



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND

Opetusmateriaali: Näkyvän valon absorboituminen
veteen

OPETTAJAN VERSIO

Mirja Mäkelä
Itä-Suomen yliopisto
Maaliskuu 2024

Sisällysluettelo

| | |
|-----------------------------------|----------|
| 1 Johdanto | 1 |
| 2 Teoria | 2 |
| 2.2 Fotoni | 2 |
| 2.3 Värien havaitseminen | 3 |
| 2.4 Transmittanssi ja absorbanssi | 4 |
| 2.5 Spektrofotometri | 5 |
| 3 Tehtävät | 6 |

Käsitteet

Spektrofotometri

Sähkömagneettinen säteily

Fotoni

Transmittanssi

Absorbanssi

Beer-Lambertin laki

Metameria

1 Johdanto

Tämä opetusmateriaali on suunniteltu lukion opetussuunnitelman (2019) mukaan fysiikan opetukseen moduulille FY7 *Sähkömagnetismi ja valo* tai fysiikan kertausmoduulille. Materiaalissa on sisältöjä, joita opiskellaan vasta lukion fysiikan moduulissa FY8 *Aine, säteily ja kvantittuminen*, mutta opetusmateriaalin teossa on huomioitu oppilaan oletettu fysiikan pohjatieto.

Opetusmateriaalin teossa on oletettu moduulin FY7 keskeisten sisältöjen olevan saatavilla tai ennestään tuttuja, puolestaan moduulin FY8 tarvittavia sisältöjä on esitetty opetusmateriaalin *Teoria*-alaluvussa. Tämä materiaali soveltuu käytettäväksi sellaisenaan 75 minuutin oppitunnille.

Opetusmateriaalin tarkoitus on syventää opiskelijan tietämystä näkyvän valon ominaisuuksista. Tarkemmin opetusmateriaali perehtyy siihen, miten sähkömagneettinen säteily käyttäytyy väliaineessa. Lisäksi opetusmateriaali syventyy siihen, minkälainen mittalaite spektrofotometri on sekä minkälaisia tuloksia sillä voi saada. Opetusmateriaalissa on teoriaosuus, jonka jälkeen on neljä (4) tehtävää.

Opetusmateriaalissa olevat tulokset on mitattu Itä-Suomen yliopistolla lokakuussa 2023 osana opetusmateriaalin tekijän pro gradu -tutkielmaa. Opetusmateriaalin tekijä haluaa, että opiskelija voi syventää tietämystään valon käyttäytymisestä vedessä, koska peruskoulu- sekä lukiotasolla eniten käsitellään valon etenemistä ilmassa eikä muita väliaineita ole suuremmin huomioitu.

Opetusmateriaalista on julkaistu oppilaan sekä opettajan versioit, joista opettajan versiosta löytyy tehtävien mallivastaukset.

Opetusvinkki: Mikäli haluatte luokan kanssa syventyä aiheeseen sekä käytössänne on spektrofotometri, voi mittaukset suorittaa myös muilla aineilla, kuten etanolilla, glykolilla tai uudestaan vedellä sekä verrata saatuja tuloksia opetusmateriaalin tuloksiin.

2 Teoria

Lukion fysiikan moduulissa *F7 Sähkömagnetismi ja valo* on opittu valon käyttäytymisestä, valon spektristä sekä mitä on sähkömagneettinen aaltoliike. Tässä materiaalissa keskeiset käsitteet ovat sähkömagneettinen säteily, fotoni, transmittanssi, absorbanssi, Beer-Lambertin-laki, metameria sekä spektrofotometri. Mikäli olet suorittanut lukion fysiikan valinnaisen moduulin *FY8 Aine säteily ja kvantittuminen*, ovat käsitteet fotoni sekä absorbanssi tuttuja.

2.1 Fotoni

Sähkömagneettinen säteily koostuu *fotoneista*, joita kutsutaan myös valokvanteiksi. Fotoni on sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkanen ja sen hiukkasluonne voidaan havaita, kun fotoni on vuorovaikutuksessa aineen kanssa. Fotonin ominaisuuksia on, että se kulkee tyhjiössä valonnopeudella, sillä ei ole massaa eikä sähkövarausta. Lisäksi fotoni kuljettaa energiaa, jota se voi luovuttaa vuorovaikuttaessaan väliaineen, kuten veden kanssa. Fotonin energian, E , voi laskea kaavan 1 avulla.

$$E = hf \tag{1}$$

Kaavassa 1 E on fotonin energia, f on fotonin taajuus [f] = Hz ja h on Planckin vakio ja sen arvo on $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34}$ Js. Fotonin energian kaava voidaan esittää myös eri muodossa, kun otetaan huomioon, että sähkömagneettisella säteilyllä on hiukkasominaisuuksien lisäksi myös aaltoliikkeen ominaisuuksia. Kun sijoitamme aaltoliikkeen perusyhtälön kaavaan 1, saamme toisen tavan esittää fotonin energian (Kaava 2).








$$E = \frac{hc}{\lambda} \tag{2}$$

Kaavassa 2 c on valonnopeus tyhjiössä $299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ja λ on aallonpituus, [λ] = m. Energian E yksiköksi saadaan [E] = J.

2.2 Värien havaitseminen

Ihmissilmä kykenee muuttamaan näkyvän valon aallonpituudet (400–700 nm) näköaistimukseksi. Jotta voimme nähdä esineen, täytyy sen heijastaa näkyvän valon aallonpituuden vaihteluvälille osuvaa säteilyä. Tietyt aallonpituuden vaihteluvälit havaitaan eri väreinä alla olevan taulukon 1 avulla.

Taulukko 1. Näkyvän valon spektri ilmassa.

| violetti | sininen | sinivihreä | vihreä | keltainen | oranssi | punainen |
|---|---|---|--|---|---|---|
|  |  |  |  |  |  |  |
| 400-450 nm | 450-480 nm | 480-490 nm | 490-560 nm | 560-590 nm | 590-630 nm | 630-700 nm |

Esimerkiksi viereisessä kuvassa 1 voidaan nähdä vihreä ilmapallo. Tämä tarkoittaa siis sitä, että ilmapalloon osuu kaikkia näkyvän valon spektrin aallonpituuksia, mutta muut aallonpituudet absorboituvat ilmapalloon paitsi vihreän värin aallonpituutta vastaava säteily. Taulukosta 1 voidaan siis lukea, että ilmapallo heijastaa säteilyä aallonpituuksilla 490–560 nm, jonka vuoksi se voidaan havaita vihreänä. Todellisuudessa värien havaitseminen ei ole näin yksinkertaista, vaan kaksi eri henkilöä voi aistia samassa tilassa olevan saman esineen erivärisenä. Tai kaksi eri esinettä voidaan aistia tietyssä valaistuksessa samanvärisenä, mutta kun valaistusta muutetaan, aistitaan esineet erivärisinä. Tämä ilmiö perustuu metameriaan, joka tarkoittaa sitä, että sama näköaistimus voidaan saada aikaan erilaisten spektriin avulla.



Kuva 1. Kuva vihreästä ilmapallosta sidottuna keittopulloon.

2.3 Transmittanssi sekä absorbanssi

Transmittanssi, T , kuvaa näytteen läpäisseen sekä alkuperäisen säteilyn suhdetta kaavan 3 mukaan. Mitä suurempi transmittanssi, sitä enemmän näyte päästää säteilyä lävitseen. Transmittanssi saa arvoja 0–1 välillä, koska näytteeseen on absorboitunut energiaa, jolloin näytteen läpäisseen säteilyn intensiteetti, I on pienempi kuin alkuperäisen säteilyn intensiteetti I_0 . Intensiteetti kuvaa säteilyn tehoa tietyllä pinta-alalla ja intensiteetin yksikkö on $[I] = \text{W}/\text{m}^2$. Kaavassa 3 T on transmittanssi, I on näytteen läpäisseen säteilyn intensiteetti ja I_0 on alkuperäisen säteilyn intensiteetti.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

Absorbanssi, A , on aineen ominaisuus, joka kertoo aineen kyvystä päästää valoa lävitseen. Kuten aiemmin opittiin, valo koostuu fotoneista, jotka kuljettavat energiaa. Näin ollen, absorbanssi kuvaa absorboituneen energian osuutta väliaineeseen. Mitä vähemmän se päästää valoa lävitseen, sitä enemmän valoa eli energiaa aine absorboi itseensä. Aineen absorbanssi voidaan laskea kaavan 6 avulla, josta huomataan, että absorbanssilla on logaritminen yhteys transmittanssiin T . Kaavassa 4 A on absorbanssi, I on näytteen läpäisseen säteilyn intensiteetti ja I_0 on alkuperäisen säteen intensiteetti. Kaava 5 saadaan, kun yhdistämme kaavan 3 sekä kaavan 4, jolloin voimme intensiteettien suhteen ilmaista transmittanssin T avulla. Logaritmin laskusääntöjä hyödyntäen kaava 4 saadaan lopulliseen muotoon 6.

$$A = \log_{10} \frac{I_0}{I} \quad (4)$$

$$A = \log_{10} \frac{1}{T} \quad (5)$$

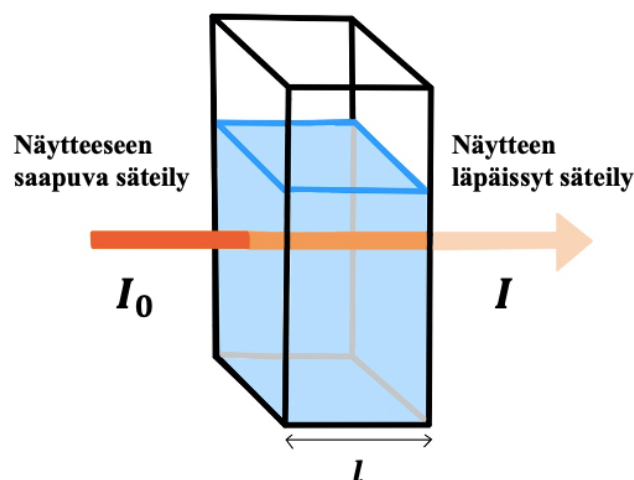
$$A = -\log_{10} T \quad (6)$$

Beer-Lambertin laki kuvaa lineaarista yhteyttä, joka absorbanssilla sekä näytteen konsentraatiolla on. Lineaarinen yhteys tarkoittaa sitä, että mitä suurempi näytteen konsentraatio on, sitä suurempi on aineen absorbanssi eli aine läpäisee vähemmän valoa mitä väkevämpi näyte on kyseessä. Lisäksi näytteen paksuus vaikuttaa absorbanssiin siten, että mitä pidemmän matkan säteily kulkee väliaineessa, sitä enemmän sitä absorboituu aineeseen eli absorbanssi on tällöin suurempi. Kaavassa 7 A on absorbanssi, ε on molaarinen absorptiokerroin [ε] = $\frac{\text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{cm}}$, l on näytteen paksuus [l] = cm ja c on näytteen konsentraatio [c] = $\frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}$. Molaarinen absorptiokerroin ε on jokaiselle aineelle ominainen vakio ja se kuvaa sitä, kuinka hyvin aine absorboi sen lävitse menevää säteilyä.

$$A = \varepsilon cl \quad (7)$$

2.4 Spektrofotometri

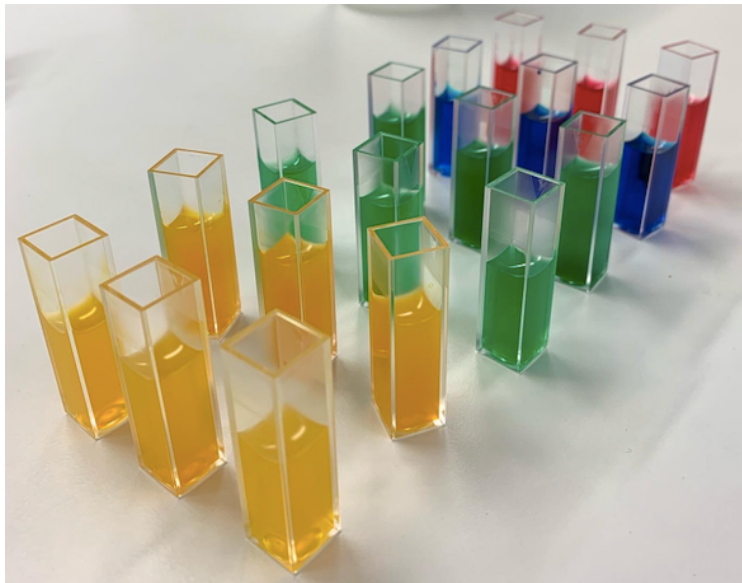
Spektrofotometri on laite, jolla voi mitata muun muassa eri aallonpituuksien absorptiota näytteessä. Mitattaessa spektrofotometrillä, valitaan haluttu aallonpituuden vaihteluväli, jota halutaan suunnata näytteeseen. Spektrofotometreissä yleisin aallonpituuden vaihteluväli on ultraviolettisäteilystä (100 – 400 nm) infrapunasäteilyyn (700 – 1000 nm), sillä tämä vaihteluväli sisältää myös näkyvän valon aallonpituudet (400 – 700 nm). Spektrofotometriin asetetaan tutkittavaa näytettä sisältävä kyvetti (Kuva 2), jonka läpi laite ohjaa säteilyä, jonka intensiteetin muutoksen perusteella voidaan laskea näytteen konsentraatio Beer-Lambertin lain mukaan. Kuvassa 2 on esitetty kyvetti, johon on laitettu tutkittavaa näytettä. Näytteen paksuus on l , näytteeseen saapuvan säteilyn intensiteetti I_0 ja näytteen läpäissyt intensiteetti I .



Kuva 2. Spektrofotometriin laitettava kyvetti, jonka läpi ohjataan säteilyä

3 Tehtävät

Tutkija halusi selvittää, miten eriväriset näytteet erottuvat spektrofotometrillä tehdyissä mittauksissa. Tutkija haki kolmea eri vesinäytettä: hanavettä, tislattua vettä sekä järvivettä Pielisjoesta. Hän värjäsi jokaisen näytteen eri värillä: punaisella, vihreällä, keltaisella sekä sinisellä (Kuva 3). Lisäksi tutkija halusi tutkia onko saaduissa tuloksissa eroavaisuuksia, jos hän lisää toisiin näytteisiin enemmän väriainetta eli suurentaa niiden värikonsentraatiota.

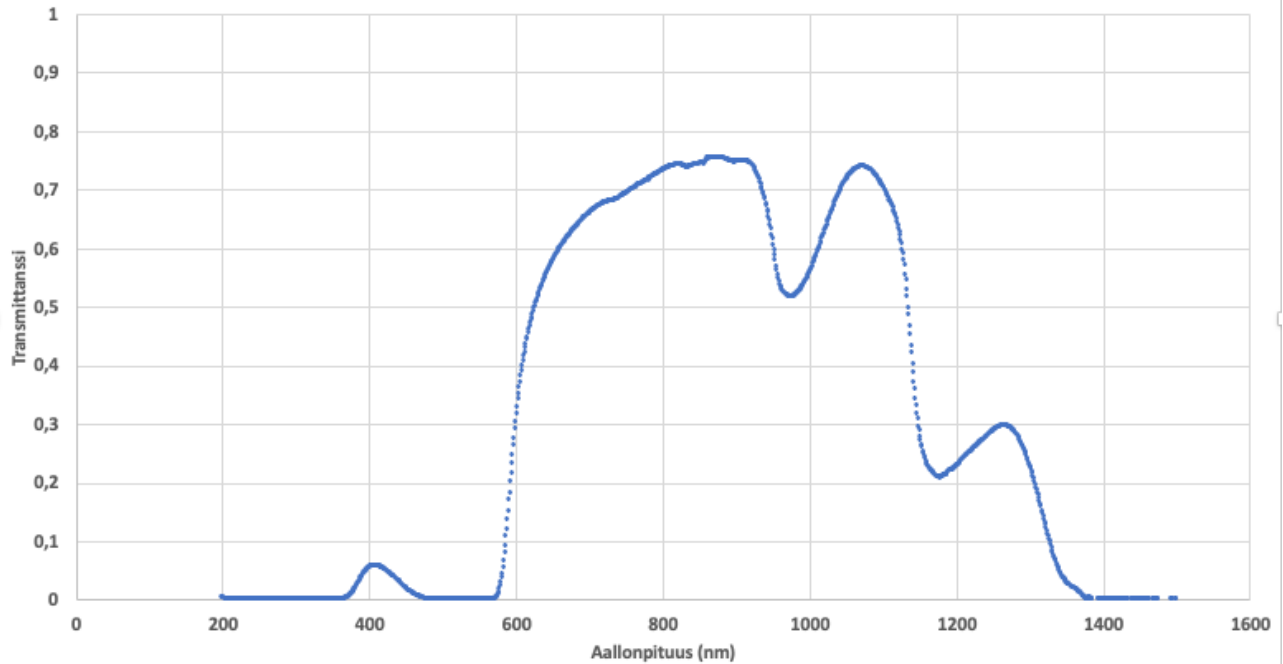


Kuva 3. Värjätyn näytteet kyveteissä hanavedestä, tislattusta vedestä sekä Pielisjoesta.

Alla on neljä (4) tehtävää sekä tehtävien mallivastaukset.

Tehtävä 1. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty värjätyn tislatun veden transmittanssikuvaaja, jossa aallonpituus on muuttujana.

- Millä näkyvän valon aallonpituuden välillä näyte päästää valoa lävitseen?
- Minkä värinen näyte on?



Mallivastaus:

Tiedetään, että näkyvän valon aallonpituuden vaihteluväli on noin 700–400 nm. Transmittanssi kertoo kuinka paljon valoa näyte päästää lävitseen, joten mikäli $T > 0$, voidaan kuvaajalta lukea vastaavat aallonpituudet näkyvän valon aallonpituuksilta.

a) Kun $T > 0$

Näyte päästää eniten valoa lävitseen aallonpituuden vaihteluväleillä

$$\Delta\lambda = 745 \text{ nm} - 580 \text{ nm}$$

Lisäksi

$$\Delta\lambda = 470 \text{ nm} - 370 \text{ nm}$$

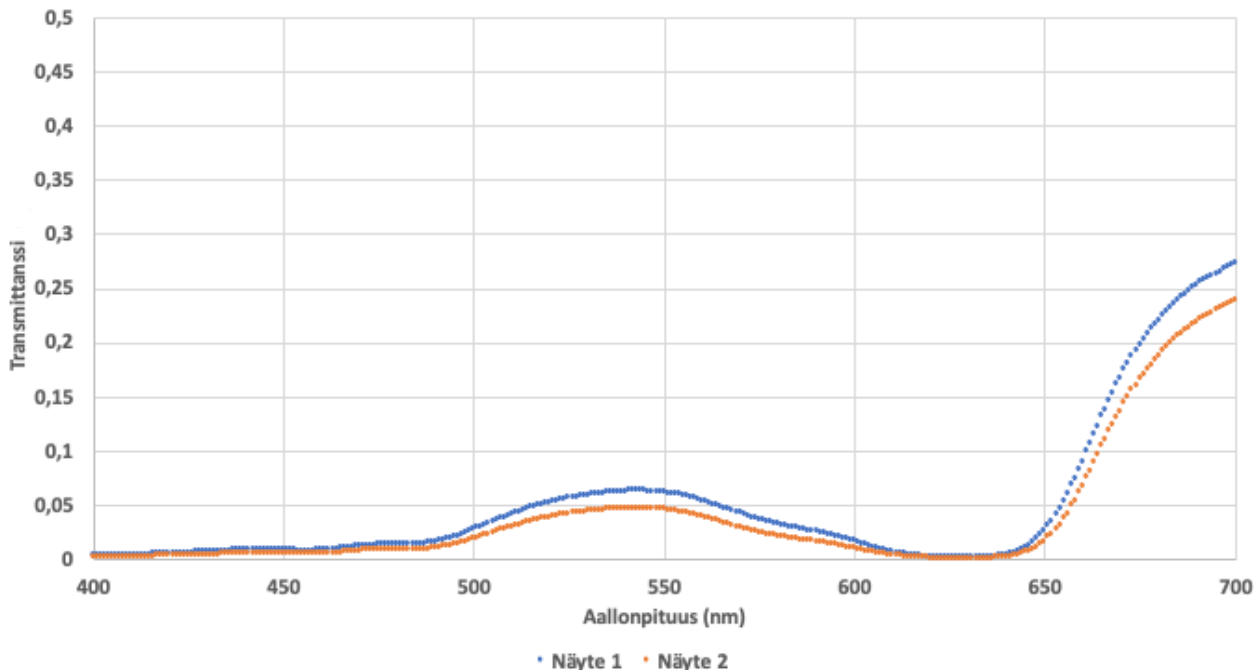
b) Aallonpituuden vaihteluvälillä $\Delta\lambda = 745 \text{ nm} - 580 \text{ nm}$ näytteellä on suurempi transmittanssi eli se läpäisee tällöin enemmän säteilyä kuin toisella vaihteluvälillä. Nyt voidaan lukea näkyvän valon spektristä (Taulukko 1), että valo, jonka näyte päästää lävitseen, vastaa parhaiten punaisen

värin aallonpituutta 630 nm-700 nm. Näin ollen näyte on punainen. Alla olevassa kuvassa 4 on kyseinen näyte.



Kuva 4. Tehtävässä 1 kuvattu näyte. Näytteen väri on punainen.

Tehtävä 2. Tutkijalla oli kahdessa kyvetissä tislattua vettä, mutta hän oli lisännyt niihin eri määrän vihreää väriainetta. Näytteillä oli siis eri konsentraatio, mutta kummalla näytteellä, 1 vai 2 oli suurempi konsentraatio? Perustele vastauksesi.



Mallivastaus:

Tehtävässä tulee selvittää kummalla näytteellä, 1 vai 2, on suurempi konsentraatio, joten tehtävän ratkaisuun tarvitsemme Beer-Lambertin lakia (Kaava 7) sekä absorbanssin ja transmittanssin yhteyttä (Kaava 6).

Tehtävänannossa sanottiin, että kyseessä on väriltään vihreä näyte, joten tarkastelemme aallonpituuden vaihteluväliä 490 nm – 560 nm. Valitaan kyseiseltä aallonpituuden vaihteluväliltä aallonpituus esimerkiksi 550 nm ja luetaan y-akselilta näytteiden transmittanssit kyseisellä aallonpituudella.

$$T_{\text{näyte 1}} = 0,06$$

$$T_{\text{näyte 2}} = 0,05$$

Lasketaan seuraavaksi transmittansseja vastaavat absorbanssit kaavan 6 avulla.

$$A_{\text{näyte 1}} = -\log_{10}(T_{\text{näyte 1}}) = -\log_{10}(0,06) = 1,22$$

$$A_{\text{näyte 2}} = -\log_{10}(T_{\text{näyte 2}}) = -\log_{10}(0,05) = 1,30$$

Beer-Lambertin lain mukaan näytteen absorbanssi on suoraan verrannollinen näytteen konsentraatioon. Molemmat näytteet olivat tislattua vettä, joten molaarinen absorptiokerroin ε on molemmissa näytteissä sama. Lisäksi käytetyt kyvetit ovat identtisiä, joten näytteen paksuus l on sama.

$$\frac{A_{\text{näyte1}}}{A_{\text{näyte2}}} = \frac{\varepsilon c_{\text{näyte1}} l}{\varepsilon c_{\text{näyte2}} l}$$

$$\frac{A_{\text{näyte1}}}{A_{\text{näyte2}}} = \frac{c_{\text{näyte1}}}{c_{\text{näyte2}}}$$

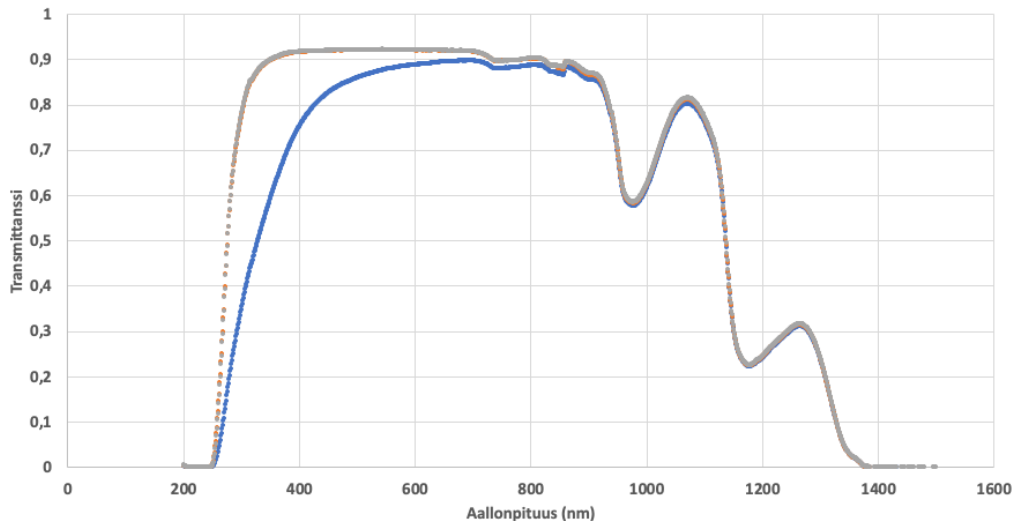
$$c_{\text{näyte1}} = \frac{A_{\text{näyte1}}}{A_{\text{näyte2}}} * c_{\text{näyte2}}$$

$$c_{\text{näyte1}} = \frac{1,22}{1,30} * c_{\text{näyte2}}$$

$$c_{\text{näyte1}} = 0,94 * c_{\text{näyte2}}$$

Näin ollen suoraan verrannollisuudesta saadaan, että näytteen 2 konsentraatio on suurempi kuin näytteen 1. HUOM. Vastauksen olisi voinut perustella myös siten, että $A_1 < A_2$ ja perustella tuloksen Beer-Lambertin lain sekä suoraan verrannollisuuden avulla.

Tehtävä 3. Tutkija halusi tutkia eri vesistöjen säteilyn läpäisykykyä. Tutkija sai alla olevan kuvaajan värittömien näytteiden transmittansseista. Kuvaajasta puuttuu kuitenkin selitteet, mistä näytteestä on kyse, mutta tutkija muistaa, että Pielisjoen vesi absorboi enemmän säteilyä kuin tislattu vesi sekä hanavesi. Täytä tietojen perusteella alla oleva taulukko sekä laske näytteille absorbanssit aallonpituuden arvolla 400 nm.



Näytteet:

Näyte 1: Tislattu vesi

Näyte 2: Hanavesi

Näyte 3: Pielisjoen vesi

| Kuvaajan väri | Näyte | Absorbanssi, A(400nm) |
|---------------|-------|-----------------------|
| Sininen | | |
| Oranssi | | |
| Harmaa | | |

Mallivastaus:

Tehtävänannosta pystyi päättelemään, että Pielisjoen näytteellä on pienin transmittanssi, koska sillä oli suurin absorbanssi. Hanaveden sekä tislattun veden kuvaajat ovat melkein identtiset, joten näiden välillä ei voitu tehdä tarkkaa erottelua ja oranssiin sekä harmaaseen kuvaajaan käy kumpi tahansa.

Absorbanssi saadaan laskettua kaavan 6 avulla, kun luetaan säteilyjen transmittanssit kuvaajalta, kun $\lambda = 400 \text{ nm}$.

$$T_{Pielisjoki} = 0,75$$

$$T_{hana- ja tislattu vesi} = 0,92$$

Joten kaavan 6 avulla saadaan laskettua säteilyjen absorbanssit näkyvän valon aallonpituudella 400 nm.

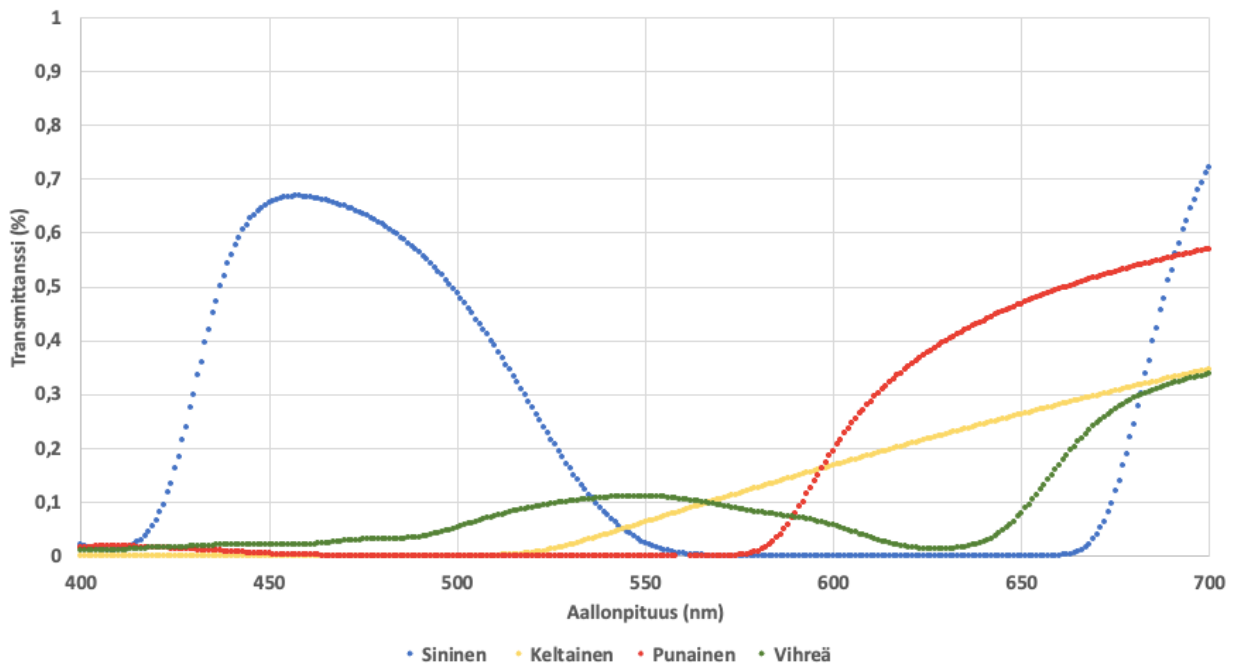
$$A_{Pielisjoki} = -\log_{10}(T_{Pielisjoki}) = -\log_{10}(0,75) = 0,125 (\approx 12,5 \%)$$

$$A_{hana- ja tislattu vesi} = -\log_{10}(T_{hana- ja tislattu vesi}) = -\log_{10}(0,92) = 0,0362 (\approx 3,62 \%)$$

Taulukko saadaan täytettyä esimerkin mukaiseksi.

| Kuvaaja | Näyte | Absorbanssi, A(400nm) |
|---------|------------------------------------|-----------------------|
| Sininen | Pielisjoki (näyte 3) | 0,125 |
| Oranssi | Tislattu vesi/Hanavesi (näyte 1/2) | 0,0362 |
| Harmaa | Tislattu vesi/Hanavesi (näyte 1/2) | 0,0362 |

Tehtävä 4. Tutkija oli koonnut saatuja tuloksia taulukkoon, mutta huomasi seuraavana päivänä, että osa tuloksista oli poistunut. Täydennä alla oleva taulukko kuvaajan sekä annettujen ennakkotietojen perusteella.



Täydennä alla olevaan taulukkoon avoimet kohdat.

| Aallonpituus (nm) | Fotonin energia ($\cdot 10^{-19}J$) | Näytteen väri |
|-------------------|---------------------------------------|---------------|
| | 3,611 | Vihreä |
| | 4,414 | |
| 500 | | |
| | 3,311 | |
| | | Keltainen |

Mallivastaus:

Tehtävässä tulee hyödyntää fotonin energian kaavaa (Kaava 2).

1. rivillä oli annettu fotonin energia sekä näytteen väri. Fotonin energian avulla voitiin laskea aallonpituus. Saatu aallonpituus vasta 550 nm vastasi myös kuvaajalta annettua väriä, joten vastauksen voi sen perusteella olevan oikea.

$$\lambda_1 = \frac{hc}{E} = \frac{6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3,611 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 550 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

2. rivillä tuli ratkaista näytteen väri sekä fotonin energiaa vastaava aallonpituus. Aallonpituudeksi saatiin laskettua alla olevalla kaavalla 450 nm ja kuvaajasta voi tulkita värin olevan sininen, koska tällä aallonpituudella sinisellä näytteellä on suurin transmittanssi.

$$E = \frac{hc}{\lambda_2} = \frac{6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{450 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 4,414 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

3. rivillä oli annettu vain säteilyn aallonpituus. Aallonpituuden avulla voitiin laskea fotonin energia sekä päätellä näytteen väri. Kuvaajasta aallonpituudella 500 nm suurin transmittanssi on sinisellä näytteellä, joten voimme päätellä näytteen olevan sininen.

4. rivillä voidaan suorittaa samat laskut sekä päätelmät kuin 2. rivillä. Aallonpituudeksi saatiin 600 nm ja tätä aallonpituutta vastaava väri on punainen.

5. rivillä oli annettu, että väri oli keltainen. Kuvaajasta aallonpituuden vaihteluvälillä 570–590 nm keltaisen näytteen transmittanssi oli suurin eli näyte oli keltainen. Näin ollen vastauksessa riittää, kunhan on valinnut jonkin aallonpituuden tältä vaihteluväliltä. Energian voi laskea fotonin energian kaavan mukaan ja energian arvon tulisi olla vaihteluvälillä $(3,367\text{--}3,485) \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Alla olevaan taulukkoon on täytetty puuttuvat tiedot ja ne on tummennettu.

| Aallonpituus (nm) | Energia ($\cdot 10^{-19} \text{ J}$) | Näytteen väri |
|-------------------|--|---------------|
| 550 | 3,611 | Vihreä |
| 450 | 4,414 | Sininen |
| 500 | 3,973 | Sininen |
| 600 | 3,311 | Punainen |
| 570–590 | 3,367–3,485 | Keltainen |