

# Erotusmenetelmien tutkimuspohjainen opettaminen lukiossa

Lauri Nissinen, Maria Pajunen, Sara Parikka ja Saara Salo

Kemian opettajankoulutusyksikkö, Kemian osasto, Helsingin yliopisto

**Tiivistelmä:** Tämän projektityön tavoitteena oli kehittää tutkimuspohjainen oppimateriaalikonaisuus erotusmenetelmien opettamisen tueksi. Halusimme tutkimuskirjallisuuden, opetussuunnitelman ja oppikirjojen sekä työssä käyvän opettajan näkemysten avulla luoda mielekkään pedagogisen pohjan opetukselle. Tutkimuskirjallisuuden keskeisiä teemoja ovat opetukselliset haasteet, kokeellisuus, motivointi ja oppimista tukevat menetelmät tai pedagogiset lähestymistavat. Sekä peruskoulun että lukion opetussuunnitelmat painottavat tutkimuksellisuutta, itsenäistä ajattelua sekä kemian soveltamista arkipäiväisissä ilmiöissä. Oppimateriaalitarjonnan haaste luo tarpeen kehittää uusia pedagogisia ratkaisuja oppimisen tukemiseksi. Päädyimme ehdottamaan vaiheittaista aiheeseen tutustumista, jossa aiheeseen ensin perehdytään konseptuaalisella tasolla. Juuri ennen kokeellista osuutta, konseptuaalista ja konkreettista tasoa tuodaan yhteen opetustuokion avulla. Lopuksi käytetään opittua menetelmää osana kokeellista laboratoriotyöskentelyä. Opetuskokonaisuusehdotuksemme pedagogisten näkökulmien haasteena onkin niiden soveltuvuus esimerkiksi lukion kemian opetukseen, jossa sisällöllisiä tavoitteita on useita ja resurssit, kuten aika, väistämättä ohjaavat aina jonkin verran opetusta. Samalla pedagogiset ratkaisut kuitenkin painottavat sellaisia opetuksellisia näkökulmia, jotka on hyvä ottaa huomioon opetusta järjestettäessä aiheesta riippumatta.

**Asiasanat:** erotusmenetelmät, ohutlevykromatografia, TLC

## 1 Johdanto

Esittelemme tässä artikkelissa erotusmenetelmiin, tarkemmin vielä ohutlevykromatografiaan, liittyviä opetuksellisia näkökulmia ja haasteita. Tukirangaksi muodostuu tieteellisen tutkimuskirjallisuuden viitekehys, opetussuunnitelman ja oppikirjojen näkökulma sekä työssä käyvän opettajan neuvot aiheeseen liittyen. Tavoitteena on rakentaa näiden pohjalta mielekäs pedagoginen opetusmalli erotusmenetelmien, erityisesti ohutlevykromatografian, opetukseen.

Aiheen valintaan vaikutti tekijöiden pohdinnat ohutlevykromatografian haasteellisuudesta sekä sisällöllisenä että pedagogisena aiheena. Halusimme kehittää eri tietolähteiden avulla mielekkään pedagogisen pohjan, jonka avulla opettaja voi helposti toteuttaa aiheen opetuksen koulussa. Tutkimuskirjallisuus antaa osittain viitteitä toimivista opetustyyleistä aiheeseen liittyen mutta tarvitsimme myös aihetta



käsittelleen opettajan näkemystä aiheeseen, jotta suunnitellusta opetusmallista tulisi mahdollisimman mielekäs.

Alkuun luodaan katsaus tutkimuskirjallisuuteen, joissa keskeisiksi pedagogisiksi kulmakiviksi nousee PDEODE-menetelmä sekä vaiheittainen aiheeseen perehtyminen. Oppilailla on usein vaihtoehtoisia käsityksiä ohutlevykromatografiaan liittyen, jotka saattavat muiden oppimisen haasteiden ohella hankaloittaa aiheen opettamista. Tästä syystä aiheen opettamisen on syytä olla pedagogisesti perusteltua ja sisällöltään mielekästä. Tätä pohdintaa avataan tarkemmin luvussa 2.

Erotusmenetelmät ovat opetussuunnitelmassa mainittu ja esiintyvät sekä peruskoulun että lukion kemian oppikirjoissa. Usein kromatografiset menetelmät saattavat jäädä irralliseksi kokonaisuudeksi muiden erotusmenetelmien ohella ja niiden syvälinen ymmärrys jää oppilaan omalle vastuulle. Aihe koetaan sekä haastavaksi että abstraktiksi verrattuna muihin suoraviivaisempiin erotusmenetelmiin, kuten tislaukseen. Useat oppikirjat tukeutuvatkin tutkimuksellisuuteen ja kokeelliseen lähestymistapaan, jotta aihetta olisi helpompi ymmärtää.

Ohutlevykromatografian ympärille luotu konteksti on avain asemassa työn mielekkyydessä ja oppilaiden motivoimisessa. Tämän takia olemme koonneet napakan historiallisen ja kemiallisen tietopaketin kromatografiaan liittyen sekä liittäneet kokeellisen työn arkielämästä tuttuihin reagensseihin, elintarvikereihin. Kehittelemämme kokeellinen työ on siis oppilaille mielenkiintoinen ja sen konteksti motivoiva.

## **2 Tutkimuskirjallisuuden katsaus**

Tässä luvussa käsittelemme tutkimuskirjallisuuden näkökulmaa erotusmenetelmien opettamiseen. Keskeisimpiä teemoja ovat opetukselliset haasteet, kokeellisuus, motivointi ja oppimista tukevat menetelmät tai pedagogiset lähestymistavat. Luvun keskeisimmät havainnot on koottuna Taulukkoon 1.

Erotusmenetelmien, kuten muidenkin laboratoriotöissä tarvittavien työtapojen, oppimisen haasteina voidaan pitää laboratoriokurssien tavoitteiden laajuutta, jotka eivät aina välttämättä tue opiskelijoiden tapaa oppia. Yleensä oppimisen kohteita on samanaikaisesti useita, jolloin työskentely on tasapainottelua työmenetelmien oppimisen ja niistä suoriutumisen sekä abstraktien konseptien käytäntöön

yhdistämisen välillä. Näiden lisäksi huomio kiinnittyy myös työturvallisuuden ylläpitoon sekä aineiden oikeaan käsittelyyn. Haasteita oppimisen kannalta aiheuttaa myös opiskelijoiden keskittyminen töiden ja kurssin valmiiksi saattamiseen abstraktien ilmiöiden ja käytännön työn yhdistymisen kustannuksella. (Wu et al., 2019.) Motivaation suuntautumisen ja oppimisen kannalta onkin aiheellista pohtia kuinka suunnata oppimisympäristö oppimista eikä ainoastaan suorittamista kohden. Fagundes, Dutra, Ribeiro, Epifanio, & Valverde (2016) nostavat esiin kemian ja erotusmenetelmien opetuksessa oppilaita motivoivana tekijänä oppilasta lähellä olevat arkiset aiheet ja tuotteet, kuten ruoka, lääkkeet ja kosmetiikka. Myös tutkimuksellisuus tai kokeellisuus nähdään kiinnostusta ja motivaatiota herättävänä tekijänä kemian (Herranen, Tuomisto, & Aksela, 2015), ja niin myös erotusmenetelmien, oppimisessa. Kokeellisen tai laboratoriotyöskentelyn yksi tarkoituksista on kiinnostuksen herättämisen ohella tieteellisen kompetenssin vahvistaminen (Chen, She, Chou, Tsai, & Chiu, 2013). Chen et al. (2013) katsovat tämän tapahtuvan tieteellisten ilmiöiden havainnoimisen, omin käsin toteutettujen kokeellisten töiden sekä kehittyvien tutkimuksellisten ja ongelmanratkaisutaitojen kautta.

Gabel (1999) nostaa kemian opetuksen haasteista esiin mm. ennakoivat tai vaihtoehtoiset käsitykset, joiden pohjalle oppilaan kemiaa koskeva tietoisuus alkaa rakentua. Hän mainitseekin, että opetuksessa tulisi käyttää aikaa näihin vaihtoehtoisiin käsityksiin perehtymiseen varsinkin useiden kemian käsitteiden abstraktin luonteen vuoksi. Myös Coştu, Ayas, & Niaz (2010) kirjoittavat vaihtoehtoisten käsitysten vaikuttavan oppimiseen, minkä vuoksi opetuksen järjestäjältä vaaditaan ymmärrystä ja tietoa näistä edeltävistä käsityksistä. Vaihtoehtoisten käsitysten tuomia haasteita lisää usein se, että ne ovat varsin syvään juurtuneita käsityksiä ja erilaisten vaihtoehtoisten käsitysten määrä voi olla laaja luokkahuoneessa. Myös erotusmenetelmiin liittyy laaja joukko erilaisia vaihtoehtoisia käsityksiä. (Coştu et al., 2010.) Wu et al. (2019) kertovat ohutlevykromatografian opetukseen liittyvän tutkimuksensa perusteella ennakoivien tai vaihtoehtoisten käsitysten liittyvän käsitteiden ja konseptien sekoittumiseen keskenään, kuten molekyylien väliset vuorovaikutukset vs. molekyylien sisäiset sidokset, ja väärinymmärryksiin siitä, mihin TLC perustuu ja miten se toimii. Coştu et al. (2010) puolestaan mainitsevat esimerkiksi haihduttamiseen liittyvien vaihtoehtoisten käsitysten liittyvän usein kiehumiseen, haihtumiseen avoimessa ja suljetussa systeemissä, lämmön tuomiseen systeemiin ja dynaamiseen tasapainotilaan.

Haasteita aiheuttaa myös haihtumisen ymmärtäminen aineen rakenneosien tasolla (Coştu et al., 2010). Paik (2015) kirjoittaa samasta asiasta ja nostaa esille kiehumisen ja haihtumisen sekoittuvan usein käsitteellisellä tasolla. Opetustilanteen ja opetuspuheen haasteisiin liittyykin arkikielen termistö, joka toisinaan käyttää samaa käsitettä eri merkityksellä kuin tieteellinen konteksti (Gabel, 1999). Ratkaisuksi Coştu et al. (2010) ehdottavat oppimismenetelmää, joka saisi aikaan muutoksen konseptuaalisen ymmärryksen tasolla. Tutkimuksessa hyödynnetty PDEODE-menetelmä (alun perin Savander-Ranne & Kolari (2003)) sisältää ennakoimisen, keskustelun, selityksen, havainnoimisen sekä jälleen keskustelun ja selityksen. Tällöin opetuksessa kyetään huomiomaan niin vaihtoehdotiset käsitykset kuin tieteelliseen selitykseen tarkemmin perehtyminen, mikä edesauttaa muutosta konseptuaalisella tasolla. (Coştu et al., 2010.)

Paik (2015) nostaa esille vaihtoehtoisten käsitysten ja riittämättömien esimerkkien välisen suhteen; riittämättömät esimerkit voivat jopa aiheuttaa vaihtoehtoisia käsityksiä. Näin voi tapahtua esimerkiksi silloin, kun abstraktia konseptia havainnollistetaan konkreettisella esimerkillä, joka kuitenkin kattaa abstraktista ilmiöstä vain pienen osan. Tällöin esimerkin rajoitteisuus ja esimerkkien riittämättömyys voi olla synnyttämässä vaihtoehtoisia käsityksiä, jotka puolestaan tuottavat haasteita oppimiselle. (Paik, 2015.) Toisinaan erotusmenetelmiä opiskeltaessa vaikeudet sijoittuvat konseptuaalisen ymmärryksen ja käytännön työmenetelmien risteämään. Raydo, Church, Taylor, Taylor, & Danowitz (2015) mainitsevat esimerkiksi neste-neste-uuttoon liittyen, että usein vaikeudet esiintyvät päätelmiä tehtäessä ja tuloksia analysoitaessa, kun epäselväksi on jäänyt se, millä perusteiden yhdiste liukenee eri liuotinfaseihin. Käytännön laboratoriotöitä tehtäessä konseptuaalinen ymmärrys ei aina yhdisty käsiteltävään työhön, jolloin esimerkiksi voi jäädä huomiotta se, että eri muuttujat, kuten liuoksen pH, vaikuttavat yhdisteen rakenteeseen ja jakautumiseen eri liuotinten välille. Raydo et al. (2015) ehdottavat uuton opetuksessa hyödynnettävän esimerkiksi selviä värejä yhdisteissä, jolloin yhdisteen liukoisuus liuotinkerrokseen olisi nopeasti ja selkeästi nähtävissä ja tulokset analysoitavissa helposti. Tällöin havainnot tukevat konseptuaalisen tason oppimista. (Raydo et al., 2015.)

Toisinaan erotusmenetelmän suorittaminen voi vaikuttaa kohtuullisen osaavasti suoritelta, mutta Chen et al. (2013) huomauttavat, että haasteita voi tällöinkin ilmetä myös taitojen tai ymmärryksen yksittäisillä osa-alueilla. Fagundes et al. (2016) nostavatkin erotusmenetelmien opetuksen pedagogisessa lähestymistavassa

keskeiseksi sen, että kokeiden tekoon yhdistetään aiheeseen liittyvät keskustelut ja pohdinnat. Wu et al. (2019) puolestaan ehdottavat vaiheittaista aiheeseen perehtymistä, jolloin huomio ja oppiminen keskittyy tiettyyn konseptuaaliseen vaiheeseen kerrallaan. Wu et al. (2019) käsittelevät tutkimuksessaan mielekästä tapaa oppia ohutlevykromatografiasta, ja heidän mielekkään laboratorio-oppimisen mallin mukainen opetuksen rakentaminen koostuu laboratorioviikkoa edeltävästä luennosta, jolloin aiheen kyseiseen osa-alueeseen perehdytään konseptuaalisella tasolla, laboratoriotyöskentelystä, jolloin käytännön työskentely kohdistuu edeltäneen luennon teemaan käytännössä sekä juuri ennen laboratoriotyöskentelyä edeltävästä lyhyestä opetustuokiosta, joka ohjaa sidosteisesti konseptuaaliselta tasolta konkreettiselle tasolle. Mielekkään oppimisen varmistamiseksi opitun hyödyntämistä jatketaan lukuvuoden aikana uusissa konteksteissa. (Wu et al., 2019.) Erotusmenetelmien oppimisen kannalta onkin siis keskeistä huomioida Gabelinkin (1999) artikkelissaan esiin nostamia kemian opetukselle keskeisiä haasteita, joita ovat käsitteiden kompleksisuus, aineen ilmaisuun käytettävät tasot (abstrakti vs. konkreetti) sekä niiden keskinäinen yhteys, kokeellisuuden haasteet, käytetty kieli sekä opetuksen lähtökohdat ja rakenne.

Taulukko 1. Tutkimuskirjallisuuden keskeiset havainnot.

<b>Oppimisen haasteita</b>	Vaihtoehtoiset käsitykset. Tavoitteiden laajuus laboratoriotöissä/kokeellisissa töissä. Konseptien ja käsitteiden keskenään sekoittuminen. Riittämättömät esimerkit saattavat synnyttää vaihtoehtoisia käsityksiä. Puutteet osataidoissa toisinaan vaikea havaita. Arkikielen termistö, joka toisinaan käyttää samoja sanoja tieteellisen termistön kanssa eri merkityksin.
<b>Motivoiminen opetuksessa</b>	Arkiset aiheet ja tuotteet. Kokeellisuus, tutkimuksellisuus.
<b>Menetelmiä oppimisen tukemiseksi:</b>	
- Selkeät esimerkit (Raydo et al., 2015)	Kokeellisuudessa käytettävien aineiden valinta niin, että havainnot selkeitä ja näin ne tukevat konseptuaalisen tason oppimista.
- Kokeellinen & keskustelut (Fagundes et al., 2016)	Kokeelliseen työskentelyyn yhdistetään keskusteleminen ja pohtiminen.
- PDEODE-menetelmä (Coştu et al., 2010; alun perin Savander-Ranne & Kolari, 2003)	”ennakoi, keskustele, selitä, havainnoi, keskustele, selitä” Vaihtoehtoiset käsitykset huomioidaan, tieteelliseen selitykseen perehdytään tarkemmin --> edesauttaa konseptuaalisen tason muutosta.
- Vaiheittainen aiheeseen perehtyminen (Wu et al., 2019)	1. Aiheen tiettyyn osa-alueeseen perehdytään konseptuaalisella tasolla luentomaisesti. 2. Juuri ennen kokeellista/laboratoriotyöskentelyä opetustuokio, jossa konseptuaalista ja konkreettista tasoa tuodaan yhteen. 3. Kokeellinen/laboratoriotyöskentely, jossa luennon aihe käytännössä.

---

- Vaiheittaisuus myös tietyn menetelmän opiskelussa, esim. TLC (Wu et al., 2019)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Opetellaan ja harjoitellaan menetelmää ”mekaanisesti”.</li> <li>2. Harjoitellaan menetelmän käyttöä uudessa kontekstissa.</li> <li>3. Käytetään opittua menetelmää osana tutkimuksellisuutta/ongelmanratkaisua.</li> </ol>
--	--

---

### 3 Opetussuunnitelmien perusteet ja oppikirjat

Tässä luvussa perehdytään opetussuunnitelman perusteisiin sekä kemian oppikirjojen näkökulmaan erotusmenetelmistä. Sekä peruskoulun että lukion opetussuunnitelmat painottavat tutkimuksellisuutta, itsenäistä ajattelua sekä kemian soveltamista arkipäiväisissä ilmiöissä. Erotusmenetelmät mainitaan selvästi LOPSissa KE1-kurssin sisällössä. Oppikirjoissa erotusmenetelmät tulevat esille peruskoulussa ja lukiossa kohtalaisen samaan tyyliin, vaikkakin lukion oppikirjoissa hieman laajemmin. Myös oppikirjan iällä on vaikutusta siihen, miten ja millä laajuudella asiaa käsitellään.

#### 3.1 Opetusmenetelmien perusteet

Lukion opetussuunnitelmissa (2015) korostetaan arkielämän ilmiöiden ymmärtämistä siten, että niiden makroskooppinen, mikroskooppinen ja symbolinen taso muodostavat loogisen kokonaisuuden. Kokeellisuus ja tutkimuksellisuus tukee käsitteiden omaksumista ja ymmärtämistä sekä luonnontieteiden luonteen hahmottamista. Eräs lukion opetussuunnitelmien tavoite onkin, että oppilas kykenisi suunnittelemaan ja toteuttamaan kokeellisia tutkimuksia turvallisesti ja yhteistyössä muiden kanssa. Tähän liittyy myös tulosten tulkinnan ja analysoinnin taidot, jotka mainitaan kemian tavoitteissa.

Erotusmenetelmät yhtyvät kiinteästi em. ohella lukion opetussuunnitelmissa (2015) mainintaan “elinympäristöön liittyvien aineiden ja ilmiöiden havainnointi ja tutkiminen”. Erotusmenetelmistä on myös suora maininta KE1-kurssin eräänä sisällöllisenä kokonaisuutena sekä vanhemmassa (2015) että uudemmassa (2019) opetussuunnitelmassa.

Perusopetuksen opetussuunnitelmassa (POPS, 2014) ei ole varsinaisesti suoraa mainintaa erotusmenetelmistä toisin kuin lukion opetussuunnitelmassa (LOPS). Erotusmenetelmät kuitenkin tulevat S1- osiossa, jossa sisällöllisesti painotetaan tutkimuksellisuutta oppilaita motivoivissa sisältöalueissa sekä koejärjestelyn suunnittelua, toteutusta, tulosten koontia ja havainnointia.

### 3.2 Oppikirjojen näkökulma

Erotusmenetelmät ovat keskeinen kemian osa-alue sekä peruskoulun että lukion kemian opintojen alkuvaiheessa. Peruskoulussa erotusmenetelmien läpikäynti ajoittuu 7. luokan kemian osuuteen ja lukiossa erotusmenetelmät tulevat heti KE1-kurssin alkupuolella.

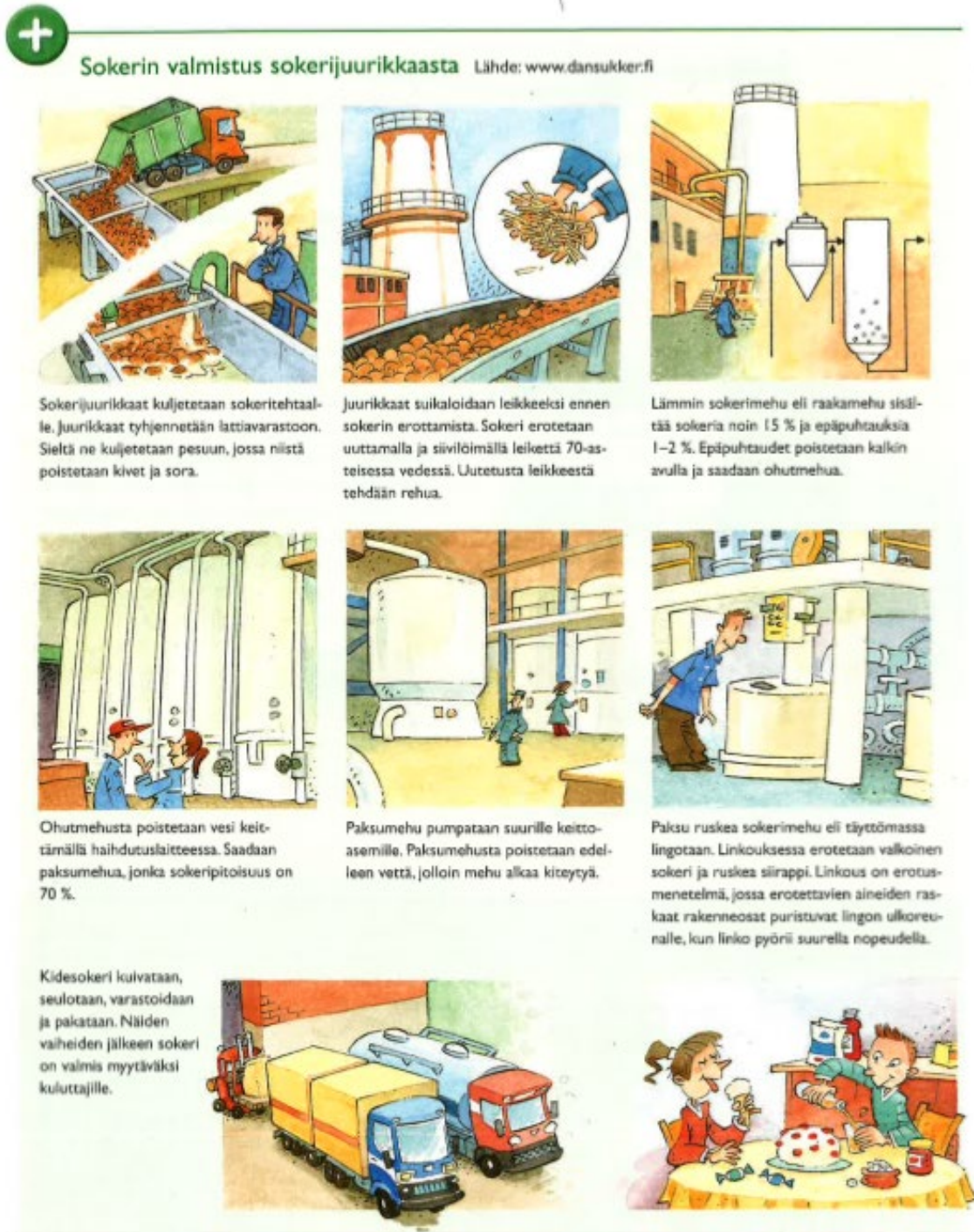
Peruskoulussa ja lukiossa on kuvilla, joissain tapauksissa myös videolla, esitetty erilaisia erotusmenetelmiä ja niihin liittyviä laitteistoja. Jokainen erotusmenetelmä on lisäksi kuvailtu lyhyesti sanallisesti ja kerrottu mihin sen toiminta perustuu. Erotusmenetelmiin liittyvistä työvälineistä keskeisimpiä ovat mm. dekantterilasi, kaasupoltin, haihdutusmalja, jäähdytin sekä (erotus)suppilo, jotka oppilaan tulee hallita peruskoulun materiaaleihin liittyvissä tehtäväkirjoissakin, kuten Titaani, kemia Tehtävät 1 -kirjassa (Muilu & Virtanen, 2016).

Peruskoulussa erotusmenetelmät tulevat heti seoksen ja puhtaiden aineiden sekä aineen olomuotojen teoriaosuuden jälkeen. Oppilaan on siis hallittava olomuodon muutoksiin ja seoksiin liittyvät käsitteet, jotta erotusmenetelmien prosesseja voidaan ymmärtää. Tämä on luonnollista, sillä erotusmenetelmät perustuvat aineiden erilaisiin kiehumis- ja sulamispisteisiin sekä erilaisiin kemiallisiin ominaisuuksiin, kuten liukoisuus, tiheys ja hiukkaskoko.

Jokaisessa tutkitussa peruskoulun oppikirjassa seosten erotusmenetelmiin on käytetty yksi noin 5-8 sivun mittainen kappale. Opettaja loppupeleissä päättää, miten asia käydään läpi mutta eri kustantajien ja OPSien mukaisissa kirjoissa kappaleen sisäinen läpikäynti järjestys poikkeaa hieman toisistaan. Uudemmissa oppikirjoissa Ilmiö kemia 7-9 (Ikonen, Tuomisto, & Ojala, 2016), Avain Kemia 1 (Happonen, Heinonen, Muilu, Nyrhinen, & Saarinen, 2011) ja Titaani kemia 7-9 (Muilu & Virtanen, 2017) erotusmenetelmien läpikäynti aloitetaan kokeellisesti, eli erotusmenetelmiin tutustutaan kokeilemalla niitä itse. Töissä erotusmenetelminä käytetään mm. suodatusta, tislausta, uuttoa sekä haihduttamista. Olennaisesti työt eivät ole kovin vaikeita tehdä ja yksinkertaisuudessaan ovat helposti ymmärrettäviä ja toteutettavia, esimerkiksi suolan ja hiekan erottaminen toisistaan näiden seoksesta.

Hieman vanhemmissa oppikirjoissa, kuten Fyke 7-9 Kemia (Kangaskorte, Lavonen, Penttilä, Pikkarinen, Saari, Sirviö, Vakkilainen, & Viiri, 2010), erotusmenetelmät käydään enemmän teoriapainotteisesti läpi ja tekstin sekaan tai loppuun on upotettu muutama työ. Uusissa ja vanhoissa oppikirjoissa esiintyy kummassakin erotuskaavio, joilla pyritään havainnollistamaan erotusmenetelmän

prosessia ja komponenttien erottamista toisistaan. Hieno esimerkki erotusmenetelmien hyödyntämisestä yhteiskunnassa isommalla skaalalla löytyy vanhemman POPSin mukaisesta oppikirjasta Fyke 7-9 Kemia (Kangaskorte et al., 2010). Tässä kuvataan sokerijuurikkaan valmistusta tehtaassa ja lopullisen tuotteen valmistamiseen vaadituista erotusmenetelmistä (Kuva 1). Saman tyyppinen esitys bensiinin valmistuksesta löytyy Avain Kemia 1 -kirjasta (Happonen et al., 2011).



Kuva 1. Sokerijuurikkaan prosessi tehtaassa. Kuvaa voi käyttää oppitunnilla virittäytymiseen. Esitetty FYKE 7–9 -teoksessa (Kangaskorte et al., 2010).

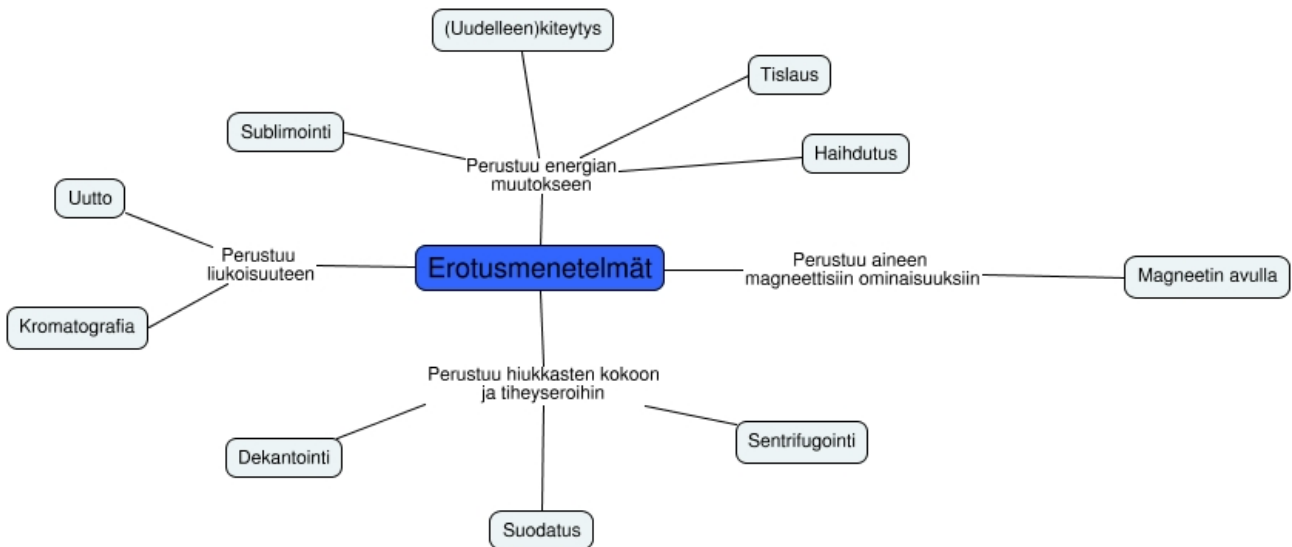


Lukiassa erotusmenetelmien läpikäynti rakennetaan peruskoulun tapaan olomuotojen sekä seoksen ja puhtaan aineen teorian päälle. Laajuudeltaan ja sisällöltään lukiossa käydään lähes samaan tapaan erotusmenetelmät kuin peruskoulussa. Poikkeus löytyy kuitenkin hieman vanhemmasta Kide 1- kirjasta (Kalkku, Kalmi, & Korvenranta, 1999), jossa erotusmenetelmiä ei käydä ollenkaan erillisenä kappaleena läpi, vaan ne tulevat käytännössä yhden kirjan lopussa olevan kokeellisen työn kautta tutuiksi.

Muutamina eroavaisuuksina lukion ja peruskoulun välillä on sublimointi erotusmenetelmänä, imusuodatus, faasi- käsite sekä kromatografian  $R_f$  -arvojen määrittäminen, jotka tulevat kaikki vasta lukiossa. Lukiossa on myös työskentelyn tueksi laajuudeltaan isompia ja vaativampia kokeita, joissa on useita työvaiheita.

Taulukko 2. Lukiossa ja peruskoulussa esiintyvät erotusmenetelmät.

Käsite	Käsitteen merkitys
Dekantointi	Erotusmenetelmä, jolla liuos voidaan erottaa kiinteästä aineesta. Vaatii, että seoksessa oleva kiinteä komponentti on liuokseen liukenematon ja tiheämpää kuin itse liuotin. Esim. hiekanjyvien erottaminen vedestä.
Haihdotus	Seoksen liuottimen poisto lämmittämällä seosta. Voidaan määrittää esimerkiksi veteen liuenneiden yhdisteiden tarkka massa.
Kromatografia	Menetelmä, jossa erilaiset aineet erottuvat paikallaan pysyvän ja liikkuvan faasin välillä; kromatografisia menetelmiä käytetään seosten komponenttien erottamiseen ja tunnistamiseen.
(Uudelleen)kiteytys	Aineen saattamista kiteiseen muotoon. Kiinteiden aineiden puhdistusmenetelmä, jossa käytetään hyväksi tuotteen ja epäpuhtauksien liukoisuuseroja.
Magneetin avulla	Seoksesta eristetään magneettinen aine ei-magneettisesta aineesta. Esim. Rautajauheen poisto rautahiekka seoksesta.
Sentrifugointi	Pyörimisliikkeen keskipakovoimaan perustuva erotusmenetelmä, jossa nestepitoisesta seoksesta voidaan erottaa eri tiheyksiset olomuotoalueet.
Sublimointi	Soveltuu käytettäväksi seoksille, joissa kiinteä komponentti muuttuu suoraan kiinteästä kaasuksi ja tämän jälkeen uudestaan kaasusta kiinteäksi (=härmistyy) kylmälle pinnalle.
Suodatus	Erotusmenetelmä, jolla kiinteä aine erotetaan nesteestä tai liuoksesta. Voidaan tehdä painovoiman vaikutuksella tai alipaineessa imusuodatuksella.
Tislaus	Erotusmenetelmä, jossa hyödynnetään aineiden erilaisia kiehumispisteitä. Käytetään haihduttamisen sijaan silloin, kun halutaan liuotin myös talteen.
Uutto	Erotusmenetelmä, jossa eristettävä aine erotetaan seoksesta liuottamalla aine sopivan liuottimen avulla. Esimerkiksi kahvin tai teen valmistus.



Kuva 2. Erotusmenetelmien käsittekartta, jota luetaan keskeltä ulospäin.

#### 4 Työssäkävyn opettajan näkökulma aiheen opettamiseen

Saadaksemme myös koulumaailman kemian opetuksen näkökulman erotusmenetelmien opettamiseen, haastattelimme helsinkiläisessä lukiossa opettavaa kemian opettajaa. Opettajan näkemyksen mukaan oppimateriaalitarjonnan haaste luo tarpeen kehittää uusia pedagogisia ratkaisuja aiheen opettamisen tukemiseksi. Koulussa käytössä oleva oppimateriaali erotusmenetelmien kokeellisuuden opettamiseksi Mooli 1 -kirjassa on haasteellinen vaativien työvaiheiden vuoksi (Työ 6: Seoksen komponenttien erottaminen; Lehtiniemi & Turpeenoja, 2016.). Haasteellisuuden vuoksi on koulussa päädytty siihen, että oppilaat tutustuvat pienissä ryhmissä tai pareittain johonkin erotusmenetelmään, ja kirjoittavat siitä lyhyen kirjoitelman. Projektityössä tulee käydä ilmi mihin erotusmenetelmä perustuu, missä sitä käytetään, lyhyt työselostus ja pieni videopätkä työstä. Aiheet ja työt opiskelijat ovat saaneet suhteellisen vapaasti valita. Opettajan tekemien valmistelujen määrä riippuu oppilaiden valitsemasta aiheesta, esim. tislauslaitteiston kokoamisessa opettaja on auttanut paljonkin mutta esim. haihduttamisessa ei ole tarvinnut auttaa paljoakaan.

Välineitä ohutlevykromatografian suorittamiseen koululta ei löydy ja oppilaat ovatkin erottaneet tussien väriaineita erottaneet suodatinpaperilla ja vedellä, jonka ohje löytyy esimerkiksi Orbitaali 1 kirjasta. Gadolinissa käytössä oleva Kofeiinin erotustyö ei opettajan mielestä oikein sovi KE1-kurssille, koska kurssissa on noin 20 oppituntia ja erotusmenetelmiin on käytetty aikaa korkeintaan 2 oppituntia.

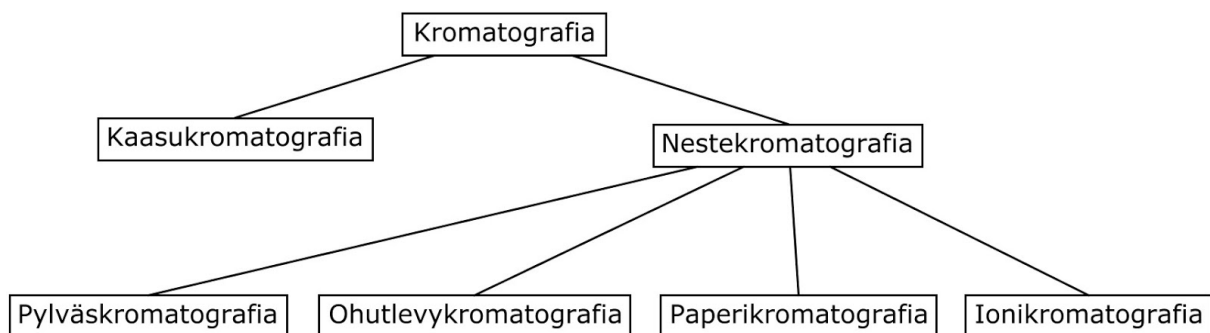
## 5 Kromatografia: teoria

Tässä luvussa käsittelemme kromatografisten menetelmien teoriaa eli käymme läpi eri kromatografiset menetelmät, kromatografian historian sekä perehdymme paremmin ohutlevykromatografiaan.

### 5.1 Kromatografia

Kromatografia (GC, gas chromatography) on yhdisteiden puhdistamiseen, eristämiseen ja analysointiin käytetty erotusmenetelmä. Sille on ominaista tutkittavan yhdisteen jakautuminen kahden faasin välille. Näistä faaseista toinen pysyy paikallaan (stationaarinen faasi) ja toinen liikkuu (liikkuva faasi). Liikkuva faasi voi olla neste tai kaasu. Stationaarinen faasi on joko kiinteä aine tai neste.

Kromatografia perustuu siihen, että aineilla on erilainen koko, sähkövarauksien määrä, erilaiset kemialliset ominaisuudet sekä aineiden liukoisuus eri liuottimiin vaihtelee. Kromatografia voidaan jakaa kaasu- ja nestekromatografiaan. Nestekromatografia jaetaan vielä pylväs-, ohutlevy-, paperi- ja ionikromatografiaan (Kuva 3).



Kuva 3. Kromatografisten menetelmien jaottelu.

### 5.2 Kromatografian historia

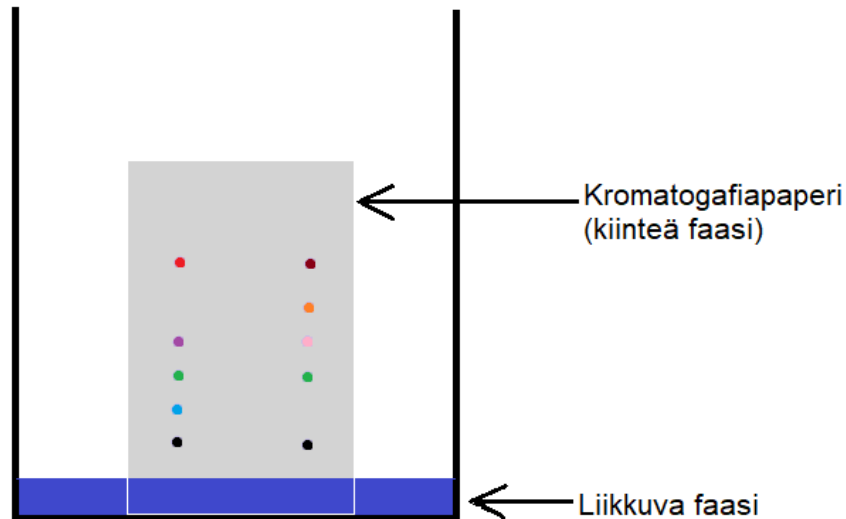
Mikhail Tswett (1872–1919) oli ensimmäinen, joka käytti kromatografiaa. Tswett hyödynsi menetelmää vuonna 1903 kasvien pigmenttien erottamiseen. Hän myös antoi menetelmälle sen nimen. Kromatografia (chromatography) tulee latinankielisestä sanasta ”chroma”, joka tarkoittaa väriä sekä sanasta ”graphy”, joka tarkoittaa kirjoittamista. Tätä termiä käytetään edelleenkin kuvaamaan tekniikkaa, vaikka useimmat nykyaikaiset kromatografisten menetelmien näytteet eivät sisällä värillisiä komponentteja.

Tswett julkaisi suurimman osan työstään venäjäksi ja kromatografia sai näin vain vähän huomiota tiedemaailmassa. Richard Kuhn (1900–1967) oli seuraava, joka käytti kromatografisia menetelmiä vuonna 1931 sekä esitteli menetelmän Euroopan tiedeyhteisölle. Tämän jälkeen tekniikka hyväksyttiin yleisesti.

Archer J. P. Martin kehitti yhdessä ryhmänsä kanssa paperikromatografian vuonna 1944 sekä hän että M. L. Synge saivat kemian Nobelin palkinnon vuonna 1952 erotuskromatografiasta (partition chromatography) (Ettre, 2008). Archer J. P. Martin kehitti myös yhteistyössä Anthony T. Jamesin kanssa nykyaikaisen kaasukromatografian vuonna 1954 (Bartle & Myers, 2002). 1950-luvun loppua kohden, ohutlevykromatografia (TLC) käytännössä korvasi paperikromatografian ja on edelleen yksi käytetyimmistä kromatografisista menetelmistä. Ohutlevykromatografiaa käytti ensimmäistä kertaa Nikolai A. Izmailov (1907–1961) vuonna 1937–1938 Harkovan Yliopistossa Ukrainassa. Izmailovin sekä Shraiberin paperi julkaistiin venäläisessä lääketieteellisessä lehdessä ja oli käytännössä tuntematon Neuvostoliiton ulkopuolella. Nykyaikainen TLC-tekniikka kehittyi noin 50 vuotta sitten Justus G. Kirchnerin (1911–1987) ansiosta. Vuonna 1958 E. Merck otti käyttöön ensimmäisenä silikageelin ohutlevykromatografiassa. (Ettre, 2008)

### 5.3 Ohutlevykromatografia

Ohutlevykromatografia (TLC, Thin Layer Chromatography) on kromatografinen menetelmä, jossa tutkittava yhdiste/aine liikkuu ohuen levyn pinnalla liuottimen avulla. Eri aineet matkustavat eri nopeudella liikkuvan faasin mukana. Aineet, joilla on korkeampi affiniteetti TLC-levyyn verrattuna, kulkevat hitaasti, kun taas muut aineet liikkuvat nopeammin. Ohutlevykromatografiaan tarvitaan ajoastia sekä sen kansi, jotta sisällä olevat yhdisteet eivät haihdu. Lisäksi tarvitaan TLC-levy (esim. silikageelipäällysteinen) sekä ajoliuos eli eluentti. Ohutlevykromatografiassa stationaarinen faasi on TLC-levy ja liikkuva faasi taas on eluentti. (Kuva 4)



Kuva 4. Ohutlevykromatografian periaate.

## 6 Kokeellinen työ: Elintarvikeväriä ohutlevykromatografia

### 6.1 Taustaa

Työssä erotetaan ohutlevykromatografialla elintarvikeväriä, joita voidaan käyttää mm. leivonnassa. Arkiset aiheet ja tuotteet, kuten ruoka, motivoivat oppilaita opetuksessa. Kromatografia on yhdisteiden puhdistamiseen, eristämiseen ja analysointiin käytetty erotusmenetelmä. Sille on ominaista tutkittavan yhdisteen jakautuminen kahden faasin välille. Näistä faaseista toinen pysyy paikallaan (stationaarinen faasi) ja toinen liikkuu (liikkuva faasi). Ajoliuoksena eli eluentina käytetään seosta, joka sisältää 1-butanolia, etanolia ja ammoniakki vesiliuosta (3:1:1). Erotuksen tuloksena nähdään, kuinka monen väriaineen seos kukin elintarvikeväri on. Jokaiselle täplälle voidaan laskea  $R_f$ -arvo.  $R_f$ -arvoa voidaan myöhemmin käyttää aineiden tunnistamiseen.  $R_f$ -arvo on aina ykköistä pienempi luku, joka on vakioolosuhteissa kullekin aineelle ominainen.

$R_f$ -komponenttien kulkema matka (cm) / ajoliuoksen kulkema matka (cm)

Kohderyhmä: Soveltuu lukion KE1-kurssille erotusmenetelmien käsittelyn yhteyteen. Kesto: 30-45 minuuttia. Tavoite: Erotusmenetelmän (ohutlevykromatografian) ymmärtäminen käytännön kautta sekä  $R_f$ -arvon laskemisen harjoittelu. Avainsanat: Erotusmenetelmä - Kromatografia – Väriaine.

## 6.2 Reagenssit

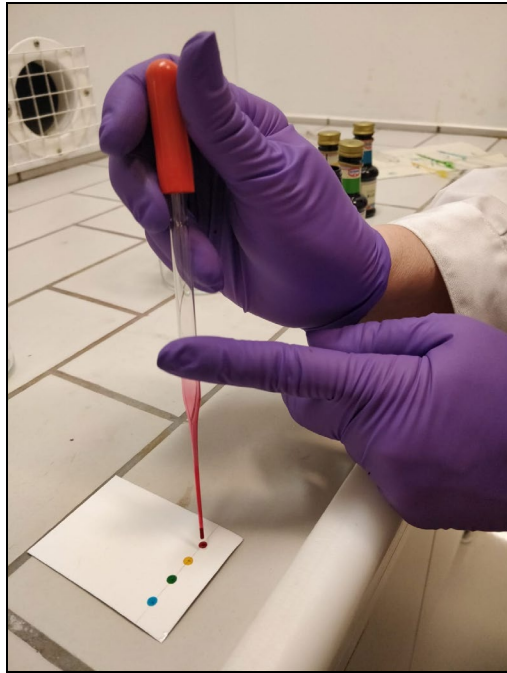
- Elintarvikeväriliuoksia
- Ajoliuos (esimerkiksi 6 ml 1-butanolia, 2 ml 23% ammoniakkia ja 2 ml 96% etanolia)

## 6.3 Tarvikkeet

- 250 ml dekantterilasi
- Petrimaljan kansi tai alumiinifoliota
- Silikageelillä päällystettyjä ohutlevyjä
- Pasteur-pipettejä

## 6.4 Työohje

1. Työturvallisuus: muista käyttää suojatakkia, -laseja ja -hanskoja. Jätteiden käsittely: opettaja hoitaa ajoliuoksen valmistamisen sekä hävityksen. Ajoliuosta hävitettäessä mitataan pH. Jos on emäksinen niin UN 2924 eli palava neste syövyttävä N.O.S 3 (8) II. Jos ei ole emäksistä niin voi laittaa hiilivetyihin UN 1992.
2. Opettaja on valmistanut ajoliuoksen valmiiksi. Kaada ajoliuosta dekantterilasin pohjalle niin paljon, että pohja juuri ja juuri peittyy. Sulje astia joko petrimaljan kannella tai alumiinifoliolla. Petrimaljan kansi tai alumiinifoliota.
3. Valmistele ohutlevy piirtämällä siihen lyijykynällä alalaitaan ohut viiva viivottimella sekä näytteiden paikat tasavälein viivalle. Käytä lyijykynää varovasti, ohutlevy on hauras.
4. Imeytä pasteur-pipetillä kutakin näytettä ohutlevylle mahdollisimman pieneksi täpläksi. Huolehdi, etteivät täplät leviä ja sekoitu keskenään.



5. Laita ohutlevy ajoliuosta sisältävään dekantterilasiin. Sulje kansi.



6. Odota, kunnes ajoliuos on noussut mahdollisimman korkealle. Ota levy pois dekantterilasista ja merkitse, mihin asti ajoliuos oli noussut. Anna levyn kuivua täysin ja merkitse erottuneiden väriaineiden paikat.



7. Laske kullekin väriaineelle  $R_f$ -arvo.

### 6.5 Pohdintaa työn suorittamisen jälkeen

- Kuinka monta eri väriainetta kussakin näytteessä oli ja minkä värisiä ne olivat?
- Mikä tässä kromatografiassa on paikallaan paikallaan pysyvä ja liikkuva faasi?
- Mikä on ajoliuos?

## 7 Pedagogisia lähestymistapoja opetuskokonaisuuteen

Tässä luvussa esitetään ehdotelmia siitä, miten luvussa 2 mainitut pedagogiset mallit voisivat toimia tämän opetusaiheen innokkeina ja lähtökohtina. Esitetyt opetustuokit ovat käytettyjen mallien pohjalta rakennettuja ehdotelmia ja näin ollen ne voisivat olla näiden samojen mallien pohjalta myös aivan toisenlaisiksi rakennettuja. Myös se, miten mallin mukaan opetustuokion rakentaa voidaan katsoa olevan aina jokseenkin riippuvainen lukijan tulkinnoista, myös tässä artikkelissa. Tarkasteluun otetaan Coşun ym. (2010) käyttämä PDEODE-malli sekä Wun ym. (2019) tutkimuksessa käytetty vaihteellisuuden perustuva menetelmä. Perusteluita näille menetelmille esitetään luvussa 2.

PDEODE-menetelmässä (ennakoi, keskustele, selitä, havainnoi, keskustele, selitä) keskeistä on ennakoimisen ja havainnoinnin lisäksi kahdessa vaiheessa tapahtuvat keskustelut ja selitysten esittämiset. Myös Wun ym. (2019) käyttämässä pedagogisessa lähestymistavassa jonkinlaisena lähtökohtana on vaihteellisuus.



Molemmissa malleissa taustalla on ajatus siitä, että vaiheisuus tavalla tai toisella edesauttaa mielekästä oppimista ja konseptuaalisen ajattelun muutosta sekä ehkäisee vaihtoehtoisten käsitysten muodostumista.

## 7.1 PDEODE-menetelmän mukainen ehdotelma

Tämä ehdotelma rakentuu kokeellisen työn ympärille ja tapahtuu yhden oppitunnin sisällä. Ennen tätä on hyvä käydä läpi konseptuaalisella tasolla perusteellisesti erotusmenetelmät ja TLC.

1. Ennen kokeellisen työskentelyn eli TLC-ajon (ks. luku 6) aloittamista ennakoidaan keskustellen pienryhmissä tai pareittain mitä työssä tulee tapahtumaan ja kootaan nämä arvelut esimerkiksi taululle. Edeltäneet käsitykset tulevat tuoduiksi esiin luokan ja opettajan yhteiseen tietoon ja jokainen pohtii millainen oma käsitys asiasta on.
2. Pohditaan ja keskustellaan opettajajohtoisesti, millaisia käsityksiä esitettyjen arveluiden taustalla voisi olla. Vaihtoehtoiset käsitykset tulevat näin huomioiduiksi.
3. Opettaja voi tässä vaiheessa vielä tarkentaa uudestaan konseptuaalisella tasolla mihin TLC perustuu sekä selittää tieteellisin selityksin niitä taustalla vaikuttavia käsitteitä ja konsepteja, joiden opettaja havaitsee vaikuttavan opiskelijoiden käsityksiin (ns. vaihtoehtoiset käsitykset). Tällainen taustalla vaikuttava virheellinen käsitys voisi olla esimerkiksi sekaannus molekyylien sisäisissä ja molekyylien välisissä sidoksissa. Tieteellistä selitystä vahvistetaan.
4. Työn suoritus (katso luku 6).
5. Keskustellaan ja pohditaan, mitä havaittiin ja verrataan havaintoja ennen työtä tehtyihin arveluihin. Keskustellaan pohtien, miten havainnot liittyvät abstraktin tason esitykseen asiasta.
6. Opettaja vielä selventää selittäen konkreetin ja abstraktin tason yhteyttä tieteellisin selityksin. Vaiheet 5 & 6: Tieteellistä selitystä vahvistetaan. Edesauttaa muutosta konseptuaalisessa ajattelussa.

## 7.2 Vaiheittaisen aiheeseen perehtymisen ehdotelma

Tämä malli pitää sisällään koko opetuskokonaisuuden. Ensimmäinen vaihe on tai voi olla ajallisesti seuraavista erillään. Vaikka mallissa ei esitellä esimerkiksi ennakkotehtävien tekemistä, työskentelyn jälkeistä pohdintaa ja koontia tai

myöhemmin tapahtuvia aiheen kertaamisia, ei niiden lisääminen opetuskokonaisuuteen ole poissuljettu.

1. Ohutlevykromatografiaa käsitellään opettajajohtoisesti eli aihe käsitellään konseptuaalisella tasolla. Opiskelijoiden kysymyksille on toki tilaa, vaikka aihetta opetettaisiin luentomaisesti.
2. Juuri ennen kokeelliseen osuuteen siirtymistä opettaja pitää opetustuokion, jossa käydään läpi sekä kokeelliseen työskentelyyn liittyviä tekijöitä (ajon suorittaminen, välineet, työturvallisuus) että etenkin sidostetaan yhteen abstraktia ja konkreettia tasoa (mihin TLC perustuu ja miten se ilmenee käytännössä). Tämän vaiheen ensisijainen tarkoitus onkin auttaa opiskelijaa hahmottamaan, kuinka teoreettisesti opiskeltu asia toteutuu ja ilmenee käytännössä ja toisaalta kuinka konkreettisten havaintojen taustalla on mikrotason abstrakti selitys.
3. Laboratoriotyöskentelyssä tai kokeellisessa työskentelyssä käsittelyssä on ensimmäisen vaiheen "luennon" aihe käytännössä eli tässä tapauksessa suoritetaan TLC ajon valmistelu ja ajo sekä lasketaan  $R_f$ -arvo.

## 8 Pohdintaa

Tässä artikkelissa on esitetty näkökulmia erotusmenetelmien, ja tarkemmin ohutlevykromatografian, opettamisesta koulussa. Ehdotelmät, jotka muodostuivat niin tutkimuskirjallisuuden, oppikirjojen ja opetussuunnitelman perusteiden, vertaistestausten ja -arviointien kuin erään kemian opettajan kokemusten myötä eivät todennäköisesti kykene kaiken kattavasti tarjoamaan ratkaisuja todellisen kouluarjen opetustilanteisiin monimutkaisine ja tilannekohtaisine kudelmineen. Parhaimmillaan ehdotelmät toimivatkin ajatuksia herättävinä pohdinta-alustoina opetuskokonaisuuden rakentamiselle. Tutkimustiedon perusteella rakennetut viitteelliset opetustuokioiden herättelevät kiinnittämään huomion kemian opetuksellisiin haasteisiin, kuten vaihtoehtoihin käsityksiin ja tiedon abstraktiuteen, joista esimerkiksi Gabelkin (1999) kirjoittaa.

Erotusmenetelmien periaatteiden ymmärtämiseksi oppilaan on tunnettava useita muita kemian ilmiöitä ja käsitteitä, ja vaikka oppikirjojen rakenne voikin tukea näiden toisiinsa kytkeytyvien käsitteiden oppimista, jää lopulta opettajan tehtäväksi havaita haasteet esimerkiksi juuri erotusmenetelmiä opiskeltaessa. Tämän artikkelin pedagogiset ehdotelmät tarjoavatkin työkaluja juuri näiden opetuksellisten

haasteiden kohtaamiseen tavoitteinaan mielekäs oppiminen. Kromatografiaa käsittelevä luku voi toimia TLC:n periaatteiden opettamisen pohjalla ja työohje soveltuu opetuskäyttöön vertaistestauksen perusteella. Kouluopetuksen lukuisat tavoitteet ja toisaalta ajan rajallisuus jättävät kuitenkin opettajan harkinnan varaan, millä syvyydellä esimerkiksi ohutlevykromatografiaa aiheena on mielekästä käsitellä.

Artikkelin opetuskokonaisuuksien pedagogisten näkökulmien haasteena onkin niiden soveltuvuus esimerkiksi lukion kemian opetukseen, jossa sisällöllisiä tavoitteita on useita ja resurssit, kuten aika, väistämättä ohjaavat aina jonkin verran opetusta. Samalla ne kuitenkin painottavat sellaisia opetuksellisia näkökulmia, jotka on hyvä ottaa huomioon opetusta järjestettäessä aiheesta riippumatta. Siinä missä ohutlevykromatografian opettamiselle ei mahdollisesti ole olemassa “helppoa aina toimivaa mallia”, nostaa tämä artikkeli esiin kuitenkin erotusmenetelmien opetuksen kannalta keskeisiä haasteita ja tarjoaa tutkimuskirjallisuudesta nousevia sovellettuja pedagogisia näkökulmia työohjeineen opettajan työn tueksi.

## Kiitokset

Kiitos KÄSI-2019 kurssin opettajille ja opiskelijoille vertaisarvioinnin kommentteista.

## Lähteet

- Bartle, K. D., & Myers, P. (2002). History of gas chromatography. *Trends in Analytical Chemistry*, 21(9), 547-557. doi:10.1016/S0165-9936(02)00806-3
- Chen, H.-J., She, J.-L., Chou, C.-C., Tsai, Y.-M., & Chiu, M.-H. (2013). Development and application of a scoring rubric for evaluating students' experimental skills in organic chemistry: an instructional guide for teaching assistants. *Journal of Chemical Education*, 90(10), 1296-1302. doi:10.1021/ed101111g
- Coştu, B., Ayas, A., & Niaz, M. (2010). Promoting conceptual change in first year students' understanding of evaporation. *Chemistry Education Research and Practice*, 11(1), 5-16. doi:10.1039/C001041N
- Ettre, L. S. (2008). *Chapters in the evolution of chromatography*: Imperial College Press. doi:10.1142/p529
- Fagundes, T. d. S. F., Dutra, K. D. B., Ribeiro, C. M. R., Epifanio, R. d. A., & Valverde, A. L. (2016). Using a sequence of experiments with turmeric pigments from food to teach extraction, distillation, and thin-layer chromatography to introductory organic chemistry students. *Journal of Chemical Education*, 93(2), 326-329. doi:10.1021/acs.jchemed.5b00138
- Gabel, D. (1999). Improving teaching and learning through chemistry education research: a look to the future. *Journal of Chemical Education*, 76(4), 548-554. doi:10.1021/ed076p548
- Happonen, J., Heinonen, M., Muilu, H., Nyrhinen, K. & Saarinen, H. (2011). Avain kemia 1, Otava.
- Herranen, J., Tuomisto, M., & Aksela, M. (2015). Tutkimuksellinen opiskelu kemian aineenopettajakoulutuksessa. *LUMAT*, 3(6), 856-866.

- Ikonen, M., Tuomisto, M. & Ojala, P. (2016). *Ilmiö 7-9: Kemia*, Sanoma Pro.
- Kalkku, I., Kalmi, H. & Korvenranta, J. (1999). *Kide 1 Lukion kemia: Kemia- kokeellinen luonnontiede*, Otava.
- Kangaskorte, A., Lavonen, J., Penttilä, A., Pikkarinen, O., Saari, H., Sirviö, J., Vakkilainen, K. & Viiri, J. (2010). *Fyke 7-9 Kemia*, WSOYpro Oy.
- Lehtiniemi, K. & Turpeenoja, L. (2016). *Mooli 1: KE1 Kemiaa kaikkialla*, Otava.
- Lukion opetussuunnitelman perusteet (2015). Helsinki: Opetushallitus.  
<https://eperusteet.opintopolku.fi/#/fi/lukio/1372910/oppiaine/1374563>
- Lukion opetussuunnitelman perusteet (2019). Helsinki: Opetushallitus.  
<https://www.oph.fi/fi/koulutus-ja-tutkinnot/lukion-opetussuunnitelmien-perusteet#anchor-lukion-opetussuunnitelman-perusteet-2019>
- Muilu H. & Virtanen T. (2017). *Titaani kemia 7-9 (digikirja ONL)*, Otava.
- Muilu H. & Virtanen T. (2016). *Titaani kemia: Tehtävät 1*, Otava.
- Orbitaali 1. <https://peda.net/p/johannespernaa/kirjasto-kemope/sisalto2/ykk/kokeelliset-ty%C3%B6t2/ty%C3%B6hjeet/7p>
- Paik, S.-H. (2015). Exploring the role of a discrepant event in changing the conceptions of evaporation and boiling in elementary school students. *Chemistry Education Research and Practice*, 16(3), 670-679. doi:10.1039/C5RP00068H
- Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet (2014). Helsinki: Opetushallitus.  
<https://eperusteet.opintopolku.fi/#/fi/perusopetus/419550/sisallot/466347>
- Raydo, M. L., Church, M. S., Taylor, Z. W., Taylor, C. E., & Danowitz, A. M. (2015). A guided inquiry liquid/liquid extractions laboratory for introductory organic chemistry. *Journal of Chemical Education*, 92(1), 139-142. doi:10.1021/ed400861r
- Savander-Ranne, C., & Kolari, S. (2003). Promoting the conceptual understanding of engineering students through visualisation. *Global J. of Engng. Educ.*, 7(2), 189-199.  
[www.wiete.com.au/journals/GJEE/Publish/vol7no2/SavRanneKolari.pdf](http://www.wiete.com.au/journals/GJEE/Publish/vol7no2/SavRanneKolari.pdf)
- Wu, N., Hall, A. O., Phadke, S., Zurcher, D. M., Wallace, R. L., Castañeda, C. A., & McNeil, A. J. (2019). Adapting meaningful learning strategies for an introductory laboratory course: using thin-layer-chromatography to monitor reaction progress. *Journal of Chemical Education*, 96(9), 1873-1880. doi:10.1021/acs.jchemed.9b00256