



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND

Opetusmateriaali: Näkyvän valon absorboituminen
veteen

OPISKELIJAN 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

1 Johdanto

Oletko joskus joutunut tilanteeseen, jossa et pääse ystäväiesi kanssa yhteisymmärrykseen, onko paita punainen, oranssi vai korallin värinen. Tai onko kuvassa oleva meri sininen vai turkoosi. Tämän opetusmateriaalin avulla osaat vastata: ”Paita on kaikkia näitä värejä, koska jokainen aistii värit yksilöllisellä tavalla.”. Mutta mitä tämä oikein tarkoittaa?

Opetusmateriaalin tarkoitus on syventää opiskelijan tietämystä näkyvän valon ominaisuuksista sekä kuinka ihmissilmä aistii värejä. Opetusmateriaalin avulla opitaan muun muassa, että näkyvä valo menettää energiaa edetessään väliaineessa. Tarkemmin opetusmateriaali perehtyy siihen, miten sähkömagneettinen säteily käyttäytyy väliaineessa. Lisäksi opetusmateriaalissa syvennyttään siihen, minkälainen mittalaite spektrofotometri on sekä minkälaisia tuloksia sillä voi saada.

Opetusmateriaalissa olevat tulokset on suoritettu Itä-Suomen yliopistolla lokakuussa 2023 osana opetusmateriaalin tekijän pro gradu -tutkielmaa. Opetusmateriaalin tekijä haluaa, että opiskelija voi syventää tietämystään valon käyttäytymisestä, koska peruskoulu- sekä lukiotasolla eniten käsitellään valon etenemistä ilmassa eikä muita väliaineita ole suuremmin huomioitu. Opiskelija pääsee soveltamaan tietoa oppiainerajojen yli ja ymmärtää luonnontieteiden luonteesta, että ne ovat linkittyneet toisiinsa. Opetusmateriaalin sisällöt ovat sovellettavissa fysiikkaan, biologiaan sekä kemiaan. Opetusmateriaalissa on teoriaosuus, jonka jälkeen on neljä (4) tehtävää.

Käsitteet

Spektrofotometri

Sähkömagneettinen säteily

Fotoni

Transmittanssi

Absorbanssi

Beer-Lambertin laki

Metameria

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 tai lähettää 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 spektrien 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 väliaineeseen absorboituneen energian osuutta. 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

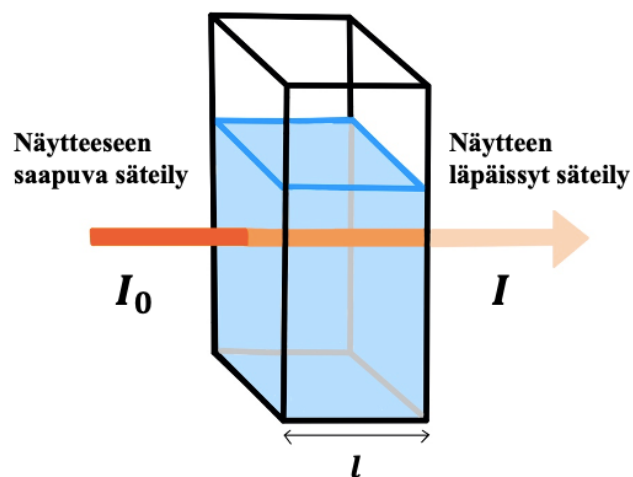
näytteen paksuus vaikuttaa absorbanssiin siten, että mitä pidemmän matkan säteily kulkee väliaineessa, sitä enemmän sitä absorboituu aineeseen eli absorbanssi on tällöin suurempi.

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

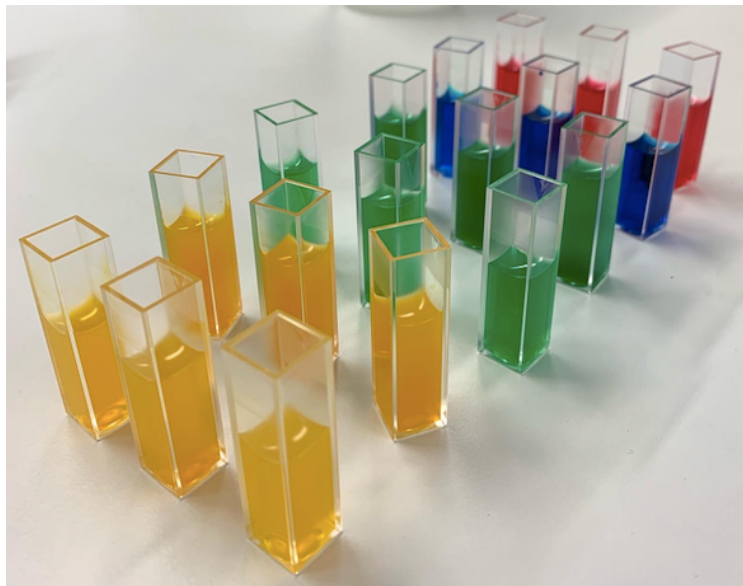
Spektrofotometri on laite, jolla voi mitata muun muassa eri aallonpituuksien absorptiota näytteessä. Mitattaessa spektrofotometrillä, valitaan haluttu aallonpituuden vaihteluväli, jota halutaan suunnata näytteeseen. Spektrofotometreissä yleisin aallonpituuden vaihteluväli on ultraviolettisäteilystä (100 – 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.

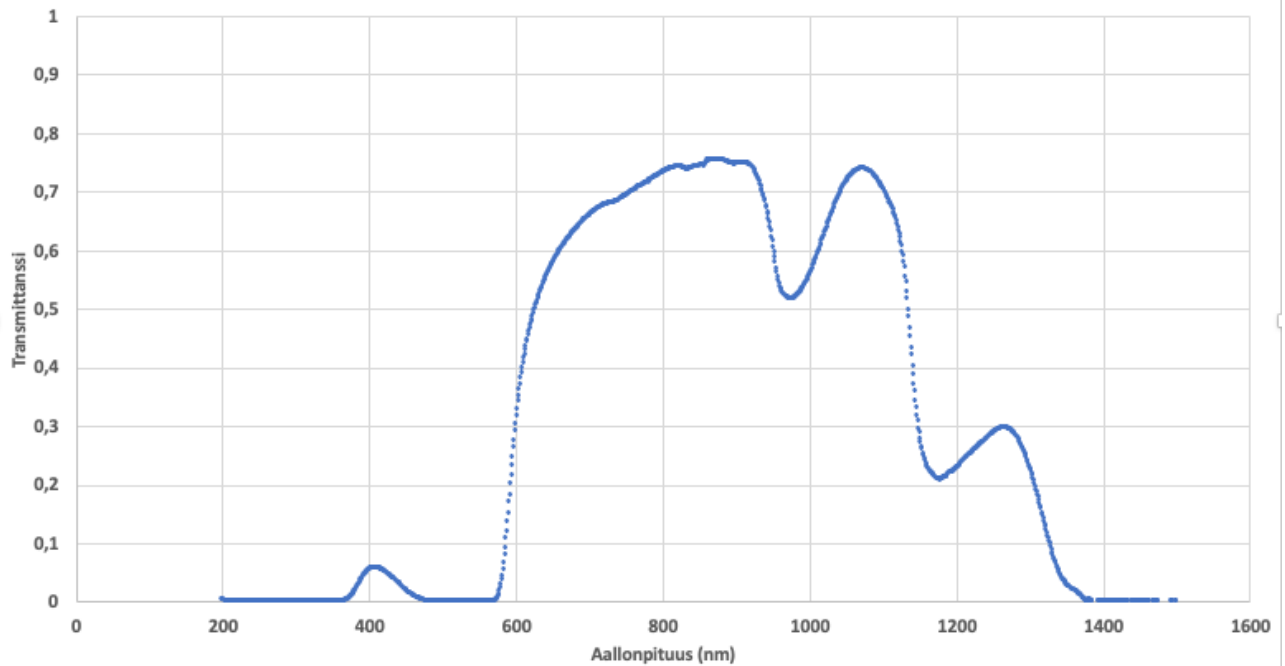


Kuva 3. Värjätyt näytteet kyveteissä hanavedestä, tislattusta vedestä sekä Pielisjoesta.

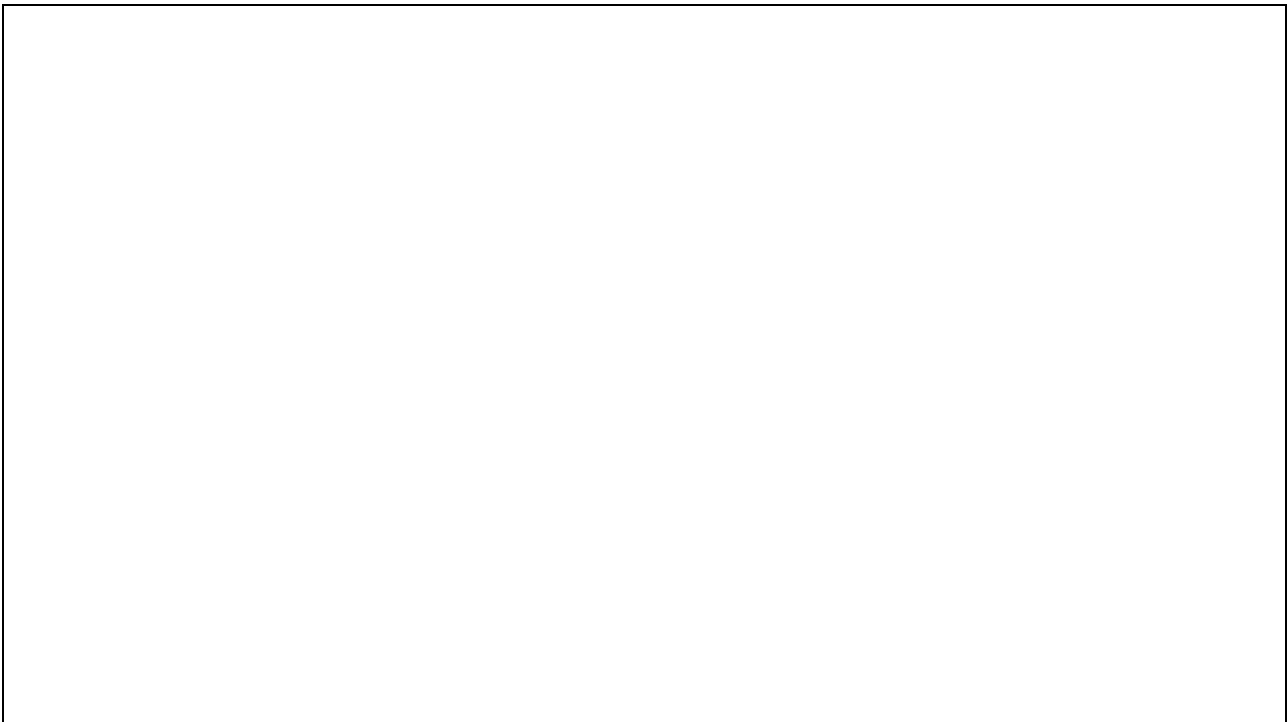
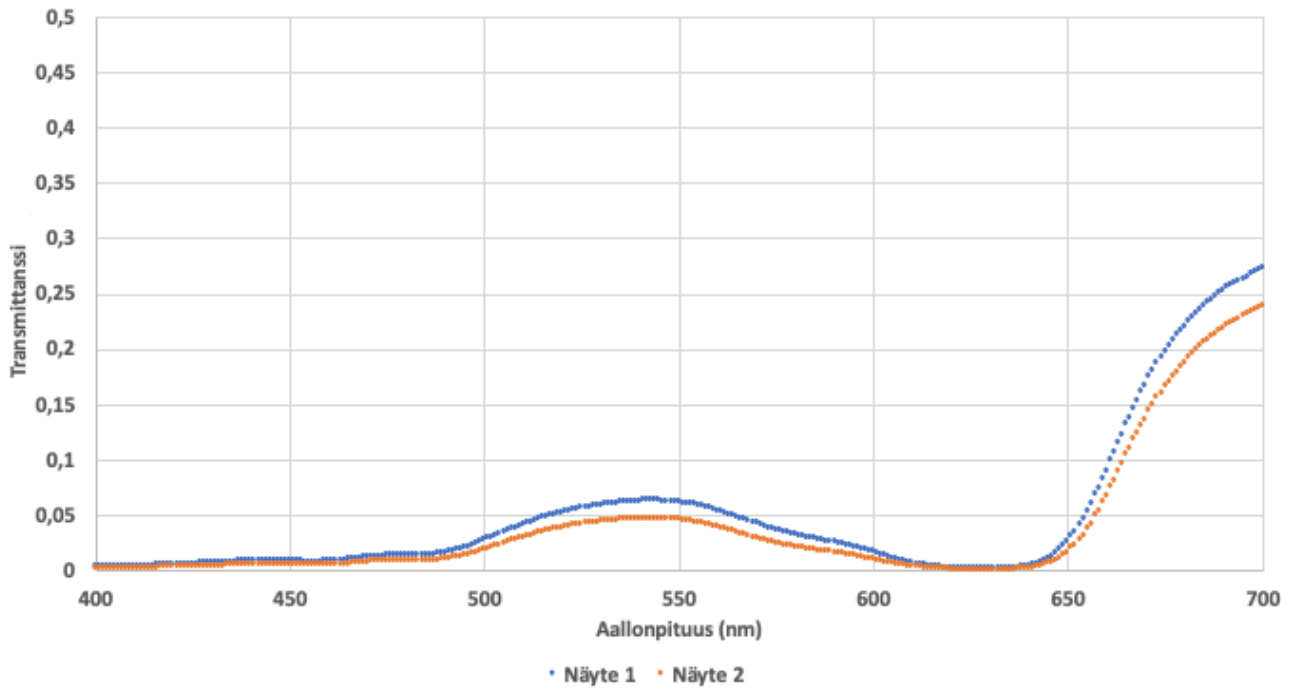
Alla on neljä (4) tehtävää, joissa pääset soveltamaan tietämystäsi valon käyttäytymisestä.

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

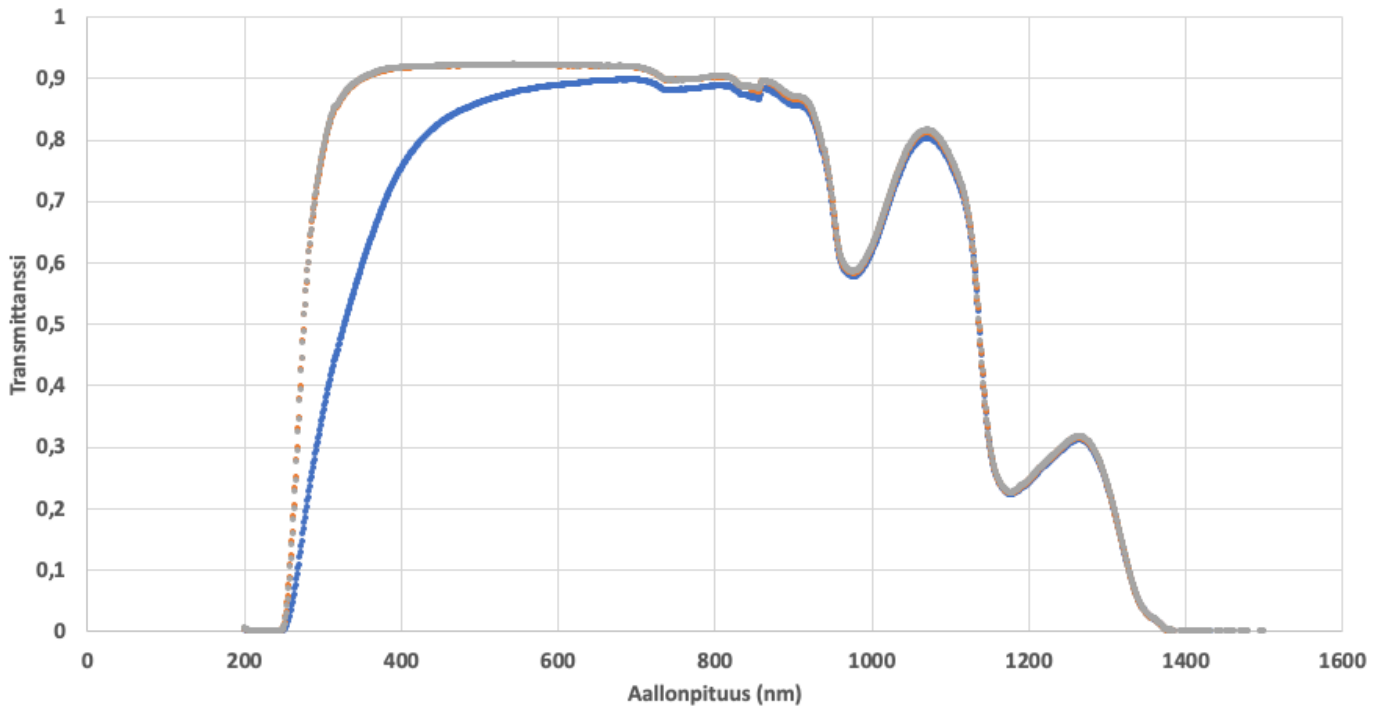
- Millä näkyvän valon aallonpituuden välillä näyte päästää valoa lävitseen?
- Minkä värinen näyte on?



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.



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:

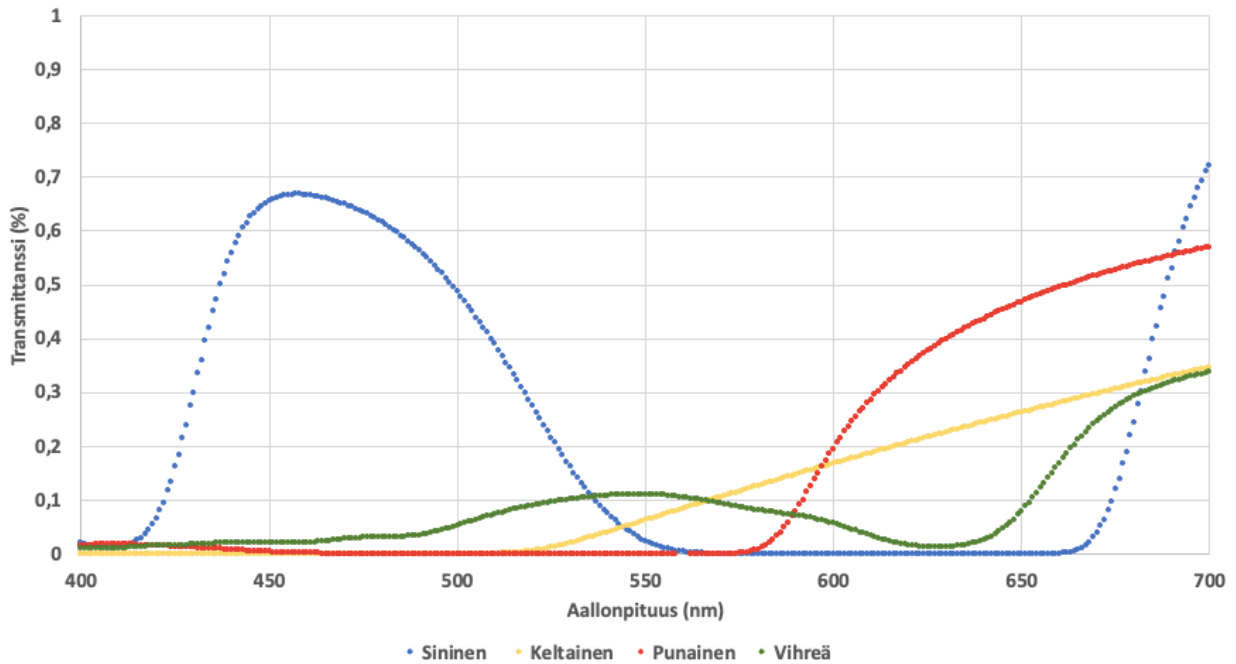
Näyte 1: Tislattu vesi

Näyte 2: Hanavesi

Näyte 3: Pielisjoen vesi

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

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 oleva taulukko.

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