeiden teossa. Tutkittavat puhtaat metallisuolat ovat pienissä reagenssipulloissa, joiden korkit ovat korvattu rei'itetyillä kumitulvilla. Kumitulpan läpi on pujotettu platinalanka, joka on kosketuksissa liekkireagenssin kanssa. Tällä menetelmällä on poistettu aikaa vievä platinalangan puhdistus, eivätkä reagenssit kontaminoidu niin helposti. Lisäksi ehdotetaan poraamaan puupalikkaan syvennykset reagenssipulloille, jolla liekkikoesarja saadaan pysymään kätevästi järjestyksessä.<sup>3</sup>

## 4.2 LIEKKITESTEJÄ PALAVIEN LIUOTTIMIEN AVULLA

Liekkitestejä on suoritettu metanolin, etanolin ja 2-propanolin avulla. Ne ovat yleisiä helposti syttyviä laboratorioliuottimia. Metanolilla on lähes väritön liekki, josta liekkireaktio on helposti tunnistettavissa. Etanolilla on hieman sinertävä liekki ja se myös sopii hyvin liekkireaktioihin, kuten kuvasta 8 voi havaita. Isopropanoli palaa kellertävällä liekillä, joka häiritsee testiä. Tämä todennäköisesti johtuu huonosta ilma-paloneste suhteesta ja korjaantuu yleensä lisäämällä isopropanolin sekaan hieman vettä.<sup>10,28</sup>





**Kuva 8.** Etanoliliekin väri ja liekkireaktio pimeässä huoneessa. Vasen liekki on 70 % etanoliliuos ja oikea liekki on värjätty NaCl-kiteellä saman vahvuudessa etanoliliuoksessa.

Alkoholiin onnistuu monesti tutkittavan metallisuolan liuotus. Liuotus on mahdollista tehdä suoraan astiaan, missä liekkikoe suoritetaan. Astioina käytetään kuumuutta kestäviä peruslaboratoriotarvikkeita, kuten kellolaseja, petrimaljoja ja dekantterilaseja. Alkoholi-suolaliuos sytytetään palamaan ja liekin mahdollinen väri on usein selkeämmin havaittavissa kuin klassisessa liekkikokeessa. Palamisen kesto on riippuvainen alkoholin määrästä ja näin voidaan tehdä jopa useiden minuuttien kestoisia värillisiä liekkejä, joiden korkeus on noin 10–15 cm. Tarkoitus on ollutkin näiden liekkikokeiden kehittämisessä saada aikaiseksi mahdollisimman näyttävä ja yksinkertainen liekkikoe suurelle yleisölle esitettäväksi. Liekkejä voidaan myös vertailla tekemällä useita liekkikokeita rivissä samaan aikaan.<sup>13</sup>

Etanoliliekissä on huonona puolena se, ettei palo ole suurilla polttoainemäärillä puhdasta ja tämä aiheuttaa liekkiin keltaisen värisävyjä. Polton puhtautta voidaan parantaa käyttämällä etanolipoltinta. Kuvassa 9 esitetyn helposti liikuteltavan, edullisen ja laboratorion ulkopuolellekin soveltuvan etanolipolttimen voi rakentaa alumiinitölkeistä. Tavallisia 330 ml alumiinitölkkejä tarvitaan kolme kappaletta. Tölkkien leikkaamiseen voi käyttää esimerkiksi terävää mattoveistä tai peltisaksia. Kahdesta tölkestä leikataan 5 cm etäisyydeltä pohja irti. Näistä tulee polttimen ala- ja yläosa. Kolmannesta tölkestä leikataan keskeltä 6,5–8 cm levyinen lieriön muotoinen osa, joka katkaistaan toiselta laidalta korkeussuunnassa. Tästä tulee polttimen sisälle tuki. Toisesta pohjasta poistetaan kupera osa. Tämä on kansiosa. Korkeussuunnassa halkaistusta lieriöstä nidotaan pienempi lieriö, jonka reunat asettuvat tölkin pohjan uriin. Kansi asetetaan pohjan seinämien päälle ja kannen yläosan reunoihin tehdään varovasti 16 pientä reikää tasaisin välein naulalla ja vasaralla. Etanolipoltin on valmis ja se täytetään puoleenväliin polttoainetta.<sup>30</sup>

Liekkikokeita tee-se-itse-etanolipolttimella esitetään tehtäväksi 1 M pitoisista suolaliuoksista. Liuosta tiputetaan muutama tippa vanupuikkoon. Vanupuikon kostutettua päätä käytetään kuvan 9 mukaisesti varovasti liekin kyljessä ja varotaan polttamasta puikon vartta. Etanoliliuoksen vahvuudeksi sopii hyvin 70 %.<sup>30</sup> Käytännön testit kuvan 9 polttimella vaativat

muutaman minuutin esilämmitysajan, jonka jälkeen etanoli palaa puhtaalla sinertävällä liekillä. Testaus suoritettiin ulkona -12 °C lämpötilassa ja tuulelta suojatussa paikassa.



**Kuva 9.** Itsetehty etanolipoltin kolmesta 330 ml:n alumiinitölkistä. Vasemmalta oikealle: polttimen osat, poltin kasattuna, sytytetty poltin (70 % etanoliliuos), NaCl-liuoksessa kastettu vanupuikko polttimen liekissä ja poltin käytön jälkeen.<sup>30</sup>

Dramaattisen liekkitestin demonstraatioissa suuria palavia värikkäitä tulipalloja saadaan muodostettua, kun sumutinpullolla sumutetaan bunsenliekkiin metanolin ja liekkireagenssin liuosta. Tulipallot kestävät vain noin sekunnin, mutta sumutusta voidaan jatkaa tarpeen mukaan. Valmistelut ovat yksinkertaisia. Sumutinpulloon (250 ml) lisätään haluttua liekkireagenssia 5 grammaa ja pullo täytetään metanolilla. Sumutin pitää olla mahdollisimman hienojakoisen sumun asetuksella ja imuletku sentin irti sumutinpullon pohjasta suuttimen tukkeutumisen ehkäisemiseksi. Koe suositellaan tehtäväksi hyvin ilmastoidussa tilassa tai vetokaapissa ja sumutusta ei saa suunnata yleisöön päin. Kokeen aikana syntyy kaasuja, joita ei kannata hengittää.<sup>20</sup>

Palavilla liuottimilla, varsinkin metanolilla on ollut useita palo-onnettomuuksia opetustiloissa. Näistä suurin osa on ollut ”sateenkaaridemonstraatio” -liekkitestin aiheuttamia. Kyseisessä testissä laitetaan useaan matalaan astiaan metanolia ja liekkireagenssia siten, että liekkien väreistä muodostuu sateenkaarimainen värisarja. Onnettomuudet ovat monesti johtuneet siitä, että metanolia on lisätty palamisen aikana, jotta saataisiin näkyvämpiä liekkireaktioita. Tämä on johtanut palavan nesteen loiskumiseen ja palavan aineksen hallitsemattomaan leviämiseen. Kaasuuntunut metanoli astiassa on myös joissain tapauksissa imaissut liekin sisäänsä ja välittömästi sen jälkeen liekinheitinmäisesti suihkuttanut palavaa alkoholia ympäriinsä. Näissä tapauksissa on usein turvallisuus jätetty huomioimatta. Metanolia on tuotu 1–4 litran astioissa demonstraatiopöydälle. Palavat liekit ovat olleet avonaisella pöydällä aivan opiskelijoiden edessä ilman väliseinää tai turvavälejä. Kaikissa onnettomuuksissa on ollut puutteita liekkireaktioita tekevän henkilön tietotaidossa liittyen palavien liuottimien käsittelyyn. Suurin osa onnettomuuksista olisi voitu välttää työturvallisuuden huomioimisella.<sup>35</sup>

### 4.3 PAPERIN AVULLA TEHTÄVÄT LIEKKIKOKEET

Joskus liekin väriä on vaikea havaita Pt- ja Ni-Cr-langan avulla. Lanka pitää olla hyvin suolahapolla puhdistettu tai muuten ei värejä voida erottaa. Kuumassa liekissä oleva Ni-Cr-lanka aiheuttaa myös kellertävää väriä ja opiskelijat eivät välttämättä osaa tätä huomioida.

Langan hehkuminen myös häiritsee havaintoja, jos liekkikokeessa käytetään vaikeasti haihtuvia yhdisteitä ja näytettä joutuu pitkään pitämään liekissä.<sup>9</sup>

Metallilanka on korvattu paperilla muutamissa liekkikoejärjestelyissä edellisistä syistä. Myös 1940-luvun sotaisat syyt ajoivat kemistejä keksimään arvokkaille metalleille vaihtoehtoja laboratoriotyöskentelyssä. Paperina on käytetty kromatografiapaperia, suodatinpaperia ja paperipyyhkeitä. Liekiksi sopii bunsenliekki. Suodatin- ja kromatografiapaperista leikataan noin 2 x 10 cm suikaleita, jotka taitetaan pituussuunnassa, jotta saadaan paperin lujuutta parannettua. Paperipyyhkeestä leikataan 1 x 10 cm suikale, joka asetetaan kahden spaattelin väliin siten, että 2–3 cm paperista jää spaattelien ulkopuolelle. Käytettävää paperilaatua on hyvä ensin kostuttaa ionivaihdetulla vedellä ja tehdä tyhjä liekkitesti. On tärkeää tietää, miltä liekki näyttää paperin lopulta palaessa, jotta sen osaa varsinaisesta testistä erottaa.<sup>6,9,14</sup>

Liekkireagenssit voivat olla 1 M liuoksina tai kiinteinä suoloina. Suoloina suositellaan kloridiyhdisteitä, koska näissä testeissä ei käytetä suolahappoa. Nesteet voidaan suoraan imeyttää papereihin. Kiinteät suolat saadaan kiinnittymään kastamalla paperi ensin ionivaihdetussa vedessä ja pudottamalla muutama kide paperiin. Suolaliuoksella imeytetyt paperit viedään aivan bunsenliekin alalaidan reunalle ja tässä pitäisi näkyä liekkireaktioita. Kiteelliset suolapaperit viedään suoraan liekkiin. Värien pitäisi olla hyvin näkyviä valoisessakin tilassa, etenkin liekkiin viedyllä paperilla. Etuja paperin käytössä on edullisuus ja nopeus. Testissä ei tarvita vahvaa suolahappoa eikä alkoholien sumutteluja. Jälkien siivoaminen on myös kohtuullisen nopeaa.<sup>6,9,14</sup>

## 5. VIRTUAALISET LIEKKIKOKEET

Kemian opetuksessa on jo pitkään käytetty hyödyksi tietokoneen luomia virtuaalisia opetustiloja ja -tilanteita. Vuorovaikutus opiskelijan ja virtuaaliympäristön välillä on lähinnä tapahtunut kaksiulotteisen näytön kautta, jossa hiirellä ja näppäimistöllä ohjailaan toimintaa. Laboratoriomenetelmistä on kehitelty runsaasti simulaatioita ja esimerkiksi titraus on ollut suosittu kohde<sup>59–62</sup>. Tämä johtunee titrauksen suhteellisen helposta mallintamisesta ja sen laajasta käytöstä kemian opetuksessa. Kun opiskelija pystyy tutkimaan ja manipuloidaan kemian systeemejä reaaliaikaisesti, auttaa se myös ymmärtämään intuitiivisesti monimutkaisia teorioita<sup>63</sup>.

Kolmiulotteinen interaktiivinen VR-ympäristö on tullut kohtuuhintaisten VR-laitteiden yleistyessä kaikkien saataville. Yksinkertaisimmillaan VR-tilaan pääseminen vaatii vain VR-lasit, joihin on integroitu kuulokkeet, liiketunnistuskamera ja tietokone. Yleensä VR-lasien kanssa käytetään molemmissa käsissä ohjaimia, joilla vuorovaikutetaan virtuaalimaailman kanssa. Uusimmat VR-lasit pystyvät toisaalta jo kartoittamaan sormet ja ohjaimia ei välttämättä tarvita. Raskaammat VR-ohjelmistot vaativat enemmän laskentatehoa ja tällöin on käytettävä erillistä tietokonetta VR-laitteiden kanssa.

Kemian opetuksen kannalta merkittäviä virtuaalisen tilan simulointiohjelmistoja ovat Labster, Nanome ja Hololab Champions. Labster julkaistiin vuonna 2013 ja sovelluksen on kehittänyt

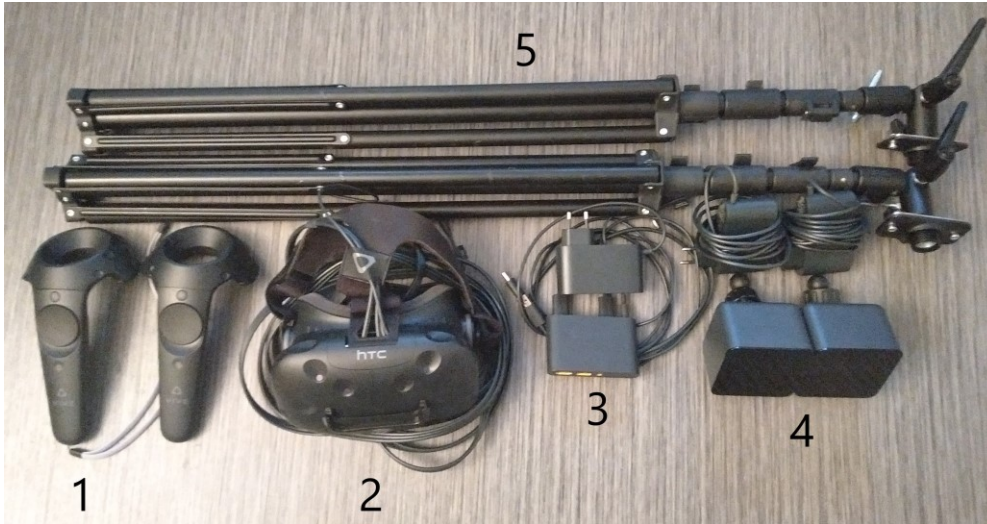
Labster AbS -yhtiö, jonka pääkonttori sijaitsee Tanskan Kööpenhaminassa. Nanome-ohjelmiston kehittäjä on Kalifornian San Diegossa sijaitseva Nanome Inc. ja ohjelmisto julkaistiin vuonna 2018.<sup>64,65</sup> Näistä Labster ja Hololab Champions simuloivat laboratorioympäristöä ja Nanomella voi virtuaalisesti rakentaa ja muokata kemiallisia ja biologisia rakenteita.<sup>66</sup> Labsteria pystyi aikaisemmin käyttämään VR-laseilla, mutta vuoden 2021 alusta tuki VR-laseille loppui ja ohjelmisto jatkossa keskittyy web-pohjaisten virtuaalilaboratorioiden kehittämiseen. Labster-ohjelmistoa voi testata selaimen kautta ilmaisella laboratorioturvallisuussimulaatiolla, josta on kuvakaappaus kuvassa 10. Nanome-ohjelmistosta saa myös ilmaisen kokeiluversion, jolla voi rajoitetusti rakentaa ja tutkia molekyyliä VR-huoneessa. Erityistä Nanomessa on se, että VR-huoneeseen voi kutsua muita käyttäjiä ja yhdessä voidaan tutkia erilaisia rakenteita, kuten kuvassa 10 näkyvää serotoniinia.



**Kuva 10.** Vasemmalla Labster-ohjelmiston laboratorioturvallisuusharjoittelua<sup>65</sup>. Oikealla Nanome-ohjelmiston VR-huoneessa serotoniinimolekyyli<sup>64</sup>.

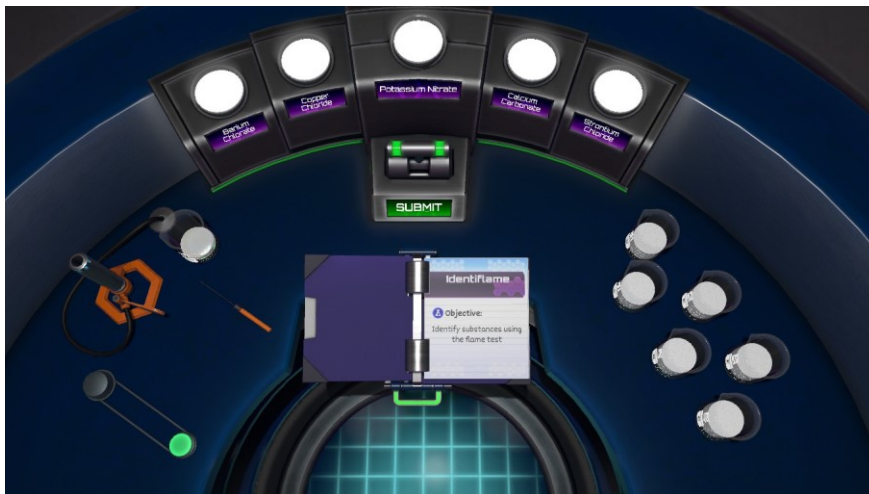
## 5.1 HOLOLAB CHAMPIONS JA VIRTUAALINEN LIEKKIKOE

VR-laitteistoja on saatavilla runsaasti ja valinta pitää tehdä käyttökohteen mukaan. Esimerkiksi seuraavaksi käsiteltävä Hololab Champions -ohjelma vaatii joko HTC Vive, Oculus Rift (Meta Rift) tai Valve Index -mallien VR-laitteistot sekä tietokoneen Steam-alustalla. Tietokoneen minimivaatimukset Hololab Champions -ohjelmalle ovat Intel i7-4790 3,6 GHz prosessori, 8 GB muistia, Windows 8 64-bit -käyttöjärjestelmä ja Geforce GTX 970 4,096 GB -näytönohjain. Kuvassa 11 on ohjelmistoa testattaessa käytetty HTC Vive -laitteisto.



**Kuva 11.** HTC Vive -laitteiston osat: 1. ohjaimet, 2. VR-lasit, 3. linkkilaatikko, 4. majakat, 5. majakoiden jalustat.

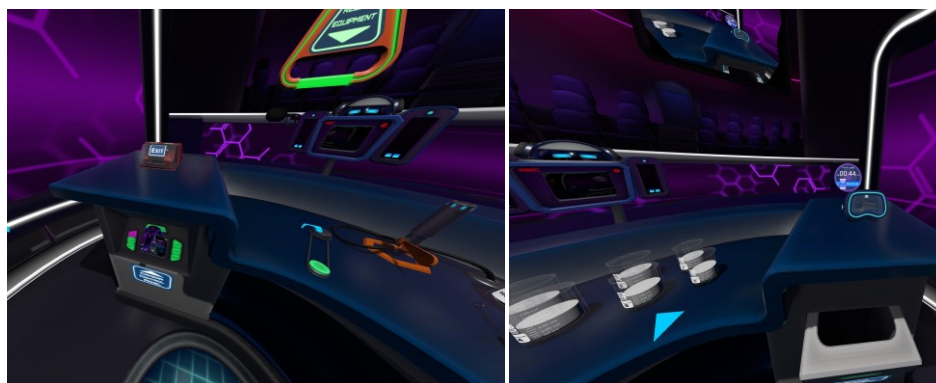
Hololab Champions -ohjelmiston laboratorioharjoitukset jakaantuvat kahteen osioon, harjoituslaboratorioihin ja pelitapahtumaan. Harjoituslaboratoriot koostuvat yhteensä 16 työstä. Harjoituksista 14 on pieniä töitä ja kaksi harjoituksista on kokoavia töitä. Harjoitustyöt voidaan suorittaa missä järjestyksessä tahansa, mutta kokoavien töiden tarkoitus on hyödyntää seitsemän edeltävän pienen työn sisältöjä. Pienten töiden kesto vaihtelee yhden ja kymmenen minuutin välillä riippuen siitä, onko opiskelija ennen käyttänyt VR-laitteita. Kokoavien töiden kesto vaihtelee välillä 10–40 min. Pelitapahtumia on kaksi erilaista ja ne koostuvat kymmenestä etukäteen päätetyssä järjestyksessä suoritettavasta pienestä työstä, jotka valmistavat opiskelijan lopuksi tehtävään kokoavan työn tekoon. Näiden laborointien kesto vaihtelee väleillä 25–75 min ja riippuu myös paljon opiskelijan taidoista käyttää VR-laitteita. Töitä tehdessä ei tarvitse kävellä, mutta tilaa pitää varata käsien liikkeelle ympäristöstä noin 1,5 x 1,5 m alue.<sup>67</sup>



**Kuva 12.** Työskentelyalue tarvikkeineen. Vasemmalta oikealle: sytytin, bunsenpoltin, suolahappo dekanterissa, platinasilmukka, laboratoriomuistikirja ja liekkireagenssit.<sup>36</sup>

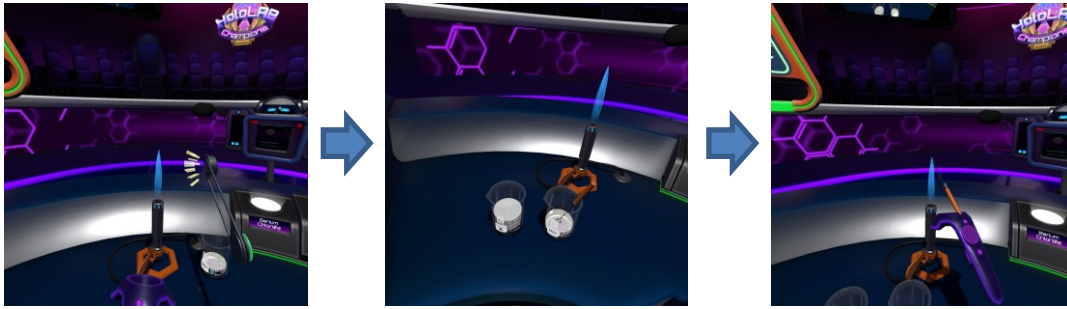


Liekkikokeita tehdään harjoituslaboratorio-osiossa ja tämän työn valinnan jälkeen opiskelija siirretään kuvan 12 työskentelyalueelle. Työn päämääränä on tunnistaa kuusi tuntematonta yhdistettä liekkikokeen avulla. Tuntemattomat yhdisteet ovat strontiumkloridi, kalsiumkarbonaatti, natriumnitraatti, kuparikloridi, bariumkloriidi ja kaliumnitraatti. Ohjelmisto automaattisesti asettaa työpöydälle työssä tarvittavat välineet ja reagenssit. Välineet koostuvat platinasilmukasta, bunsenlampusta, sytyttimestä ja dekantterilaseissa olevista yhdisteistä sekä suolahaposta. Työskentelytilassa ei siis ole ylimääräisiä tarvikkeita, mutta liekkireagensseista natriumnitraatti on ylimääräinen yhdiste, jota ei lopuksi palauteta. Laboratoriomuistikirja sisältää tarvittavat ohjeet työskentelyyn. Siihen on myös koottu suppeat käyttöturvallisuustiedotteet tutkittavista reagensseista. Kuvan 12 yläosassa on alue, johon asetetaan tunnistetut aineet omille nimetyille kohdille. Kuvassa 13 on työskentelyalueen vasen ja oikea puoli. Vasemmalta puolelta löytyvät tilasta poistumisvipu, tarvikkeiden uudelleenlataamiskahva sekä kamerakulman säätimiä työskentelyn ulkopuolista seuraamista varten. Oikealla puolella on töitä tehdessä käytettävät suojalasit ja työn kestoa mittaava ajastin sekä jäteastia. Dekantterilasit ovat pudotettaessa särkyviä ja kaikki siirreltävät esineet ovat mahdollista heittää joko tahallisesti tai tahattomasti pois työskentelyalueelta, jolloin ne katoavat. Reagenssit ovat rajallisia ja mahdollista kaataa pois astioista tai sekoittaa toisiinsa. Näissä tilanteissa on käytettävä uudelleenlataamiskahvaa, joka palauttaa työskentelyalueen alkutilaan. Muutoin työtä ei voida suorittaa hyväksyttävästi loppuun asti.

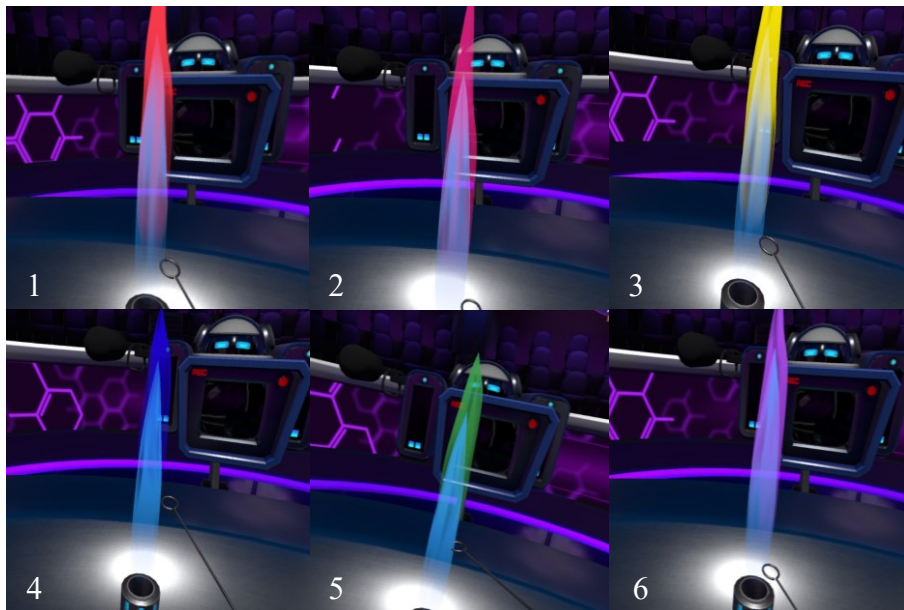


**Kuva 13.** Työskentelyalueen vasen ja oikea puoli. Vasemmalla korokkeella on tilasta poistumisvipu ja sen alla kameran säätimiä sekä kuvan yläosassa näkyy työskentelyvälineiden ja reagenssien palauttamiskahva. Oikealla korokkeella on suojalasit, ajastin ja niiden alla jäteastia.<sup>36</sup>

Työskentelyn voi aloittaa vapaasti heti, kun opiskelija on siirretty laboratorioon. Ohjeita seuraamalla ensimmäinen työvaihe on kuvan 14 mukaisesti bunsenlampun sytytys, josta laboratoriomuistikirjassa on tarkat ohjeet. Tämän jälkeen platinalankasilmukkaa puhdistetaan suolahapossa ja liekitetään, kunnes liekki ei enää värjäydy. Silmukan ollessa puhdas, sitä käytetään tutkittavassa reagenssissa ja viedään liekkiin. Tutkittavien reagenssien väriliekit näkyvät kuvassa 15. Lopuksi tunnistetut aineet dekantterilaseineen asetetaan merkittyihin palautuskohtiin ja vedetään palautusvipua. Ohjelmisto tarkastaa palautetut reagenssit vasemmalta oikealle ja pysähtyy väärän palautuksen kohdalle, jolloin kyseinen palautus on yritettävä uudelleen toisella reagenssilla. Pienet kontaminaatiot ovat hyväksyttäviä, mutta jos palautettu reagenssi on liian kontaminoitunut suolahapolla tai toisella reagenssilla, palautusta ei hyväksytä ja työskentely on aloitettava alusta puhtailla aineilla.



**Kuva 14.** Bunsenlampun sytytys ja platinasilmukan puhdistus.<sup>36</sup>



**Kuva 15.** Väriliekit tutkittaville reagensseille: 1. strontiumkloridi, 2. kalsiumkarbonaatti, 3. natriumnitraatti, 4. kuparikloridi, 5. bariumkloriidi ja 6. kaliumnitraatti.<sup>36</sup>

Kun palautus on tehty onnistuneesti, ohjelmisto tekee pistelaskennan. Pisteytys perustuu tarkkuuteen, joka tässä työssä koostuu palautettujen reagenssien määrästä ja puhtaudesta. Lisäksi nopeasta työskentelystä saa lisäpisteitä. Huolimaton työskentely johtaa rangaistuspisteiden saantiin, joka vähentää kokonaispistemäärää. Rangaistuspisteitä saa astioiden särkymisestä ja niiden heittämisestä työskentelyalueen ulkopuolelle. Reagenssien roiskuminen pöydälle tai lattialle johtaa myös rangaistuspisteiden saantiin ja liian vähäinen määrä liekkireagenssia loppupalautuksessa johtaa palautuksen hylkäämiseen ja työn alusta aloittamiseen.

## 5.2 VIRTUAALISEN JA TODELLISEN LIEKKIKOKEEN VERTAILU

Liekkikokeen suorittamista käydään seuraavaksi läpi vertaillen virtuaalista ja todellista liekkikoetta. Simuloidussa työskentelyssä VR-tilassa opiskelijalla on kaikki tarvittavat tarvikkeet heti saatavilla ja työskentely voidaan aloittaa välittömästi. Todellisessa maailmassa täytyy ensin huolehtia suojavarusteiden, kuten laboratoriotakin, suojalasien ja käsineiden

pukemisesta. Välineiden ja tutkittavien reagenssien etsiminen/saaminen ja järjestely vetokaappiin vie myös aikaa. Virtuaalisen bunsenlampun sytyttäminen onnistuu heti, mutta todellisen bunsenlampun sytytys vaatii ilmanottoaukon huomioimisen ja liekin säätämisen sopivaksi.

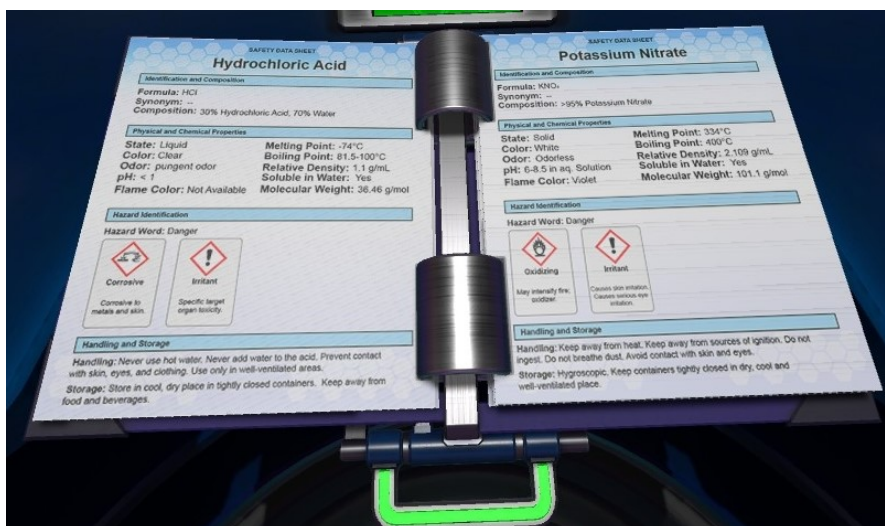
Todellisuudessa platinasilmukkaa ei käytetä liekkikokeissa. Platina on arvokas metalli liekkikokeisiin ja yleisemmin käytössä on nikkeli-kromi-lanka. Langan puhdistus tehdään kuitenkin samalla menetelmällä virtuaalisesti ja todellisesti sekä varsinaisten liekkikokeiden suoritus on samanlainen kummassakin tapauksessa. Todellisuudessa tutkittavia reagensseja ei anneta 400 ml dekanterilaseissa satojen grammojen määrissä ja usein liekkireagenssit ovat värillisiä. Tässä kohdassa Hololab Champions on virheellisesti virtualisoinut ja esittänyt käyttöturvallisuustiedotteessa kupari(II)kloridin ( $\text{CuCl}_2$ ) kiinteän värin valkoiseksi. Todellisuudessa  $\text{CuCl}_2$  on vedettömänä kellertävän ruskeaa ja käytännössä kosteutta absorboituaan kidevedellisenä vihertävän sinistä. Kiinteän kupari(I)kloridin ( $\text{CuCl}$ ) väri olisi valkoinen.

Itse liekkikokeessa liekki värjäytyy välittömästi tutkittavalla reagenssilla virtuaalisella mallinnuksella, mutta todellisuudessa liekkireagenssia pitää höyrystää aineesta riippuen useita sekunteja liekissä. Virtuaalisessa liekissä ei myöskään ole eri lämpötilagradientteja, joita voidaan hyödyntää todellisen liekin kanssa työskennellessä. Itse liekkien värit ovat virtuaalisesti helposti nähtäviä, joskin haastetta on strontiumin ja kalsiumin hyvin läheisissä värisävyissä. Tässä on hyvin päästy simuloimaan todellisen väriliekin sävyerojen tunnistamisen ongelmia silmämääräisessä havainnossa. Todellisessa liekkitestissä kuparille on haastavaa saada puhtaan sinistä liekkiä ja liekissä on hyvin usein mukana myös vihreän värisävyjä.

Virtuaalisen työn suoritusohjeet ovat laboratoriomuistikirjassa, jossa oleviin tiedotteisiin on lisätty todellisuudesta poiketen yhdistekohtaiset liekkivärit. Työssä ilmeisesti halutaan opiskelijan perehtyvän käyttöturvallisuuteen ja sinne kootut tiedot ovat hyvin tiivistetty käsittämään myös todellisuudessa laboratoriopäiväkirjaan koottavia yhdistekohtaisia tietoja. Kuvan 16 virtuaaliset tiedotteet sisältävät yhdisteen kemiallisen merkinnän ja koostumuksen, fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia, vaaratunnisteet sekä käsittely- ja säilytysohjeet.

Työturvallisuus on otettu huomioon minimaalisesti virtuaalisessa työskentelyssä ja ainoa käytössä oleva suojaväline on suojalasit. Huolimaton työskentely aiheuttaa rangaistuspisteitä loppupisteytykseen, mutta esimerkiksi pöydälle kaadetut reagenssit ja rikkoutuneet lasiastiat vain häviävät ja ohjelmisto ei anna tästä yksityiskohtaisempaa palautetta. Tämä toisaalta on myös eräs VR-tilan eduista, koska näin voidaan tehdä työskentelyvirheitä turvallisesti ja harjoitella asianmukaisia tapoja suorittaa laborointeja.





Kuva 16. Virtuaalinen suppea käyttöturvallisuustiedote.<sup>36</sup>

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Liekkikokeet ovat mieleenpainuvia kokemuksia opetuksessa menetelmän osalta, mutta teoreettinen tausta ei aina ole täysin selvää opiskelijoille. Varsinkin liekin värin yhdistäminen eri energiatasojen siirtymiin vaikuttaisi olevan teorian osa, jota kannattaa opetuksessa painottaa. Teoriaan voi olla hyödyllistä ottaa mukaan atomin elektronikonfiguraation ja energiatasokaavion yhdistelmä, josta voidaan selkeästi esittää eri viritystilojen purkautumisesta aiheutuvat fotonien emittoitumiset. Energiatilojen siirtymiset yhdistettynä viivaspektriin ja eri viivojen intensiteetteihin johdattelevat myös ymmärtämään analyyttisen kemian tutkimusmenetelmiä, kuten atomiemiissiospektroskopiaa ja atomiabsorptiospektroskopiaa. Näin voidaan linkittää kemian opetuksessa hyvin yksinkertaisesti toteutettava liekkikoe laajempiin kokonaisuuksiin ja hyvin tarkkoihin ja tärkeisiin analyysimenetelmiin.

Erilaisia liekkikokeita on tarjolla runsaasti ja sopivan liekkikoemenetelmän valinta on suoritettava aina opetustilanteen mukaan. Lukiossa saattaa opetuksessa painottua enemmän teoreettinen lähestymistapa ja käytännön harjoitusten osalta työskentelylle jää ajallisesti rajoitetut puitteet. Klassinen liekkikoe voidaan suorittaa suhteellisen nopeasti ja turvallisesti, varsinkin jos tarkoitus on tutkia tunnettuja liekkireagensseja ja liekistä tehdään silmämääräinen tunnistus. Ajan salliessa tutkimuspainotteisemmassa kemian opetuksessa voidaan liekin väriä kuvata optisella kuidulla ja saatu informaatio käsitellä sopivalla analyysiohjelmistolla. Joka tilanteessa on kuitenkin tärkeää kytkeä teoreettinen tausta ja liekkikokeen aikana tapahtuvat reaktiot vahvasti yhteen, jotta voidaan välttää virheellisten kognitiivisten mallien siirtyminen opintoasteelta toiselle.

Kuten perinteisesti tehdyissä liekkikokeissa, pitää virtuaalisen liekkikokeen yhteydessä käsitellä teoria selkeästi väriliekkien alkuperän selvittämiseksi. Hololab Champions -ohjelmisto sisältää menetelmälliset ohjeet, mutta ei varsinaista teoriaa liekkikokeista. Opiskelijat voidaan esimerkiksi ohjeistaa etsimään kirjallisuudesta liekkien väreille aallonpituudet ja sitä kautta laskemaan viritystilan purkautumisessa tapahtuvat energiatiilan muutokset. Nämä

tulokset liitettynä energiatasokaavioon kuvassa 5 esitetyn mallin mukaisesti sitovat teorian tiedot ja käytännön havainnot toisiinsa.

Virtuaalisten liekkikokeiden etuja ovat turvallisuus ja helppokäyttöisyys. Hololab Champions -ohjelmistoa käyttävän VR-järjestelmän voi asentaa parin neliömetrin alueelle ja tila voi olla missä tahansa sisätiloissa. Jos VR-laitteisto tietokoneineen on valmiiksi kytkettynä liikuteltavassa vaunussa, laitteiston pystytys onnistuu muutamassa minuutissa. Opiskelijat voivat työskennellä virtuaalilaboratoriossa joko itsenäisesti tai ryhmässä siten, että yksi opiskelija on VR-tilassa ja muut seuraavat ja ohjeistavat toimintaa erilliselle näytölle peilattua kuvasta. Virtuaaliset liekkikokeet eivät vielä tällä hetkellä korvaa perinteisiä liekkikokeita, mutta toimivat helposti järjestettävä lisänä opetukseen. Opetustilanteessa, jossa ei voida suorittaa todellisia liekkikokeita asiallisten laboratoriotilojen puuttuessa, virtuaaliset liekkikokeet johdattelevat opiskelijoita kemian käytännön laboratoriotyöskentelyyn.

## KIITOKSET

Ensimmäiset kiitokset kuuluvat työni ohjaajille, Karille, Leilalle ja Mikalle. Työn alkumetreillä he painottivat teoreettisen taustan tärkeyttä ja kokonaisuuden selkeyttä, joka auttoi rakentamaan johdonmukaisen rungon varsinaiselle kirjoitustyölle. Ohjaus on ollut kannustavaa ja palaverit informatiivisia ja sopivasti huumorilla höystettyjä.

HTC Vive -laitteiston lainasta kiitokset kuuluvat Itä-Suomen yliopiston tietotekniikkapalvelun henkilökunnalle. Ilman VR-laitteistoa, työstä olisi jäänyt tämän aikakauden teknologian mahdollistama osuus paljon vähäisemmäksi.

Kiitos myös veljelleni Tomille, joka sattui sopivasti paikalle rekrytoitavaksi avustamaan liekkitestien kuvaamisessa alkuvuoden napakassa pakkassäässä.

## VIITTEET

- (1) Bretz, S. L.; Murata Mayo, A. V. Development of the Flame Test Concept Inventory: Measuring Student Thinking about Atomic Emission. *J. Chem. Educ.* **2018**, *95* (1), 17–27. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00594>.
- (2) Opetushallitus. *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019*; **2019**. s. 256–257, 261–263, [https://www.oph.fi/sites/default/files/documents/lukion\\_opetussuunnitelman\\_perusteet\\_2019.pdf](https://www.oph.fi/sites/default/files/documents/lukion_opetussuunnitelman_perusteet_2019.pdf) (avattu 4.2.2022).
- (3) Oser, J. I. Flame Tests. *J. Chem. Educ.* **1928**, *5* (2), 192. <https://doi.org/10.1021/ed005p192.1>.
- (4) Clark, A. R. The Test-Tube Method for Flame Testing. *J. Chem. Educ.* **1935**, 242–243. <https://doi.org/10.1021/ed012p242>.
- (5) Clark, A. R. Test-Tube Flame Test Applied to the Rarer Elements. *J. Chem. Educ.* **1936**, 383–384. <https://doi.org/10.1021/ed013p383>.
- (6) Kiplinger, C. C. Paper for Platinum in Flame Tests. *J. Chem. Educ.* **1941**, *18* (6), 297. <https://doi.org/10.1021/ed018p297.2>.
- (7) Anderson, H.; Corwin, J. F. A Simple Method of Demonstrating Flame Tests. *J. Chem. Educ.* **1947**, *24* (9), 443. <https://doi.org/10.1021/ed024p443>.
- (8) Kiplinger, C. C. A Quantitative Sodium Flame Test. *J. Chem. Educ.* **1951**, *28* (DEC.), 641. <https://doi.org/10.1021/ed028p641>.
- (9) Pearson, R. S. An Improved Calcium Flame Test. *J. Chem. Educ.* **1985**, *62* (7), 622. <https://doi.org/10.1021/ed062p622>.
- (10) Ager, D. J.; East, M. B.; Miller, R. A.; Schilt, A. A. Vivid Flame Tests. *J. Chem. Educ.* **1988**, *65* (6), 545–546. <https://doi.org/10.1021/ed065p545>.
- (11) Gouge, E. M.; Wollaston, G. A Flame Test Demonstration Device. *J. Chem. Educ.* **1988**, *65* (6), 544–545. <https://doi.org/10.1021/ed065p544>.
- (12) Thomas, N. C.; Brown, R.; Grotz, L. C. A Spectacular Demonstration of Flame Tests. *J. Chem. Educ.* **1992**, *69* (4), 326–327. <https://doi.org/10.1021/ed069p326.2>.
- (13) Ragsdale, R. O.; Driscoll, J. A. Rediscovering the Wheel: The Flame Test Revisited. *J. Chem. Educ.* **1992**, *69* (10), 828. <https://doi.org/10.1021/ed069p828>.
- (14) McRae, R. A.; Jones, R. F. An Inexpensive Flame Test Technique. *J. Chem. Educ.* **1994**, *71* (1), 68. <https://doi.org/10.1021/ed071p68>.
- (15) Li, J.; Peng, A.-Z. Multiple Burning Heaps of Color-An Elegant Variation of a Flame Test. *J. Chem. Educ.* **1995**, *72* (9), 828. <https://doi.org/10.1021/ed072p828.1>.
- (16) Dalby, D. K.; Mosher, M. M. Bigger and Brighter Flame Tests. *J. Chem. Educ.* **1996**, *73* (1), 80–81. <https://doi.org/10.1021/ed073p80>.
- (17) Bare, W. D.; Bradley, T.; Pulliam, E. An Improved Method for Students' Flame Tests in Qualitative Analysis. *J. Chem. Educ.* **1998**, *75* (4), 459. <https://doi.org/10.1021/ed075p459>.
- (18) McKelvy, G. M.; Gilbert, G. L.; McWherter, C. Flame Tests That Are Portable, Storable, and Easy to Use. *J. Chem. Educ.* **1998**, *75* (1), 55–56. <https://doi.org/10.1021/ed075p55>.
- (19) Dragojlovic, V.; Richard F. Jones. Flame Tests Using Improvised Alcohol Burners. *J. Chem. Educ.* **1999**, *76* (7), 929. <https://doi.org/10.1021/ed076p929>.

- (20) Johnson, K. A.; Schreiner, R. A Dramatic Flame Test Demonstration. *J. Chem. Educ.* **2001**, *78* (5), 640. <https://doi.org/10.1021/ed078p640>.
- (21) Sanger, M. J.; Phelps, A. J. Simple Flame Test Techniques Using Cotton Swabs. *J. Chem. Educ.* **2004**, *81* (7), 969. <https://doi.org/10.1021/ed081p969>.
- (22) Sanger, M. J. Flame tests: Which Ion Causes the Color? *J. Chem. Educ.* **2004**, *81* (12), 969–970. <https://doi.org/10.1021/ed081p1776a>.
- (23) Blitz, J. P.; Sheeran, D. J.; Becker, T. L. An Improved Flame Test for Qualitative Analysis Using a Multichannel UV-visible Spectrophotometer. *J. Chem. Educ.* **2006**, *83* (2), 277–279. <https://doi.org/10.1021/ed083p277>.
- (24) Mortier, T.; Wellens, A.; Janssens, M.-J. Inexpensive Alcohol Burners for Flame Tests Using Aluminum Tea Light Candle Holders. *J. Chem. Educ.* **2008**, *85* (4), 522. <https://doi.org/10.1021/ed085p522.2>.
- (25) Thomas, N. C. Flames Tests with Flair. *J. Chem. Educ.* **2008**, *85* (4), 521. <https://doi.org/10.1021/ed085p521>.
- (26) Vitz, E. Demonstration extensions: Flame Tests and Electrolysis. *J. Chem. Educ.* **2008**, *85* (4), 522. <https://doi.org/10.1021/ed085p522.1>.
- (27) Landis, A. M.; Davies, M. I.; Landis, L.; Nicholas C. Thomas. “Magic Eraser” Flame Tests. *J. Chem. Educ.* **2009**, *86* (5), 577. <https://doi.org/10.1021/ed086p577>.
- (28) Baldwin, B. W.; Hasbrouck, S.; Smith, J.; Kuntzleman, T. S. Classroom Activity Connections: Demonstrating Various Flame Tests Using Common Household Materials. *J. Chem. Educ.* **2010**, *87* (8), 8–10. <https://doi.org/10.1021/ed100296s>.
- (29) Néel, B.; Crespo, G. A.; Perret, D.; Cherubini, T.; Bakker, E. Camping Burner-Based Flame Emission Spectrometer for Classroom Demonstrations. *J. Chem. Educ.* **2014**, *91* (10), 1655–1660. <https://doi.org/10.1021/ed4008149>.
- (30) Lee Yu, H. L.; Domingo, P. N.; Yanza, E. R. S.; Guidote, A. M. Making a Low-Cost Soda Can Ethanol Burner for Out-of-Laboratory Flame Test Demonstrations and Experiments. *J. Chem. Educ.* **2015**, *92* (1), 127–128. <https://doi.org/10.1021/ed500411v>.
- (31) Sari, S.; Magfiroh, E.; Irwansyah, F. S.; Farida, I.; Sobandi, O. Smartphones Application in Alkali Metal Flame Tests. *J. Phys. Conf. Ser.* **2019**, *1402* (5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/5/055033>.
- (32) Canal, J. P.; Sharma, R. D.; Taylor, H. N. A Convenient, Effective, and Safer Flame Demonstration. *J. Chem. Educ.* **2019**, *96* (10), 2261–2265. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b01010>.
- (33) Barrett, S. M.; Szalay, P. S.; Zook-Gerdau, L. A.; Schurter, E. J. Exploring Emission and Absorption Spectroscopy in the First-Year General Chemistry Laboratory. *J. Chem. Educ.* **2020**, *97* (11), 4097–4102. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00234>.
- (34) Antikainen, P. J. *Epäorgaaninen kvalitatiivinen analyysi*, 4. painos; WSOY: Porvoo, **1977**; s. 122-123.
- (35) Sigmann, S. B. Playing with Fire: Chemical Safety Expertise Required. *J. Chem. Educ.* **2018**, *95* (10), 1736–1746. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00152>.
- (36) *Hololab Champions*, versio 1.0; Schell Games: Pittsburgh, **2018**.
- (37) Institute of Education Sciences. <https://ies.ed.gov/funding/grantsearch/details.asp?ID=1925> (avattu 4.2.2022).
- (38) Russell, M. S. *The Chemistry of Fireworks*, 2. painos; Royal Society of Chemistry: Cambridge, **2009**; s. 108–116.

- (39) Knight, R. D. *Physics for Scientists and Engineers : a Strategic Approach with Modern Physics*, 4. painos; Pearson: Boston, **2017**; s. 1086–1088, 1121–1124, 1215–1221.
- (40) Young, H. D.; Sandin, T. R.; Ford, A. L.; Freedman, R. A. *University Physics : with Modern Physics*, 10. painos; Addison-Wesley: San Francisco (CA), **2000**; s. 1231–1243, 1331–1332.
- (41) Housecroft, C. E.; Sharpe, A. G. *Inorganic Chemistry*, 4. painos; Pearson Education: Harlow, **2012**; s. 4–6, 9–10, 117, 329–330, 351.
- (42) Hon, G.; Goldstein, B. R. J. Thomson's Plum-Pudding Atomic Model: The Making of a Scientific Myth. *Ann. Phys.* **2013**, 525 (8–9), A129–A133. <https://doi.org/10.1002/andp.201300732>.
- (43) Thomson, G. P. J.J. Thomson. <https://www.britannica.com/biography/J-J-Thomson> (avattu 4.2.2022).
- (44) Badash, L. Ernest Rutherford. <https://www.britannica.com/biography/Ernest-Rutherford> (avattu 4.2.2022).
- (45) Aaserud, F. Niels Bohr. <https://www.britannica.com/biography/Niels-Bohr> (avattu 4.2.2022).
- (46) Kaku, M. Albert Einstein. <https://www.britannica.com/biography/Albert-Einstein> (avattu 4.2.2022).
- (47) Gaupp, A.; Kuske, P.; Andra, H. J. Accurate Lifetime Measurements of the Lowest  $^2P_{1/2}$  States in Neutral Lithium and Sodium. *Phys. Rev. A.* **1982**, 26 (6), 3351–3359. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.26.3351>.
- (48) Kramida, A.; Ralchenko, Y. NIST Atomic Spectra Database Lines Data. <https://physics.nist.gov/asd> (avattu 4.2.2022).
- (49) Appling, J. R.; Yonke, F. J.; Edgington, R. A.; Jacobs, S. Sodium D Line Emission from Pickles. *J. Chem. Educ.* **1993**, 70 (3), 250. <https://doi.org/10.1021/ed070p250>.
- (50) Britannica. Joseph von Fraunhofer. <https://www.britannica.com/biography/Joseph-von-Fraunhofer> (avattu 4.2.2022).
- (51) Britannica. Gustav Kirchhoff. <https://www.britannica.com/biography/Gustav-Robert-Kirchhoff> (avattu 4.2.2022).
- (52) Julie, G. Visible Spectra of the Elements. <http://umop.net/spectra/> (avattu 4.2.2022).
- (53) Field Tested Systems. <https://store.fieldtestedsystems.com/collections/for-your-classroom/products/periodic-table-of-spectra> (avattu 4.2.2022).
- (54) Antila, A.-M.; Koskentalo, T.; Toivonen, J.; Yliruokanen, I. *Analyttisen kemian harjoitustyöt, Ionien reaktioita*, 13. painos; Otatieta: Helsinki, **2010**; s. 15–27, 65.
- (55) Laboratory Manual Chemistry; National Council of Educational Research & Training: New Delhi, **2018**; s. 64–65. <https://ncert.nic.in/pdf/publication/sciencelaboratorymanuals/classXII/chemistry/lelm107.pdf> (avattu 8.2.2022).
- (56) Clark, M. J. Temperatures of a Bunsen Flame. *Aust. Sci. Teach. J.* **1999**, 45 (3), 39.
- (57) Tolstoguzov, R. V. Temperature Measurements in a Bunsen Flame by Planar Laser-Induced Fluorescence. *J. Phys. Conf. Ser.* **2020**, 1677 (1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1677/1/012045>.
- (58) Epäorgaanisen kemian aineopintojen työt, Ionireaktiot, Itä-Suomen yliopisto, Kemian laitos, **2021**; s. 11–12.
- (59) Amador, C.; Liu, F. W.; Johnson-Glenberg, M. C.; Likamwa, R. Work-in-Progress-Titration Experiment: Virtual Reality Chemistry Lab with Haptic Burette. *Proc. 6th Int. Conf. Immersive Learn. Res. Network, iLRN 2020* **2020**, Nro iLRN, 363–365. <https://doi.org/10.23919/iLRN47897.2020.9155209>.

- (60) Wu, B. J.; Wong, S. K.; Li, T. W. Virtual Titration Laboratory Experiment with Differentiated Instruction. *Comput. Animat. Virtual Worlds* **2019**, *30* (3–4), 1–11. <https://doi.org/10.1002/cav.1882>.
- (61) De Levie, R. A General Simulator for Acid-Base Titrations. *J. Chem. Educ.* **1999**, *76* (7), 987–991. <https://doi.org/10.1021/ed076p987>.
- (62) Agbonifo, O. C.; Sarumi, O. A.; Akinola, Y. M. A Chemistry Laboratory Platform Enhanced with Virtual Reality for Students' Adaptive Learning. *Res. Learn. Technol.* **2020**, *28* (1063519), 1–9. <https://doi.org/10.25304/rlt.v28.2419>.
- (63) Weymuth, T.; Reiher, M. Immersive Interactive Quantum Mechanics for Teaching and Learning Chemistry. *Chimia (Aarau)*. **2021**, *75* (2), 45–49. <https://doi.org/10.2533/chimia.2021.45>.
- (64) *Nanome*, versio 1.20.0; Nanome Inc.: San Diego, **2018**.
- (65) *Labster*, versio 2022; Labster ApS: Kööpenhamina, **2013**. <https://www.labster.com/try/> (avattu 4.2.2022).
- (66) Broyer, R. M.; Miller, K.; Ramachandran, S.; Fu, S.; Howell, K.; Cutchin, S. Using Virtual Reality to Demonstrate Glove Hygiene in Introductory Chemistry Laboratories. *J. Chem. Educ.* **2021**, *98* (1), 224–229. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00137>.
- (67) Schell Games. A Virtual Reality Lab Experience Classroom Guide; **2018**; s. 10–14, 28, 70–73. [https://cdn.schellgames.com/images/Microsites/hololab-champions/resources/HoloLABChampions\\_TeacherGuide\\_ip.pdf](https://cdn.schellgames.com/images/Microsites/hololab-champions/resources/HoloLABChampions_TeacherGuide_ip.pdf) (avattu 4.2.2022).