

Johdatus siirtymämetallien erityisominaisuuksiin itse rakennettua spektrofotometriä hyödyntämällä

Kirsi Kepsu

Kemian opettajankoulutusyksikkö, Kemian osasto, Helsingin yliopisto

Tiivistelmä: Tässä työssä rakennetaan spektrofotometri Raspberry Pi:n avulla. Laitteistolla tutkitaan siirtymämetallien värillisiä yhdisteitä, joiden kautta perehdytään siirtymämetallien ihmeelliseen kemiaan ja erityisominaisuuksiin. Työn lopussa pohditaan oppimiskokonaisuuden hyödyntämistä opetussuunnitelman, projektioppimisen ja STEM-opetuksen näkökulmista. Lisäksi esitetään esimerkkisuunnitelma lukio-opetukseen, jossa metallien värilliset yhdisteet ja spektrofotometria ovat keskiössä.

Avainsanat: projektioppiminen, STEM-opetus, spektrofotometri, siirtymämetallit, lukio

1 Johdanto

Siirtymämetalleilla on monia erityisominaisuuksia, joita voidaan tutkia spektrofotometrisesti. Spektrofotometri on rakenteeltaan ja toiminnaltaan yksinkertainen mutta monipuolinen laitteisto, jolla voidaan suorittaa niin laadullisia kuin määrällisiäkin mittauksia. Sillä suoritettavat mittaukset soveltuvat hyvin integroimaan STEM-aineita (Bougot-Robin ym. 2016). Tämän on havaittu lisäävän muun muassa oppijoiden opiskelumotivaatiota. Monet laitteistot ovat kuitenkin kalliita ja ne näyttävät oppijoille niin sanottuna mustana laatikkona, jonka sisällä tapahtuvia toimintoja ei tunneta. Monesti kuitenkin kemiallisten analyysien laatuun voidaan vaikuttaa, kun ymmärtää laitteiston komponenttien toimintaa. Laitteiston toimintaperiaatteen ymmärtäminen edistää oppimista sekä kykyä optimoida mittauksia (Bougot-Robin ym. 2016). Onneksi laitteistoja voidaan rakentaa myös edullisesti opiskelutarkoitukseen.

Tässä työssä rakennetaan spektrofotometri Raspberry Pi:n avulla ja esitellään laitteiston suunnitteluun liittyviä vaiheita. Raspberry Pi on pieni, yksinkertainen ja edullinen mikrotietokone, joka soveltuu hyvin erilaisiin opetusympäristöihin. Spektrofotometrin avulla perehdytään siirtymämetallien muodostamiin värillisiin yhdisteisiin ja kemiaan niiden taustalla. Sekä siirtymämetallien kemiaa että spektrofotometriä käsitellään työn teoreettisessa viitekehyksessä. Työssä raportoidaan itse rakennetun laitteiston testaus ja pohditaan sen käyttöä opetuksessa opetussuunnitelman, STEM-opetuksen ja projektioppimisen näkökulmista. Lisäksi esitetään esimerkkisuunnitelma



lukio-opetukseen, jossa metallien värilliset yhdisteet ja spektrofotometria ovat keskiössä.

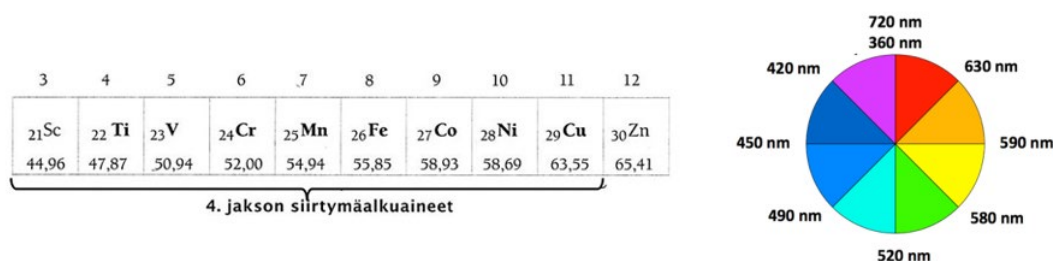
2 Teorettinen viitekehys

Tämä luku käsittelee siirtymämetallien kemian perusteita ja johdattaa kidekenttäteoriaan, jonka perusteiden ymmärtäminen on keskeistä tarkasteltaessa siirtymämetalleihin liittyviä värillisiä yhdisteitä. Kemian teoria noudattaa Nivaldon (2017) teosta. Lisäksi esitellään lyhyesti spektrofotometrian toimintaperiaatetta sekä yksinkertaisen laitteiston peruskomponentteja.

1.1 Siirtymämetallit

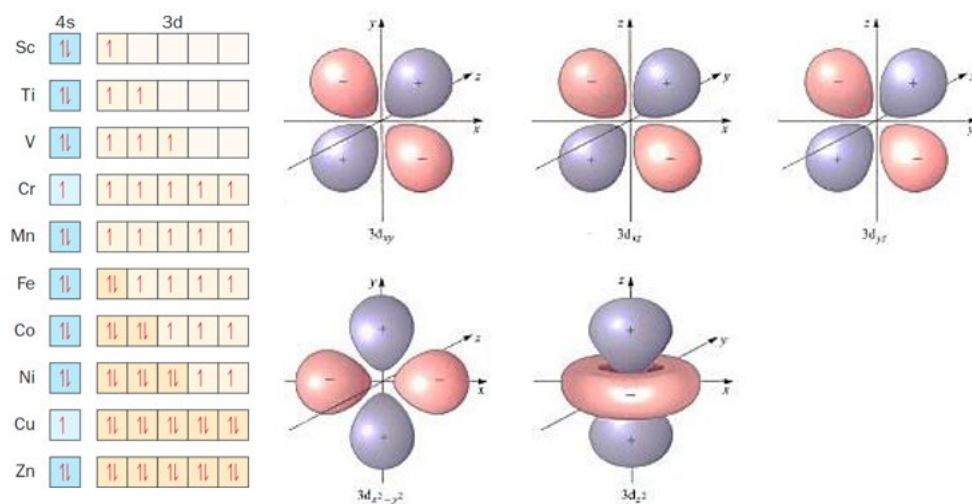
Siirtymämetallien yhdisteillä on lukuisia sovelluskohteita mielenkiintoisen kemian lisäksi. Monien lääkeaineiden, kemiallisten sensoreiden sekä väriaineiden taustalla ovat niiden muodostamat koordinaatioyhdisteet. Lisäksi monet biologiset molekyylit, kuten hemoglobiini ja klorofylli, sisältävät siirtymämetalleja, jotka sitoutuvat koordinaatioyhdisteiden tavoin. Myös jalokivien värit selittyvät näillä siirtymäalkuaineilla.

Siirtymämetallit ovat d-lohkon metalleja, joilla on atomi- ja ionimuodossa osittain täyttyneet d-orbitaalit. Esimerkiksi ensimmäisen rivin eli 4. jakson siirtymäalkuaineet käsittävät yhdisteet skandiumista kupariin (kuva 1). Elektronit voivat siirtyä d-orbitaaleilta toiselle tai d-orbitaalin ja 4s-orbitaalin välillä. Näiden orbitaalien energiaerot ovat pieniä, joten elektronien virittymiseen riittää näkyvän valon aallonpituuksia vastaavat energiat. Tämän takia ne muodostavat värillisiä yhdisteitä. Kun yhdiste absorboi punaisen valon aallonpituuksia, se päästää lävitseen tai heijastaa muita aallonpituuksia ja yhdiste näyttää vastaväriältään vihreältä. Samalla periaatteella voidaan päätellä muidenkin värillisten yhdisteiden absorboiman valon aallonpituusalue. Tässä apuna voidaan käyttää väriympyrää (kuva 1).



Kuva 1. Vasemmalla 4. jakson siirtymäalkuaineet ja oikealla väriympyrä (muokattu lähteestä Wikimedia Commons).

Kuvassa 2 on esitetty 1. rivin eli 4. jakson siirtymämetallien elektronien sijoittuminen uloimmille orbitaaleille. Kyseisten orbitaalien miehitys on $4s^23d^x$ muutamaa poikkeusta lukuunottamatta: Kromin ulkoelektronien konfiguraatio on $4s^13d^5$ ja kuparin $4s^13d^{10}$. Nämä johtuvat siitä, että 3d- ja 4s-orbitaalien energiatasot ovat lähellä toisiaan sekä puoliksi (d5) tai kokonaan (d10) miehitettyjen orbitaalien stabiilisudesta. Sinkki ei kuulu siirtymämetalleihin, koska sekä atomi- että ionimuodoissa d-alakuori on täysi. D-orbitaaleja on viisi ja niiden muoto on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Vasemmalla siirtymämetallien sijoittuminen uloimmille orbitaaleille (Nivaldo, 2016) ja oikealla viiden d-orbitaalin muodot (Rob & Moore, 2004).

Elektronit sijoittuvat orbitaaleille energiainperiaatteen mukaisesti, joten viimeiseksi täyttyy 3d-alakuori, vaikka uloimmat elektronit ovat 4s-alakuorella. Ensimmäisen rivin siirtymämetallit muodostavat ioneja luovuttamalla ensin 4s-orbitaalilta elektronit ennen d-orbitaaleja, mikä tulee huomioida kirjoitettaessa ionien elektronikonfiguraatioita. Esimerkiksi Fe^{2+} :n elektronikonfiguraatio on $[Ar]3d^6$, koska se on luovuttanut elektronit 4s-orbitaalilta. Kuvasta 2 nähtävissä myös Hundin sääntö sekä Paulin kieltosääntö.





Toisin kuin pääryhmän metallit siirtymämetallit voivat esiintyä usealla hapetusluvulla. Tämä ominaisuus selittyy ulkoelektronirakenteella. Myös vaihteleva määrä 3d-alakuoren elektroneja pystyy osallistumaan kemiallisiin reaktioihin. Esimerkiksi rauta voi esiintyä yhdisteissä Fe^{2+} - tai Fe^{3+} -ioneina.

Siirtymämetallien elektronirakenteella voidaan selittää niiden kyky sitoa ympärilleen ioneja ja neutraaleja molekyylejä. Näin muodostuu kompleksiyhdisteitä. Ligan-dina toimii Lewis-emäs eli sillä tulee olla vähintään yksi vapaa elektronipari sidoksen

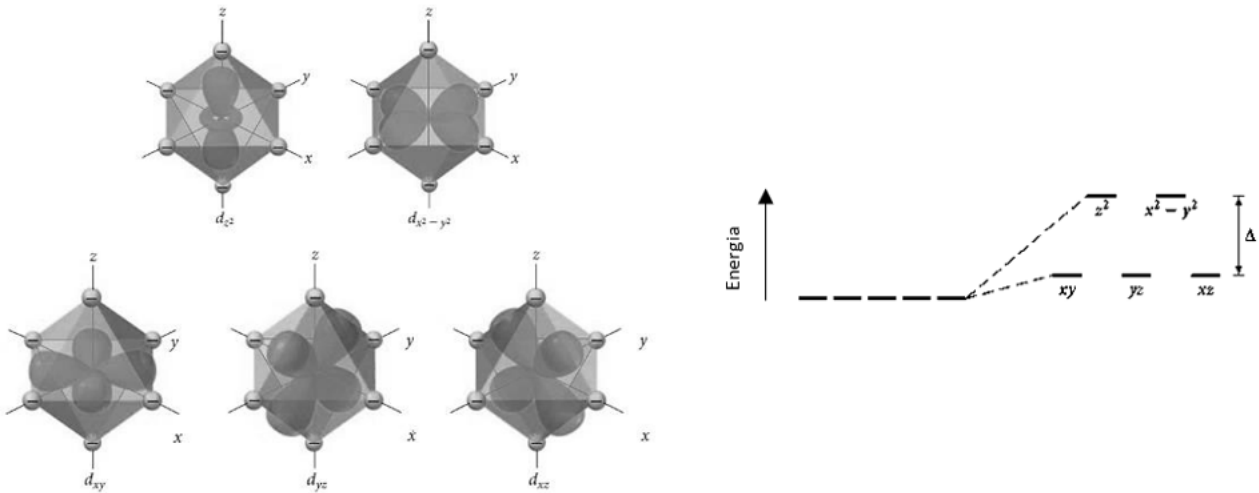
muodostamiseen. Sidosta kutsutaan kovalenttiseksi koordinaatiosidokseksi, koska sidoksen muodostavat elektronit ovat peräisin vain ligandin atomilta.

Kompleksi-ionien geometria liittyy usein koordinaatiolukuun (taulukko 1). Koordinaatioluku kuvaa molekyylien tai ionien määrää, jotka ovat suoraan sitoutuneet keskusmetalliatomiin. Koordinaatioluvulla 2 yhdiste on lineaarinen ja luvulla 6 oktaedrinen. Kun koordinaatioluku on 4, ligandit suuntautuvat joko tetraedrin kärkiin tai tasoneliöksi.

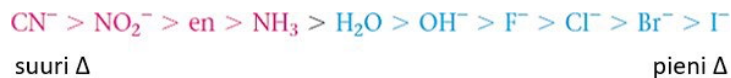
Taulukko 1. Koordinaatioluvun osoittama yhdisteen geometria.

| Koordinaatioluku | Muoto | Malli |
|------------------|-------------|--|
| 2 | lineaarinen |  |
| 4 | tasoneliö |  |
| 4 | tetraedri |  |
| 6 | oktaedri |  |

Siirtymämetallikompleksien värien ymmärtämistä tukee kidekenttäteorian perusteiden tunteminen. Se huomioi repulsiovoiman ligandin elektronien ja metalli-ionin hybridisoitumattomien d-orbitaalielektronien välillä. Esimerkkinä ligandien sijoittuminen oktaedrisessa kompleksissa (kuva 3). Ligandien sijoittuminen orbitaalien kanssa päällekkäin lisää elektronien välistä repulsiota, joka kasvattaa kyseisten orbitaalien energiaa. Vastaavasti ligandien ja orbitaalien sijoittuessa lomittain repulsiota on vähemmän ja orbitaalien energia on matalampi. Näin ollen ligandien avaruudellinen sijoittuminen pilkkoo saman energiset d-orbitaalit energialtaan eri tasoille (kuva 3). Energiaeroa d-orbitaalien välillä kutsutaan kidekentän pilkkoutumisenergiaksi (Δ). Erityisesti kidekentän pilkkoutumisen suuruus riippuu ligandista. Spektroskooppitutkimusten avulla on luotu spektrokemiallinen sarja, jossa yleisimmät ligandit on järjestetty pilkkoutumisenergioiden mukaan vahvan ja heikon kentän ligandeihin (kuva 4).



Kuva 3. Ligandien sijoittuminen oktaedrisssä ja d-orbitaalien pilkkoutuminen (Nivaldo, 2016).



Kuva 4. Vahvan ja heikon kentän ligandit (Nivaldo, 2016). Kuvassa en tarkoittaa etyleenidiamiinia. Punaisella esitetyt ligandit ovat tyypillisiä vahvan kentän ligandeja ja sinisellä esitetyt ligandit heikon kentän ligandeja.

Esineen väri liittyy elektronien absorboimaan valoenergiaan. Yksittäisen kompleksionin absorboima kidekentän pilkkoutumisenergia voidaan laskea yhtälöstä 1. Tästä voidaan edelleen laskea absorboitunut energia moolia kohden.

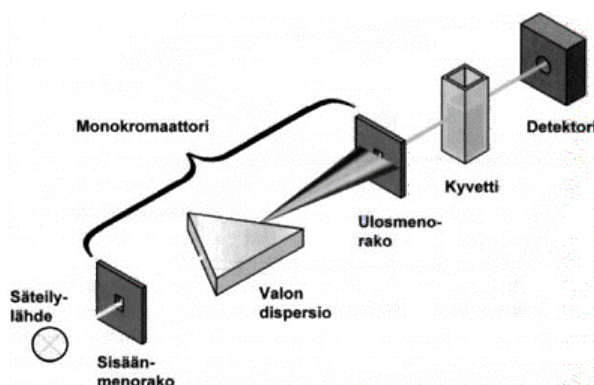
$$E_{\text{fotoni}} = hf = \frac{hc}{\lambda} = \Delta \quad (1)$$

1.2 Spektrofotometria

Näkyvän valon aallonpituusalue (noin 380–750 nm) on vain pieni osa sähkömagneettista spektriä. Spektrometrinen mittausta hyödyntää säteilyn ja aineen välistä vuorovaikutusta kuten absorptiota ja emissiota. Yleensä käytetään näkyvän valon aallonpituuksia tai sen ympärillä olevia aallonpituusalueita. Säteilyn diskreetin energian fotonit voivat virittää aineen elektroneja, jos fotonin energia vastaa aineelle ominaisten energiatasojen välistä erotusta. Valkoinen valo sisältää kaikki näkyvän valon aallonpituudet, joten sen spektri on jatkuva toisin kuin aineelle ominaisissa absorptio ja emissiospektreissä. Spektrometrillä mittausta voidaan käyttää sekä laadullisiin että määrällisiin mittauksiin. Määrällisissä mittauksissa hyödynnetään usein Lambertin

ja Beerin lakia, jossa absorboituneen valon määrä on suoraan verrannollinen aineen pitoisuuteen. Kolorimetriassa spektrofotometrinen mittausta suoritetaan näkyvän valon alueella ja analyysi perustuu erityisesti valon absorptioon. Mikäli kolorimetriassa halutaan tarkastella määrällisiä ominaisuuksia, tulee käytettävä aallonpituus valita tarkoin näytteen sisältämän yhdisteen mukaan.

Spektrofotometrin pääkomponentteihin kuuluvat valonlähde, monokromaattori eli aallonpituuden valitsin, kyvetti eli näyteastia sekä valodetektori eli signaalin muunnin (Mikkonen & Närhi, 2010). Yksisädespektrometrin perusrakenne on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Yksisädespektrometrin rakenne. (Mikkonen & Närhi, 2010)

3 Menetelmät

3.1 Laitteiston suunnittelu

Suunnittelu aloitettiin määrittämällä laitteistolle tarkoitus ja sen asettamat vaatimukset. Alkuperäisenä tavoitteena oli rakentaa näkyvän valon aallonpituusalueella toimiva spektrofotometri, joka mittaa aineen absorptiota ja antaa tulokseksi absorptiospektrin. Tavoitteena oli rakentaa laitteisto, jonka mittaustulokset ovat tarkkoja ja jonka avulla voidaan saada sekä määrällisiä että laadullisia tuloksia. Lisäksi laitteistosta haluttiin kestävä, helposti siirrettävä ja turvallinen. Jokaisen komponentin tuli lisäksi olla kiinnitettynä alustaan. Systemin tavoitelluista vaatimuksista ja ominaisuuksista luotiin taulukko (taulukko 2).

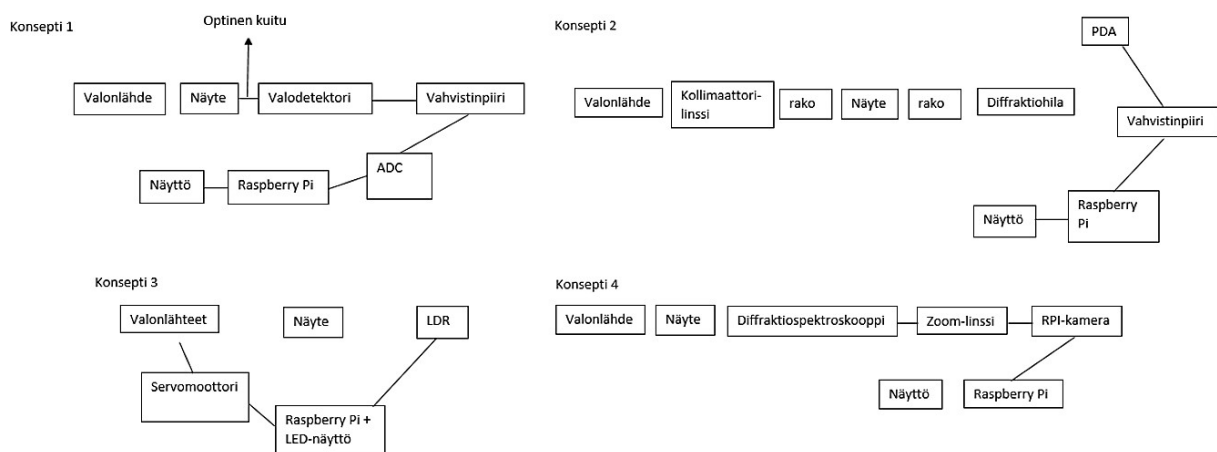
Seuraavassa vaiheessa tutkittiin kirjallisuuden avulla erilaisia absorptiospektrometrejä. Tavoitteena oli selvittää, miten eri tavoin laitteisto voidaan rakentaa. Kirjallisuudesta on koottu taulukkoon morfologinen matriisi (taulukko 3). Matriisin avulla

muodostettiin neljä konseptia, joiden komponentit ja konfiguraatiot poikkeavat hieman toisistaan (kuva 6).

Taulukko 2. Tavoitteet laitteiston ominaisuuksille.

| Ominaisuudet | Vaadittu | Toivottu |
|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| Tarkkuus | Noudattaa oikeaa trendiä | Tarkka |
| Mittaukset | Absorbanssi | Jännite, absorbanssi ja konsentraatio |
| Tulosten laatu | Kvalitatiivinen | Kvalitatiivinen ja kvantitatiivinen |
| Kestävyys / rakenteen vankkuus | Ei | Kyllä |
| Siirrettävyys | Osissa | Yhtenä rakenteena |
| Paino | Käsin kannettava | Kevyt |
| Turvallisuus | Turvallinen | Idioottivarma |
| Rakenne | Laitteiston osat vakaute ttavissa | Laitteiston osat kiinnitetty yhdeksi systeemiksi |

Rakennettavan laitteiston valinta tehtiin arvioimalla matriisista saatuja vaihtoehtoja (konsepteja) teknisistä ja taloudellisista näkökulmista. Teknisiksi arvoiksi valikoitui rakentamisen helppous, jonka arvioinnissa huomioitiin muun muassa laitteiston vaatimien komponenttien lukumäärä. Myös systeemin helppo toimintaperiaate, kestävyys tai vankka rakenne, mittausten laatu sekä mahdollisten virhelähteiden määrä koettiin tärkeiksi teknisiksi mittareiksi. Taloudellisia arvoja olivat ylläpidon hinta sekä rakentamiseen vaadittavat materiaalikulut. Edellä mainituille arvoille annettiin yleinen painoarvo (1–5) sen mukaan, kuinka tärkeiksi ne koettiin juuri tässä projektissa. Lisäksi eri konsepteille määritettiin arvot 1–5 sen mukaan, kuinka hyvin ne koettiin vastaavan tavoiteltuja arvoja. Arvo 1 kuvaa heikkoa vastaavuutta ja arvo 5 erinomaista vastaavuutta. Konsepti 4 sai korkeimmat tekniset ja taloudelliset pisteet. Tulokset näkyvät taulukossa 4 ja kuvassa 7.



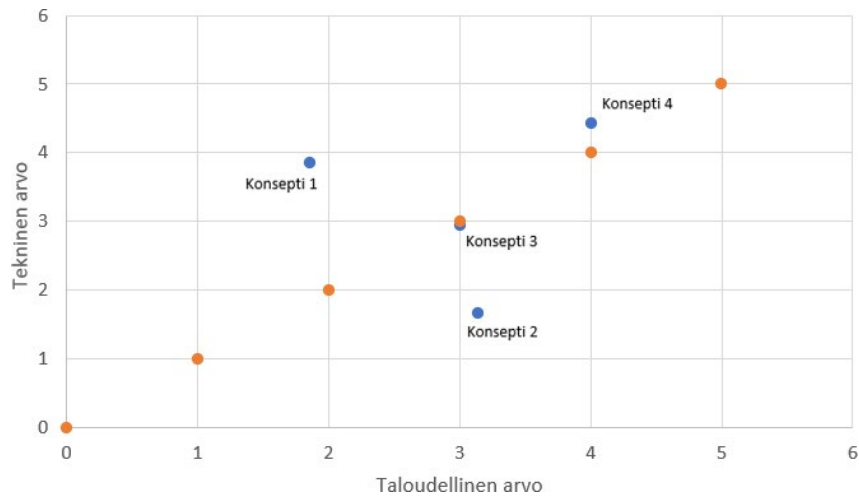
Kuva 6. Matriisista muodostetut konseptit 1–4.

Taulukko 3. Morfologinen matriisi.

| Absorptio- spektrometri | Periaate A (Yingprayoon & Tanachutiwat, 2020) | Periaate B (Chng & Patuwo, 2021) | Periaate C (Bougot-Robin ym., 2016) | Periaate D (Isaak ym., 2019) | Periaate E (Wright, 2021) | Muita vaihtoehtoja |
|------------------------------------|---|---|--|--|---|--|
| Valonlähde | LED:t usealla (8) eri aallonpituudella | Superkirkas valkoinen LED | Superkirkas LED RLS-W18015 | Punainen LED aallonpituudella 630 nm ja syöttöteholla 500 mW | Superkirkas valkoinen LED | |
| Fotoilmaisoin | Valovastus (LDR) | Valodiodi OPT101 -> PDA optio (ks. muut vaihtoehdot) | Excelitas Tech VTB8441BH - valodiodi (piivalodiodi 8 mm:n ke-raamisella levyllä ja IR-suodattimella) -> PDA vaihtoehto | SiPD | | Valomonistinputki (PMT), valotransistori (PT), valodiodi (PD) tai valodiodisarja (PDA) -> PDA useimmiten käytetty LED-pohjainen valo-sensori (O'Toole & Diamond, 2008) |
| Mikro-ohjain | Raspberry Pi | Raspberry Pi 3 B+ | Raspberry Pi B+ kameralla | RPI 3 malli B | RPI 4 malli B | |
| Valonlähde- pyöräyttävä yksikkö | Servomoottoriin kiinnitetty muovinen pyörivä puoliympyränmuotoinen muovilevy, johon LED-valot on sijoitettu | | | | | manuaalinen vaihtoehto |
| Kollimaattori | | linssi | linssi | | | |
| Tulorako | | musta paperi | tulostuspaperi | | | |
| Lähtörako | | | tulostuspaperi | | | |
| Dispersio-osa | | Holografinen diffraktiohila (1000viivaa/mm) | Holografinen diffraktiohila, Edmund optics | | Diffraktiohilaspektroskooppi (pöytätasospektroskooppi) | DVD:n osa, 1000 viivaa/mm (Hobbs ym., 2019) |
| Näyteastia/kyvetti | Lasi (optisen reitin pituus 10 mm ja ulkomitat 12.5 x 12.5 x 45 mm) | Muovi | Muovi | | | Lasi, kvartsi tai corex |
| Vahvistin | | Operaatiovahvistin | IC1 - LTC1051 CSW | Transimpedanssi vahvistin | | |
| Analogia- digitaalimuunnin | | 12 bittinen ADC ADS1015 | 12-bittinen ADC Adafruit 4 Channel I2C | 10-bittinen Arduino Uno | | |
| Aaltojohto tai optinen kuitu | | | | Optinen kuitu | 15-nastainen kameraapeli (sisältyy RPI-kameraan), HDMI-kaapeli | |
| Näyttöyksikkö | Sisäänrakennettu näyttöyksikkö – LED-näyttö | Ei | Tietokoneen näyttö | Työpöydän monitori | Työpöydän monitori | |
| Muut komponentit | | Paljon pieniä asioita esim. koekytentälevy, paristot, akkukotelo, rakennuspalikat, astelevy, kytkin, piirilevy, vastukset, kondensaattori | Piirilevy, elektroniikkalevy, jännitemittari, astelevy, rakennuspalikat | | Raspberry Pi -kameralevy, säädettävä tarkennuslinssi (5MP), CCTV linssi zoomilla (M12, F1.6 zoom linssi), alusta elementeille (mahdollisesti 3D-tulostettava) | |

Taulukko 4. Konseptien tekniset ja taloudelliset arvot.

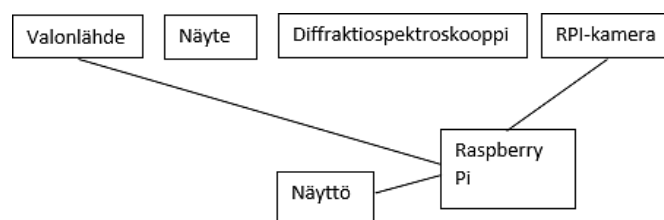
| Kriteeri | Painoarvo | Konsepti 1 | Konsepti 2 | Konsepti 3 | Konsepti 4 |
|---|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Tekninen arvo | | | | | |
| Helppo rakentaa (esim. komponenttien määrä) | 5 | 4 | 2 | 3 | 4 |
| Yksinkertainen toimintaperiaate | 5 | 4 | 2 | 5 | 5 |
| Vankka | 4 | 4 | 1 | 2 | 5 |
| Mittausten laatu | 4 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| Mahdollisten virhelähteiden määrä | 3 | 3 | 1 | 2 | 4 |
| Arvosana | | 3,86 | 1,67 | 2,95 | 4,43 |
| Sijoitus | | 2 | 4 | 3 | 1 |
| Taloudellinen arvo | | | | | |
| Ylläpitokustannukset | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 |
| Materiaalikulut | 4 | 1 | 4 | 3 | 4 |
| Arvosana | | 1,86 | 3,14 | 3,00 | 4,00 |
| Sijoitus | | 4 | 2 | 3 | 1 |



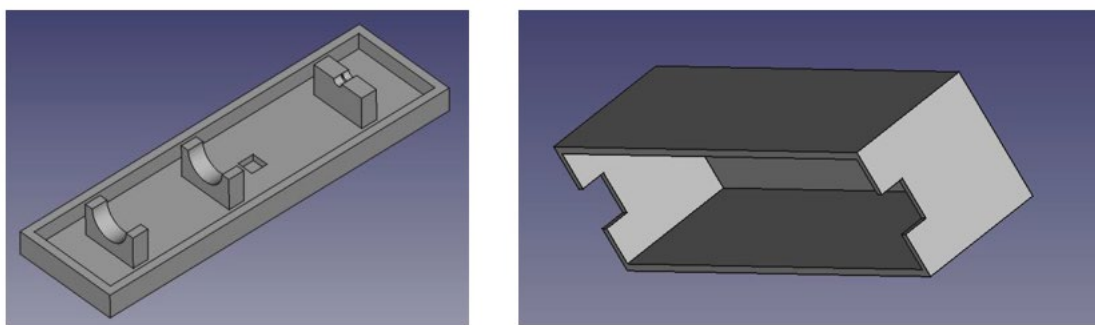
Kuva 7. Konseptien tekninen arvo ekonomisen arvon funktiona.

3.2 Laitteiston käyttökuntoon saattaminen

Alkuperäinen suunnitelma oli käyttää ennalta määriteltyjä komponentteja. Laitteiston osat tilattiin kuitenkin Farnellilta, jolla ei ollut laitteistoon sopivaa linssiä. Linssi jätettiin pois laitteistosta, joten lopullisen laitteiston konseptidiagrammi on kuvan 8 mukainen. Lisäksi käytössä oli Raspberry Pi 4:n sijaan Raspberry Pi 3 -pakki (Raspberry Pi 3B+ Sensorik Educa. Set). Konseptin 4 mukaisen laitteiston rakentamisessa käytettiin valonlähteenä valkoista superkirkasta LED-valoa (merkki, valmistaja tuntematon), johon kolvattiin sopivan suuruinen resistanssi (100 Ω). LED:n 5 V:n jännitelähteenä käytettiin Raspberry Pi:ta. Laitteiston komponentit sijoitettiin 3D-tulostettuun mustaan laatikkoon (kuva 9), jonka tarkoitus oli rajata taustasäteilyä sekä pitää komponentit paikoillaan. Laitteiston mallinnuksessa käytettiin FreeCAD-ohjelmistoa. Mikrotietokone jätettiin kuitenkin laatikon ulkopuolelle, johon se voitiin helposti kiinnittää. Tietokoneelle asennettiin laitteistoon soveltuva aallonpituutta mittaava ohjelmisto, jonka komennot olivat saatavilla ja vapaasti käytettävissä suoraan GitHubin nettisivustolta (Wright, 2021).



Kuva 8. Lopullisen laitteiston konseptidiagrammi. Viiva komponenttien välillä kuvaa laitteiston osien yhdistämistä toisiinsa sopivalla tavalla.



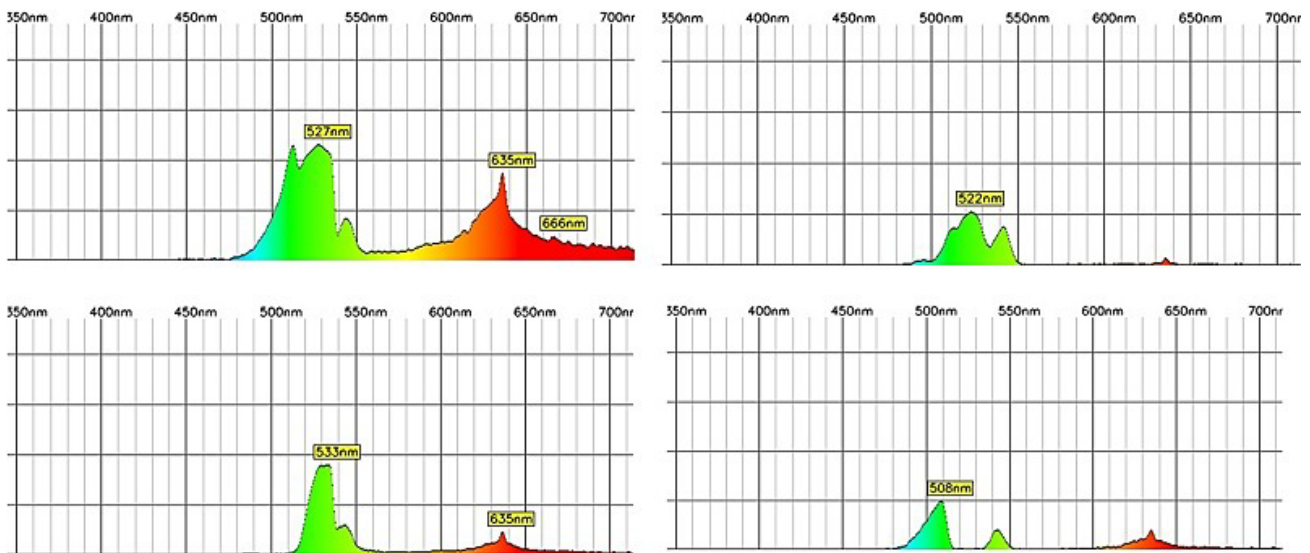
Kuva 9. FreeCAD ohjelmistolla tehty 3D-mallinnus mustasta laatikosta.

3.3 Laitteiston testaaminen

Laitteisto kalibroitiin tunnettuja aallonpituuksia emittoivien jalokaasuja sisältävien purkausputkien avulla. Kalibrointi voitiin suorittaa kuitenkin helpommin ja täsmällisemmin edullisilla 5 mV:n laserosoittimilla. Laserin spektri on huomattavasti kapeampi moniin muihin valonlähteisiin verrattuna. Ohjelmisto vaatii kahden eri laserin aallonpituusarvon.

Mittaukset suoritettiin valmistamalla sekä pääryhmien metallien että siirtymämetallien laimeita vesiliuoksia ja mittaamaan niiden spektrit. Pääryhmän metalleista valmistettiin magnesiumkloridin ja natriumkloridin vesiliuokset. Siirtymämetallien suoloista valmistettiin koboltti(II)nitraatin, kupari(II)kloridin, kaliumdikromaatin sekä nikkeli(II)nitraatin vesiliuokset. Lisäksi valmistettiin tetra-akvasinkki-ionin sekä tetra-akvakupari(II)-ionin vesiliuokset.

Mittauksissa voitiin havaita, että päämetallien vesiliuokset muodostavat värittömän liuoksen. Samoin sinkin muodostaman kompleksionin vesiliuos oli kirkas. Näiden yhdisteiden spektrit eivät poikenneet valkoisen valon vastaavasta. Voitiin päätellä, että värittömät liuokset eivät absorboi näkyvän valon aallonpituuksia. Siirtymämetalleista havaittiin, että koboltti(II)nitraatin vesiliuos on punainen, kupari(II)kloridin sininen, kaliumdikromaatin oranssi ja nikkeli(II)nitraatin vihreä. Myös kuparin kompleksionin vesiliuos on sininen. Näistä voitiin jo tehdä hypoteesi siitä, millaiselta spektri näyttää kunkin liuoksen kohdalla väriympyrää hyödyntämällä. Spektreistä voitiin havaita, että liuoksen värin vastavärin aallonpituusalueilla säteily oli vähäisempää (kuva 10). Näin voitiin päätellä, millä aallonpituusalueella eri siirtymämetallit pääasiassa absorboivat valoa ja laskea esimerkiksi aallonpituusalueen keskiarvoa käyttämällä kidekentän d-orbitaalien energiaeroa vastaava pilkkoutumisenergia ionille ja edelleen moolille ainetta.



Kuva 10. Ylhäällä vasemmalla kirkkaan liuoksen, alhaalla vasemmalla sinisen liuoksen, ylhäällä oikealla vihreän liuoksen ja alhaalla oikealla punaisen liuoksen spektrit.

4 Pohdinta

4.1 Laitteiston käyttö opetuksessa

Opetussuunnitelmien sisällöissä on runsaasti oppimistavoitteita, joiden saavuttamisessa projektioppiminen on avainasemassa. Varsinkin lukiossa laaja-alaisen osaamisen kehittäminen on erityisen tärkeää. Projektioppiminen tukee lukiossa laaja-alaisen yleissivistyksen kehittymistä (Opetushallitus, 2019). Tässä työssä esitetyn kaltaiseen kokonaisuuteen on mahdollista soveltaa monia laaja-alaisia aihekokonaisuuksia. Rakennettavan laitteiston sovelluskohteet voivat esimerkiksi liittyä yrittäjyyteen tai hyvinvointiin ja turvallisuuteen. Siirtymämetallien erityisominaisuuksien kvalitatiivista tarkastelua laitteiston avulla voitaisiin syventää esimerkiksi omalla hemoglobiinipitoisuusmittauksella esimerkiksi projektityöhön liitetyllä yliopistovierailulla.

Opetussuunnitelmien sisällöissä on runsaasti oppimistavoitteita, joiden saavuttamisessa projektioppiminen on avainasemassa. Varsinkin lukiossa laaja-alaisen osaamisen kehittäminen on erityisen tärkeää. Projektioppiminen tukee lukiossa laaja-alaisen yleissivistyksen kehittymistä (Opetushallitus, 2019). Tässä työssä esitetyn kaltaiseen kokonaisuuteen on mahdollista soveltaa monia laaja-alaisia aihekokonaisuuksia. Rakennettavan laitteiston sovelluskohteet voivat esimerkiksi liittyä yrittäjyyteen tai hyvinvointiin ja turvallisuuteen. Siirtymämetallien erityisominaisuuksien kvalitatiivista tarkastelua laitteiston avulla voitaisiin syventää esimerkiksi omalla hemoglobiinipitoisuusmittauksella esimerkiksi projektityöhön liitetyllä yliopistovierailulla.

Erityisesti tässä esitelty projektityö tukee monilukutaitoa sekä teknologiaan liittyvää osaamista. Aihekokonaisuudet auttavat ymmärtämään asioiden välisiä yhteyksiä sekä käsittelemään näitä oppiainerajat ylittävästi. Tämä kuuluukin lukio-opetuksen yleisiin tavoitteisiin. Projektityössä opiskelijalle annetaan mahdollisuus aktiiviseen tiedon hankkimiseen, tutkimiseen ja soveltamiseen, mikä tukee oppimisen omistajuutta (Opetushallitus, 2019). Kun opiskelijat pääsevät syventymään tiettyyn ongelmaan, myös ajattelutaidot kehittyvät.

Tämä työ on esimerkki projektityöstä, jossa hyödynnetään eheyttävää STEM-opetusta. STEM tulee sanoista science, technology, engineering, and mathematics. Opetuksessa kyseisten aineiden tietotaitoja pyritään yhdistämään mielekkääksi kokonaisuudeksi, jossa tuttuja arkista ilmiötä pyritään oppiainerajat rikkomalla ymmärtämään syvällisemmin. Tämä tekee usein oppimisesta merkityksellisempää. Tämän kaltaisiin projekteihin myös opetussuunnitelma kannustaa. Näiden alojen osaajista on työmarkkinoilla suuri tarve.

Opetussuunnitelma toimii lähtökohtana, kun suunnitellaan projektityön sisältöjä (Opetushallitus, 2019). Tässä työssä esitettyä kokonaisuutta voi joiltakin osin hyödyntää lukio-opetuksessa esimerkiksi metallien ominaisuuksien yhteydessä. Esimerkiksi siirtymämetalleihin liittyvä kemia on koettu haastavaksi ja siinä esiintyy runsaasti vaihtoehtoisia käsityksiä kemian kandidaattivaiheen opiskelijoilla (Sreenivasulu & Subramaniam, 2014). Laitteiston avulla suoritettavilla tutkimuksilla kemian eri tasoja saadaan integroitua toisiinsa, mikä voi tukea haastavan aiheen oppimista. Oppimisessa olennaista on aikaisempien tietojen aktivointi. Lukiossa kidekenttäteorian ajatuksen esittäminen voi auttaa ymmärtämään väri-ilmiöitä paremmin sekä antaa tietopohjaa, joita voi mahdollisesti aktivoida myöhemmin yliopisto-opinnoissa.

Työ tukee myös aineiden rakenteen ja ominaisuuksien tutkimisen taitoja, jotka kuuluvat lukion opetussuunnitelman tavoitteisiin. Vaikka laitteisto ei anna absorptiospektriä, voidaan opiskelijoita ohjata esimerkiksi hahmottelemaan näytteille spektri, johon y-akselin intensiteetin tilalle muutetaankin absorbanssi. Näin myös menetelmätieto kehittyi.

Kuten jo edellä todettiin, opetusmenetelmäksi laaja-alaiseen oppimiskokonaisuuteen soveltuu hyvin projektioppiminen. Sen piirteisiin kuuluu muun muassa tutkimuksellisuus, oppilaslähtöisyys, yhteistoiminnallisuus ja reflektointi sekä linkki arkielämään (Kokotsaki ym., 2016). Nämä ovatkin helppo liittää osaksi tällaista kokonaisuutta. Projektityössä voidaan soveltaa myös tutkivan oppimisen mallia, jossa tavoitteena on jaettu asiantuntijuus (Hakkarainen ym., 2004). Opiskelijat voivat itse esittää

arkielämän ilmiöistä kysymyksiä ja pohtia, miten kiinnostusta herättävää ilmiötä voisi tutkia esimerkiksi itse rakentamalla laitteistolla. Kysymysten esittäminen onkin tärkeä osa tutkimuksellisuutta ja keskeinen lähtökohta projektityöskentelylle (Blumenfeld ym., 1991; Abrams ym., 2008). Erityisesti tutkimuksellinen opiskelu ja opiskelijoiden kysymykset soveltuvat orientaatiovaiheeseen, jossa selvitetään arkikokemuksia aiheesta, jäsenellään olemassa olevaa tietoa sekä pohditaan, millaista uutta tietoa tarvitaan. Samalla aktivoituvat aikaisemmat tiedot aiheesta, mikä tukee mielekästä oppimista. Opiskelijoiden kysymyksille on kuitenkin paikkansa oppimisprosessin jokaisessa vaiheessa.

Laaja-alainen projektityö edellyttää monia projektin organisaatiotaitoja kuten ajankäytönhallintaa. Opettajat kokevat lisäksi haasteina tekniset asiat, resurssit, oppijoihin liittyvät haasteet sekä yhteistyön. (Aksela & Haatainen, 2019) Opettajia tulee olla riittävästi, kun opiskelijat ovat monien haastavien asioiden äärellä. Motivaation säilyttämisen kannalta oppijan kyvykkyyden kokemuksen vahvistaminen on erityisen tärkeää. Lisäksi laaja-alainen projektityö vaatii osaamista oman opetusalan ulkopuolelta. Yhteisopettajuus voi tällaisissa tilanteissa olla erityisen arvokasta. Vaikka projektien ohjaamisessa on monia haasteita, opettajat ovat havainneet opetusmenetelmässä esiintyvät monet hyödyt (Aksela & Haatainen, 2019). Projektioppiminen tukee niin oppijoiden kuin opettajienkin oppimista ja motivaatiota, yhteistyötä ja yhteisöllisyyttä sekä oppijälähtöisyyttä. Lisäksi se monipuolistaa opetusta.

4.2 Esimerkki toteutuksesta

Projektityön etenemisessä voidaan käyttää tukena tutkivan oppimisen mallia. Projektit tehdään pienryhmissä, mutta eri ryhmät voivat myös jakaa tietoa keskenään. Ryhmän sisällä on hyvä jakaa vastuualueet. Vertaispalautetta annetaan toisten töistä tietyin väliajoin eikä vain lopputuotoksen valmistuttua.

Työ voidaan aloittaa yhteisillä pohdinnoilla värien näkemisestä ja värillisistä yhdisteistä, jotka sisältävät metalleja. Opiskelijat esittävät kysymyksiä aiheesta ja kertovat toisilleen esimerkkejä aiheesta omiin kokemuksiin pohjautuen. Opiskelijat voivat pohtia aiheeseen liittyviä ilmiöitä sekä esittää hypoteeseja erilaisista selityksistä näille. Metalleihin ja väreihin liittyvää ilmiötä lähdetään tarkastelemaan opiskelijoiden muodostamien kysymysten pohjalta. Opiskelijoiden on pienryhmissä suunniteltava lisäksi, miten he voisivat kyseistä ilmiötä mitata. Ryhmissä etsitään erilaisia tapoja rakentaa spektrofotometri. Samalla tutustutaan laitteiston toimintaan ja sen eri

komponentteihin. Projektityöhön voi halutessaan liittää 3D-tulostusta, jolla voidaan valmistaa esimerkiksi jokin laitteiston komponentti.

Tavoitteena on rakentaa oma spektrofotometri ja tehdä sillä mittauksia tarkasteltavasta ilmiöstä. Ryhmät saavat valita, millä tavalla haluavat projektityön vaiheet, tarkasteltavan kemian, tulokset ja johtopäätökset muulle ryhmälle esittää. Jokin verkkoversio voi olla hyvä, jotta opettaja pääsee seuraamaan työn edistymistä ja antamaan formatiivista palautetta työn jokaisessa vaiheessa. Dokumentti voi olla esimerkiksi sähköinen poster. Ryhmät esittävät toisilleen myös rakentamansa laitteiston ja sen toimintaperiaatteen, jolloin ryhmät pääsevät vertailemaan eri tavoin rakennettuja spektrometrejä. Jos aikaa jää, voidaan projektityöhön liittää vierailu yritykseen tai yliopistoon, jossa päästään tutustumaan tarkemmin sen erilaisiin sovelluskohteisiin.

5 Johtopäätökset

Spektrofotometrin rakentaminen ei tämän projektityön resursseilla täysin onnistunut, mikä näkyy esimerkiksi tulososiossa esitettyjen spektrien laadussa. Vaadittuun mittaustarkkuuteen ei päästy. Laitteisto ei myöskään mittaa absorbanssia, mikä oli laitteiston vähimmäisvaatimus. Osa tavoitteista kuitenkin saavutettiin. Laitteiston osille rakennettiin laatikko, johon on mahdollista kiinnittää (tosin heikosti) valonlähde, kyvetti sekä spektroskooppi. Kun mikrotietokoneen kiinnitti laatikon ulkopuolelle, se oli jokseenkin liikuteltavissa yhtenä kevyehkönä systeeminä. Laitteistoa on myös turvallista käyttää. Spektrofotometrillä voitiin suorittaa vain laadullisia mittauksia. Yhtäkään toivottua ominaisuutta ei rakentamisprosessissa saatu aikaan. Tämä heijastuu laitteiston käyttöön ja tulosten laatuun.

STEM-aineita sisältävä tutkimuksellinen projektityö on haastava, mutta monipuolinen ja opettavainen jos aikaa ja osaamista on riittävästi. Tällainen opetusmenetelmä sisältää paljon haasteita myös opettajien näkökulmasta. Pedagogisten meriittien ansiosta sitä kuitenkin tulisi sisällyttää opetukseen enemmän. Tämän takia on erityisen tärkeää pohtia muun muassa niitä keinoja, joilla tuetaan opettajien projektin organisaatiotaitoja sekä lisätään resursseja ja toimivaa yhteistyötä eri aineiden opettajien välillä. Ne ovat kuitenkin avainasemassa laaja-alaisten projektien onnistumisessa.

Lähteet

- Aksela, M., & Haatainen, O. (2019). Project-Based Learning (PBL) in Practise: Active Teachers' Views of Its' Advantages and Challenges. In *Integrated Education for the Real World: 5th International STEM in Education Conference Post-Conference Proceedings* (pp. 9–16). Queensland University of Technology.
- Bougot-Robin, K., Paget, J., Atkins, S. C. & Edell, J. B. (2016). Optimization and Design of an Absorbance Spectrometer Controlled Using a Raspberry Pi to Improve Analytical Skills. *Journal of Chemical Education*, 93(7), 1232–1240. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b01006>
- Chng, J. J. K. & Patuwo, M. Y. (2021). Building a Raspberry Pi Spectrophotometer for Undergraduate Chemistry Classes. *Journal of Chemical Education*, 98(2), 682–688. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.oco0987>
- Hakkarainen, K., Lonka, K. & Lipponen, L. (2004). *Tutkiva oppiminen. Järki, tunteet ja kulttuuri oppimisen sytyttäjinä*. WSOY.
- Hobbs, S. W., Paull, D. J. & McDougall, T. (2019). Evaluating low-cost spectrometer designs for utility in reflectance and transmittance applications. *International Journal of Remote Sensing*, 40(2), 642–669. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1516315>
- Isaak, S., Yusof, Y., Ngajikin, N. H., Ramli, N. & Wen, C. M. (2019). A low-cost spectroscopy with Raspberry Pi for soil macronutrient monitoring. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 17(4), 1867. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v17i4.12775>
- Mikkonen, K. & Närhi, K. (2010). *Käyttöohjeen laadinta UVmini-1240 -spektrofotometrille* [opinnäytetyö, Oulun seudun ammattikorkeakoulu]. Theseus-julkaisuarkisto.
- Nivaldo, T. J. (2016). *Chemistry: A Molecular Approach, Global Edition*. Pearson.
- Opetushallitus. (2019). Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019. Helsinki: Opetushallitus. Luettavissa: https://www.oph.fi/sites/default/files/documents/lukion_opetussuunnitelman_perusteet_2019.pdf
- O'Toole, M. & Diamond, D. (2008). Absorbance Based Light Emitting Diode Optical Sensors and Sensing Devices. *Sensors*, 8(4), 2453–2479. <https://doi.org/10.3390/s8042453>
- Rob, J. & Moore, E. (2004). *Metal-Ligand Bonding*. Milton Keynes.
- Sreenivasulu, B. & Subramaniam, R. (2014). Exploring Undergraduates' Understanding of Transition Metals Chemistry with the use of Cognitive and Confidence Measures. *Research in Science Education*, 44(6), 801–828. <https://doi.org/10.1007/s11165-014-9400-7>
- Wright, L. (2021). PySpectrometer. Saatavissa: <https://github.com/leswright1977/PySpectrometer/tree/main/src>
- Yingprayoon, K. & Tanachutiwat, S. (2020). Simple Spectrometer for Education Using Microcontroller. *2020 17th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 592–594. <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON49241.2020.9158310>