
Termodynaaminen tasapainotila ja lämpöopin pääsäännöt lukio-opetuksessa

Mikko Rahkonen



Pro gradu -tutkielma
JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
FYSIIKAN LAITOS
2009

Alkusanat

Maxwellin demoni on kuvitteellinen näppäräkätinen olento, joka on kiusannut fyysikoita jo puolentoista vuosisadan ajan siirtelemällä hiukkasia toisen pääsäännön vastaisesti. Tämän olennon toiminta sai myös minut kiinnostumaan termodynamiikasta. Mieltäni kiehtoi erityisesti prosessien suunta. Miksi lämpö virtaa kuumemmasta kylmempään? Opinnäytetyöni aihe muotoutui pitkän ajan kuluessa, mutta alusta lähtien oli selvää, että se liittyy ainakin osittain toiseen pääsääntöön. Minulle heräsi mielenkiinto tutkia muiden ihmisten käsityksiä lämpöopin mielenkiintoisista ja haastavista käsitteistä, minkä vuoksi opinnäytetyöni lopullinen aihe liittyi lukiolaisten käsityksiin lämpöopista.

Haluan kiittää ohjaajaani dosentti Juha Merikoskea mielenkiintoisista keskusteluista sekä kannustavasta ja asiantuntevasta ohjauksesta. Osoitan kiitokseni yhteistyöstä myös FM Ismo Jousmäelle, kyselyyn osallistuneilla kouluille sekä taloudellisesta tuesta Jyväskylän yliopiston fysiikan laitokselle.

Jyväskylässä

13.8.2009

Tiivistelmä

Tässä tutkielmassa perehdyttiin lukiolaisten käsityksiin termodynaamisesta tasapainotilasta sekä lämpöopin ensimmäisestä ja toisesta pääsäännöstä. Tasapainotilan käsite on fysiikan tietorakenteen hierarkiassa korkealla, mutta tästä huolimatta nuorten käsityksiä siihen liittyen on tutkittu vain vähän. Ensimmäisen ja toisen pääsäännön ymmärtäminen sekä niiden soveltaminen on havaittu aiempien tutkimusten mukaan ongelmalliseksi vielä korkeakoulutasollakin.

Tutkimus suoritettiin oppikirja-analyysin ja oppilaskyselyn avulla. Oppikirja-analyysissä tutkittiin kahta Suomen lukioissa käytettävää oppikirjaa, Tammen kustantamaa Fysiikka-kirjaa sekä WSOY:n kustantamaa Physica-kirjaa. Analyysin tavoitteena oli selvittää, miten ja missä järjestyksessä lämpöopin peruskäsitteet esitetään oppikirjoissa. Oppilaskysely suoritettiin monivalintatestinä fysiikan ensimmäisellä syventävällä kurssilla viidessä suomalaisessa lukiossa talvella 2009 ja sen otos oli 144 opiskelijaa. Oppikirja-analyysissä tehtyjä havaintoja käsitteiden esiintymisestä ja niiden järjestyksestä verrattiin oppilaskyselyn tuloksiin.

Lämpöopin käsitteet ovat tämän tutkimuksen mukaan haasteellisia. Kyselyyn vastanneista opiskelijoista vain 9,7 % ymmärsi termodynaamisen tasapainotilan käsitteen tässä tutkimuksessa oletetulla opetussuunnitelman ja oppimateriaalin implikoimalla tasolla. Lukiolaisten käsitys tasapainotilasta on tämän perusteella varsin puutteellinen. Oppikirjalla ei ollut merkittävää vaikutusta tasapainotilan oppimiseen. Sisäenergian ja ensimmäisen pääsäännön lukiolaiset ymmärsivät paremmin, sillä 77,6 % vastanneista tunnisti lämpövirran suunnan ja sisäenergian kasvun systeemiä lämmitettäessä. Sisäenergian käsittely ennen ensimmäistä pääsääntöä ja kirjan havainnollinen kuva vaikuttivat myönteisesti tämän käsitteen oppimiseen. Energian säilymisen ymmärtäminen vieraassa ympäristössä osoittautui kuitenkin ongelmalliseksi. Entropia ja toinen pääsääntö ovat tutkimuksen tulosten perusteella vaikeita käsitteitä lukiolaisille. Kyselyyn vastanneista 63,4 % väitti entropian säilyvän vakiona spontaanissa prosessissa.

Sisältö

1 Johdanto	1
2 Teoreettinen tarkastelu	4
2.1 Lämpö, lämpöenergia ja lämpötila	4
2.2 Systemi ja ympäristö	5
2.3 Termodynaaminen tasapainotila	5
2.4 Tilamuuttujat	9
2.5 Tilanyhtälöt	9
2.6 Entropia	9
2.7 Ensimmäinen pääsääntö	10
2.8 Toinen pääsääntö	11
2.9 Kolmas pääsääntö	12
3 Oppikirjat fysiikan opetuksessa	13
3.1 Opetussuunnitelma	13
3.2 Oppikirja opetuksen apuvälineenä	14
4 Oppikirja-analyysi	16
4.1 Yleisilme	16
4.2 Sisältö	18
4.3 Energia ja työ	19
4.4 Systemi ja ympäristö	22
4.5 Tasapainotila	23
4.6 Lämpötila	24
4.7 Lämpö ja lämpöenergia	26
4.8 Ominaislämpökapasiteetti	28
4.9 1. pääsääntö	29
4.10 2. pääsääntö	32
4.11 Tehtävistä	34

5	Oppilaskyselyn teorian esittely	36
5.1	Tutkimusongelma	36
5.2	Rakenne	37
5.3	Tehtävä 1: Termospullo	38
5.4	Tehtävä 2: Vesilasi	41
5.5	Tehtävä 3: Energia	42
5.6	Tehtävä 4: Entropia	44
6	Tulokset	46
6.1	Toteuttaminen	46
6.2	t-testi	46
6.3	Konsentraatiotesti	47
6.4	Opiskelijoiden motivaatiosta	51
6.5	Yleiskatsaus	52
6.6	Tehtävä 1: Termospullo	53
6.7	Tehtävä 2: Vesilasi	55
6.8	Tehtävä 3: Energia	58
6.9	Tehtävä 4: Entropia, osa A	60
6.10	Tehtävä 4B: Entropia, osa B	60
7	Johtopäätökset	63
	Viitteet	65
	Liitteet	68
	Liite 1: Tehtäväanalyysi	68
	Liite 2: Kyselylomake	73

1 Johdanto

Mitä tapahtuu, kun kuuma metallikappale pudotetaan kylmään veteen? Kysymys saattaa kuulostaa yksinkertaiselta ja varsinkin fysiikkaa ymmärtävän henkilön näkökulmasta itsestään selvältä. Tutkimusten mukaan 13–16-vuotiaille ei ole selvää, että metallikappale ja vesi saavuttavat yhteisen loppulämpötilan ja osalla oppilaisista oli jopa käsitys, että systeemiin muodostuu itsestään lämpötilaero lämpötilojen tasoittumisen jälkeen. Kysymykseen liittyy siis paljon mielenkiintoista fysiikkaa, minkä vuoksi tämä kysymys herätti mielenkiintoni lämpöoppia ja sen opetuksen tutkimista kohtaan.

LuK-tutkielmassani perehdyin lämpöopin tietorakenteeseen ja oppilaiden virhekesityksiin. Etsiessäni tietoa oppilaiden käsityksistä LuK-tutkielmaani varten havaitsin, että tutkimustuloksia lämpöoppiin liittyen löytyy melko vähän verrattuna esimerkiksi mekaniikkaan ja sähköoppiin. Opetuksen kehittämisen kannalta huolestuttava asia on lisäksi se, että tutkimustulokset ovat vaikuttaneet vain vähän lämpöopin opetukseen toisin kuin esimerkiksi mekaniikassa.[1]

Opiskelijoilla on tutkimusten mukaan huomattavia vaikeuksia lämpöopin peruskäsitteiden kanssa, mikä tulee esille vieraassa ympäristössä tapahtuvassa ongelmanratkaisussa.[2] Opiskelijoiden ongelmanratkaisukyky rajoittuu pääosin kaavanmetsästykseen.[3] Käsitteiden puutteellisen ymmärtämisen lisäksi fysiikan oppimisen ongelmana ovat käsitteiden kytkeytymättömyys toisiinsa ja ulkoaoppiminen ilman syvällisen ymmärtämisen tavoittelua. Irralliset käsitteet tekevät kokonaiskuvasta epäselvän, mikä on oppimisen kannalta epäedullista, sillä oppiminen perustuu aivoissa tapahtuvaan verkkorakenteiden muodostumiseen.[4] Fysiikan hierarkkinen tietorakenne on oppimisen kannalta edullinen, mutta opetuksen osalta kysymys on siitä, miten tätä voimavaraa hyödynnetään eli esitetäänkö käsitteet sellaisessa järjestyksessä ja sellaisella tavalla, joka mahdollistaa fysikaalisen ajattelutavan mukaisen kokonaiskuvan muodostumisen.

Lämpöoppi on keskeisessä roolissa ilmiöitä selitettäessä, erilaisissa teollisissa soveluksissa ja pohdittaessa maailman energiatalouteen liittyviä ongelmia. Oppimisen kannalta lämpöoppi on mielenkiintoisessa asemassa, sillä siihen liittyy paljon arkipäiväisiä makromaailman ilmiöitä ja kokeellisuutta, mutta samalla sen syvällinen ymmärtäminen vaatii hyppäämistä mikrotasolle, uuteen ja tuntemattomaan maailmaan. Nämä seikat motivoivat lämpöopin opetuksen tutkimusta ja kehittämistä.

Oppikirja on edelleen merkittävä apuväline opetuksessa mitä erilaisimpien www-sivustojen ja muun materiaalin esiinmarssista huolimatta. Tämän vuoksi oppikirja vaikuttaa merkittävästi myös oppimiseen. Oppikirjat sisältävät asiallisen tiedon lisäksi valitettavasti myös virhekäsitysten muodostumiselle otollisen maaperän tarjoavia esityksiä. Kirjoissa käytettävä kieli ei usein tavoita lukijoita. Pyrkimykset abstraktin tiedon kansantajuistamiseen ovat johtaneet monessa tilanteessa uusien virhekäsitysten syntymiseen.

Eri-ikäisten käsityksiä lämpöopin käsitteistä ja ilmiöistä on tutkittu kansainvälisesti ja nämä tutkimustulokset ovat ohjanneet merkittävästi myös tämän tutkimuksen muodostumista. Suurin osa tehdystä tutkimuksesta perustuu eri-ikäisille kohderyhmille tehtyihin kyselyihin ja haastatteluihin, mutta mukaan mahtuu myös puhtaasti teoreettista tutkimusta. Tutkimusten tuloksena on löydetty runsaasti virhekäsityksiä, jotka perustuvat tavallisesti arkikokemukseen tai -kieleen. Energian säilyminen, entropia ja lämpöopin pääsäännöt ovat olleet useiden tutkimusten mukaan vaikeita käsitteitä. Erityisesti toinen pääsääntö vaikutti opetuksen kannalta varsin ongelmalliselta.[5] Tutkimuksissa on havaittu lisäksi, että käsitysten muuttaminen on haasteellista.[6] 15-vuotiaiden keskuudessa havaittuja virhekäsityksiä esiintyy vielä korkeakoulutasollakin, mikä kertoo omaa kieltään opetuksen kehittämisen tärkeydestä. Opetuksen kehittämisen keskeisin tavoite on, että se kasvattaa motivaatiota ja herättää aitoa mielenkiintoa luonnonilmiöitä kohtaan. Tällöin oppimista on mahdollista ohjata fysikaalisen ajattelutavan suuntaan.

Tämän tutkielman päätavoitteena oli selvittää lukiolaisten käsityksiä termodynaamisesta tasapainotilasta, sisäenergiasta ja entropiasta sekä lämpöopin ensimmäisestä ja toisesta pääsäännöstä. Tavoitteena oli selvittää lisäksi, onko oppikirjalla ollut vaikutusta näiden käsitteiden oppimiseen. Tutkimuksen aineisto kerättiin oppilaskyselyllä, joka suoritettiin viidessä lukiossa talvella 2009. Oppilaskysely koostui neljästä monivalintatehtävästä ja se toteutettiin fysiikan ensimmäisen syventävän kurssin lopussa. Kyselyn otos oli 144 opiskelijaa.

Tutkielman rakenteen muotoutumista ovat ohjanneet sen päätavoitteet ja tarkoituksenmukaisuus. Aluksi käsitellään lämpöopin teoriaa tutkimusongelmien taustalla olevan fysiikan osalta. Käsitteily tehdään osittain lukiokurssit ylittävällä tasolla, jotta käsitteet voidaan määritellä täsmällisesti virhekäsitysten välttämiseksi. Tämän jälkeen luvussa 3 tarkastellaan oppikirjaa oppimateriaalina ja luvussa 4 analysoidaan perusteellisesti kahta lukion oppikirjaa lämpöopin osalta. Viidennes-

sä luvussa perehdytään oppilaskyselyn teoriaan muissa tutkimuksissa havaittujen virhekäsitysten pohjalta. Kuudennessa luvussa esitellään oppilaskyselyn tulokset ja luvussa seitsemän esitetään tutkimuksen keskeiset johtopäätökset.

2 Teoreettinen tarkastelu

Aluksi selvitetään termodynamiikan keskeiset peruskäsitteet, joiden ymmärtäminen luo pohjan termodynamiikan ymmärtämiselle. Käsitteet määritellään mahdollisimman tarkasti mutta samalla tämän tutkielman viitekehykseen soveltuvalla tavalla. Käsitteiden määrittely tehdään syvällisemmin kuin lukion kurseilla, jotta käsitteiden taustalla oleva fysiikkaa voidaan ymmärtää ja mahdollisia virhekäsityksiä välttää. Opettajan tulee tuntea opetettavan asian tietorakenteet ja käsitteet opetuksen tavoitetasoa syvällisemmin, jotta hän kykenee ohjaamaan oppimista ja käsitteenmuodostusta.[4] Valitettavasti tilanne ei kaikkien opettajien kohdalla ole tällainen vaan osa opettajista myöntää, että termodynamiikka on heille kuin suljettu kirja, mikä vuorostaan edistää virhekäsitysten muodostumista.[7] Kun opettaja ei hallitse käsitteitä ja niiden välisiä yhteyksiä, hänen opetuksensa ei ohjaa oppilaita fysiikan ymmärtämiseen ja johdonmukaiseen tiedon jäsentämiseen vaan sirpaleisen tiedon muistamiseen, mikä on yleinen ongelma fysiikan opetuksessa.[3]

2.1 Lämpö, lämpöenergia ja lämpötila

Aineen rakenneosat ovat jatkuvassa lämpöliikkeessä, joka on satunnaista ja koostuu liikkeen erilaisista muodoista. Hiukkaset voivat edetä, värähdellä tasapainoasemansa ympärillä ja pyöriä. Energiaa on erilaisten liikemoodien vuoksi monessa muodossa. Värähtelevällä hiukkasella on sekä potentiaali- että liike-energiaa. Eri liikkeisiin liittyvä energia voi saada stationaarisessa eli ajasta riippumattomassa tilassa vain tiettyjä arvoja, joten energia on kvantittunut. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi värähtelyssä vain tietyt amplitudit ovat sallittuja.

Lämpöliikkeessä olevilla hiukkasilla on liike-energiaa. Lämpöenergia on aineen rakenneosasten liike-energiaa. Rakenneosasten törmäillessä toisiinsa energiaa siirtyy rakenneosaselta toiselle, jolloin lämpöliikkeeseen liittyvä energia siirtyy aineessa johtumalla. Rakenneosasten lämpöliikkeen vuoksi energiaa voi siirtyä kahden systeemin tai systeemin ja ympäristön välisen rajapinnan läpi. Lämpö on siis siirtyvää energiaa.[8]

Lämpötila on suure, joka on määritelty vain hyvin suurelle hiukkasmäärälle. Makrotasolla lämpötila kuvaa, kuinka kuuma jokin kappale on. Kappaleen lämpötilan mittaaminen perustuu siihen, että lämpömittari ja kappale asettuvat keskenään

termiseen tasapainoon. Koulukursseilla lämpötilaa käsitellään termodynaamisena muuttujana, joka kuvaa rakenneosasten keskimääräistä liike-energiaa. Lämpötila määritellään yleisemmin lähtien liikkeelle 1. pääsäännöstä osittaisderivaattaa käyttämällä.[9]

2.2 Systeemi ja ympäristö

Termodynamiikassa toisistaan erotettavia käsitteitä ovat *systeemi* ja *ympäristö*. *Systeemi* on tarkasteltava kokonaisuus. Systeemin ulkopuolelle jäävää maailmaa kutsutaan *ympäristöksi*. Systeemi voi olla eristetty, suljettu tai avoin, riippuen siitä, voiko systeemin ja ympäristön välillä tapahtua aineen ja energian vaihtoa. *Eristetty systeemi* ei vaihda ainetta eikä energiaa ympäristönsä kanssa. Tällaisen systeemin ja ympäristön välissä olevaa rajapintaa voidaan kutsua adiabaattiseksi seinäksi. Termospullo on hyvä esimerkki eristetystä systeemistä. Käytännössä systeemi ei ole koskaan täysin eristetty vaan energiaa siirtyy systeemin ja ympäristön välisen rajapinnan läpi. Tämän vuoksi hyvässäkin termospullossa oleva neste jäähtyy ajan kuluessa. Termospullon seinämä toimii *diatermisenä* seinänä, joka mahdollistaa energian siirtymisen seinän läpi. *Suljettu systeemi* voi vaihtaa energiaa mutta ei ainetta ympäristönsä kanssa. Tällöin ainemäärä systeemissä pysyy vakiona. Keskuslämmitysjärjestelmä on esimerkki suljetusta systeemistä. *Avoin systeemi* voi vaihtaa sekä ainetta että energiaa ympäristönsä kanssa. Systeemissä oleva ainemäärä voi muuttua rajapinnan läpi systeemin ja ympäristön välillä tapahtuvan aineen siirtymisen vuoksi.[8, 10, 11]

2.3 Termodynaaminen tasapainotila

Kun systeemin makroskooppiset eli havaittavissa olevat ominaisuudet eivät muutu ajan kuluessa, systeemi on termodynaamisessa tasapainotilassa. Ollessaan termodynaamisessa tasapainotilassa systeemi on *termisessä*, *mekaanisessa* ja *kemiallisessa tasapainossa*.

Terminen tasapaino tarkoittaa, että systeemissä ei tapahdu lämmön virtausta. Systeemissä on kaikkialla sama lämpötila. Tarkastellaan esimerkkinä kahta systeemiä A ja B, joilla kummallakin on eri lämpötila. Kun systeemit viedään termiseen kontaktiin toistensa kanssa, tapahtuu niiden välillä energian siirtoa, kunnes

kummallakin on sama lämpötila. Tällöin lämpövirta systeemien välillä loppuu ja ne ovat termisessä tasapainossa.

Mekaaninen tasapaino tarkoittaa, että systeemin tai sen osan ympäristöön kohdistamat voimat kumoavat systeemiin kohdistuvat ulkoiset voimat.[8] Systeemeissä vallitsee tällöin kaikkialla sama paine.

Kemiallisen tasapainon ymmärtämiseksi on selvitettävä hieman kemiallisen reaktion perusteita. Kemiallista reaktiota voidaan kuvata reaktioyhtälöllä



Kemialliseen reaktioon voi osallistua useita lähtöaineita, ja tuotteena voi syntyä useita eri yhdisteitä, mutta tässä yhteydessä tarkastellaan yksinkertaisuuden vuoksi yhtälön (1) mukaista reaktiota. Kemiallisessa reaktiossa lähtöaineet C ja D reagoivat keskenään ja muodostavat yhdisteen CD. Reaktio voi tapahtua kahteen suuntaan. Kun aineita C ja D on ylimäärin, reaktio etenee vasemmalta oikealle ja tuottaa lisää yhdistettä CD. Toisaalta, kun yhdistettä CD on ylimäärin, reaktio etenee oikealta vasemmalle ja tuottaa lisää lähtöaineita C ja D. Kemiallinen tasapainotila saavutetaan, kun molempien reaktioiden nopeudet ovat samat eli lähtöaineet muuttuvat tuotteiksi yhtä nopeasti kuin tuotteet lähtöaineiksi. Aineiden C, D ja CD hiukkasmäärät pysyvät tällöin vakiona. Tässä yhteydessä on huomattava, että kemiallinen tasapaino, kuten terminen ja mekaaninen tasapaino, on staattinen vain makrotasolla. Mikrotasolla kysymyksessä on dynaaminen tasapainotila, jossa tapahtuu jatkuvia hiukkasten välisiä reaktioita. Kemiallinen tasapaino liittyy yleisesti systeemeihin, joissa hiukkasmäärä voi muuttua. Kysymyksessä ei välttämättä ole kemiallinen reaktio vaan esimerkiksi faasimuutos.[10] Sama aine voi sisältää useita eri faaseja, jolloin hiukkasten määrä eri faaseissa voi vaihdella. Tasapainotilassa hiukkasten määrä jokaisessa faasissa pysyy vakiona.

Käsitellään esimerkkinä kemiallisen tasapainon saavuttamisesta systeemiä, joka koostuu jäätä ja sen kanssa termisessä tasapainossa olevasta nolla-asteisesta vedestä. Jään sulaessa molekyylien lukumäärä jäässä vähenee ja vesimolekyylien määrä vastaavasti kasvaa. Kun systeemi on saavuttanut kemiallisen tasapainotilan, hiukkasten lukumäärä molemmissa faaseissa pysyy vakiona.[10] Makrotasolla tämä tarkoittaa, että jäätä ei sulaa eikä vettä jäädy.

Termodynaamiset tasapainoehdot

Seuraavaksi tarkastellaan systeemin tasapainoehtoja lukiokurssit ylittävän teorian kautta. Tarkastelun avulla on tarkoitus syventää käsitystä termodynaamisesta tasapainotilasta ja tarjota paremmat mahdollisuudet termodynaamisen tasapainotilan opetuksen kehittämiseen kuin lukiokurssien sisältöjen avulla on mahdollista.

Tarkastellaan, millaisilla ehdoilla makroskooppinen systeemi on termodynaamisessa tasapainotilassa. Toisen pääsäännön mukaan systeemin entropialla on maksimiarvo tasapainotilassa ulkoisten reunaehtojen rajoissa. Tasapainotilassa entropian arvon tulee olla stationaarinen poikkeamien suhteen ja absoluuttinen maksimi.

Jaetaan systeemin sisältämä ainemäärä pieniin osa-alueisiin, joista kukin on sisäisesti homogeeninen ja lokaalisti tasapainossa. Lämpötila, paine ja kemiallinen potentiaali ovat tällöin yhtä suuria kaikkialla osa-alueessa. Kutsutaan näitä osa-alueita alkioiksi. Intensiiviset muuttujat, kuten lämpötila ja paine, voivat vaihdella vuorovaikutusten vuoksi eri alkioissa sekä ajallisesti saman alkion sisällä. Alkiot numeroidaan alaindekseillä α . Ekstensiivisille eli ainemäärään verrannollisille suureille pätee additiivisuus, jolloin tilavuuden V , sisäenergian U ja entropian S arvot koko systeemille saadaan summaamalla alkioiden yli:

$$V = \sum_{\alpha} V_{\alpha}, \quad U = \sum_{\alpha} U_{\alpha}, \quad S = \sum_{\alpha} S_{\alpha}.$$

Alkio voi sisältää useita erilaisia hiukkasia, joten merkitään hiukkaslajin j hiukkaslukua alkiossa α merkinnällä $N_{j\alpha}$. Tällöin hiukkaslajin j kokonaismäärä systeemissä voidaan laskea seuraavasti:

$$N_j = \sum_{\alpha} N_{j\alpha}. \quad (2)$$

Kukin alkio on sisäisesti tasapainossa, jolloin jokaisen alkion sisäenergia, tilavuus ja hiukkasluku ovat määriteltynä. Tällöin yhden alkion entropia voidaan kirjoittaa ekstensiivisten muuttujien funktiona

$$S_{\alpha} = S_{\alpha}(U_{\alpha}, V_{\alpha}, N_{j\alpha}). \quad (3)$$

Sisäenergian differentiaalin lausekkeesta $dU = TdS - pdV + \mu dN$ saadaan S_α :n pienelle muutokselle pisteen $(U_\alpha, V_\alpha, N_{j\alpha})$ ympäristössä

$$\Delta S_\alpha = \frac{1}{T_\alpha} \Delta U_\alpha + \frac{p_\alpha}{T_\alpha} \Delta V_\alpha - \sum_j \frac{\mu_{j\alpha}}{T_\alpha} \Delta N_{j\alpha}, \quad (4)$$

missä T_α , p_α ja $\mu_{j\alpha}$ oletetaan ainakin lokaalisti hyvin määritellyiksi.

Systeemi oletetaan eristetyksi, joten U , V ja N_j pysyvät vakioina. Yksinkertaisuuden vuoksi rajoitutaan tilanteeseen, jossa alkioita on kaksi eli $\alpha = A, B$. Säilymislaeista seuraa nyt ehdot

$$\Delta U_B = -\Delta U_A, \quad \Delta V_B = -\Delta V_A \quad \text{ja} \quad \Delta N_{jB} = -\Delta N_{jA}.$$

Kun nämä sijoitetaan yhtälöön (4), saadaan kokonaisentropian differentiaaliksi

$$\Delta S = \sum_\alpha \Delta S_\alpha = \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B} \right) \Delta U_A + \left(\frac{p_A}{T_A} - \frac{p_B}{T_B} \right) \Delta V_A - \sum_j \left(\frac{\mu_{jA}}{T_A} - \frac{\mu_{jB}}{T_B} \right) \Delta N_{jA} \quad (5)$$

Tasapainotilassa entropialla on maksimi, jolloin ensimmäisen kertaluvun variaation ΔS täytyy hävitä. Muutokset ΔU_A , ΔV_A ja ΔN_{jA} ovat mielivaltaisia, joten lauseke (5) on nolla, kun seuraavat tasapainoehdot ovat voimassa:

$$\begin{cases} T_A = T_B \\ p_A = p_B \\ \mu_{jA} = \mu_{jB}. \end{cases} \quad (6)$$

Tällä tavoin saatiin intensiivisille muuttujille tasapainoehdot, joiden mukaan termodynaamisessa tasapainotilassa systeemin kaikissa osissa vallitsee yhtä suuri lämpötila ja paine. Jokaisen hiukkaslajin kemiallinen potentiaali on myös vakio kaikkialla aineessa.[11]

2.4 Tilamuuttujat

Systeemin tila tarkoittaa termodynaamista tasapainotilaa. Makroskooppisen systeemin tila määritellään tilamuuttujien avulla. Tilamuuttujat ovat joko ekstensiivisiä tai intensiivisiä. Ekstensiiviset muuttujat, kuten tilavuus ja hiukkasluku, ovat verrannollisia ainemäärään. Intensiiviset muuttujat, kuten lämpötila ja paine, ovat ainemäärästä riippumattomia. Koko systeemiä kuvaavat tilamuuttujat voidaan määrittää vain systeemin ollessa termodynaamisessa tasapainotilassa. Kun suureen arvo riippuu ainoastaan systeemin termodynaamisesta tilasta, suure on tilafunktio. Tällöin tilamuuttujat ovat myös tilanfunktioita.[8]

2.5 Tilanyhtälöt

Tilanyhtälö ilmaisee systeemin tilamuuttujien välisen riippuvuuden, kun systeemi on tasapainossa. Tavallisesti tilanyhtälö esitetään mitattavissa olevien muuttujien, kuten lämpötilan ja tilavuuden, avulla.[11] Yksi esimerkki tilanyhtälöstä on ideaalikaasun tilanyhtälö:

$$pV = nRT. \quad (7)$$

2.6 Entropia

Epäjärjestyttä kuvaa suure entropia S , joka makrotasolla määritellään

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T}, \text{ jossa} \quad (8)$$

dQ_{rev} = reversiibelissä prosessissa siirtyvä lämpömäärä

T = lämpötila, jossa lämpömäärä siirtyy.

Entropia on tilanfunktio eli sen muutos tasapainotilojen välisessä prosessissa riippuu ainoastaan alku- ja lopputilasta. Reversiibeliin prosessiin liittyvä entropian muutos voidaan laskea yhtälön (8) avulla:

$$\Delta S = \int_A^B \frac{dQ}{T}. \quad (9)$$

Kun reversiibeli prosessi tapahtuu vakio­lämpötilassa eli kyseessä on esimerkiksi olomuodonmuutos, entropian muutokselle pätee

$$\Delta S = \frac{Q}{T}. \quad (10)$$

2.7 Ensimmäinen pääsääntö

Systeemin kokonaisenergia koostuu mekaanisesta energiasta ja sisäenergiasta. Mekaaninen energia on systeemin liike- ja potentiaalienergiaa. Sisäenergia U on tilamuuttuja, joka kuvaa aineen rakenneosien energiaa. Sisäenergia koostuu kemiallisesta energiasta, ydinenergiasta sekä aineen rakenneosasten liike- ja potentiaalienergioista. Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö on energian säilymislaki. Sen mukaan eristetyn systeemin sisäenergia ei muutu. Ensimmäinen pääsääntö voidaan esittää differentiaalien avulla seuraavasti:

$$dU = dQ + dW, \text{ jossa} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} dQ &= \text{systeemiin tuotu lämpömäärä} \\ dW &= \text{systeemiin tehty työ.} \end{aligned}$$

Systeemiin sisäenergia muuttuu yhtä paljon kuin systeemiin tulee tai sieltä poistuu energiaa lämpönä tai työnä. Mikrotasolla tämä tarkoittaa, että kappaletta lämmitettäessä rakenneosasten keskimääräinen nopeus kasvaa, jolloin rakenneosasten liike-energia kasvaa. Liike-energian kasvamisen myötä myös kappaleen sisäenergia kasvaa. Kappaleen jäähtyessä tilanne on päinvastainen lämmitykseen verrattuna, ja sisäenergia puolestaan pienenee.

Ensimmäinen pääsääntö saadaan laajenuksena energian säilymislaista [12]

$$\Delta E_{mek} + \Delta E_t = W_{ext}, \text{ jossa} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta E_t &= \text{lämpöenergian muutos} \\ W_{ext} &= \text{ulkoisten voimien esim. kitka tekemä työ.} \end{aligned}$$

Systeemin makroskooppisiin vapausasteisiin liittyvä mekaaninen energia on kineettisen energian ja potentiaalienergian summa eli $E_{mek} = E_k + E_p$. Mekaanisen energian lisäksi systeemillä on siis atomien ja molekyylien liikkeeseen liittyvää lämpöenergiaa. Systeemillä on lämpöenergian lisäksi muita energiamuotoja, jotka sisältävät mikroskooppisiin vapausasteisiin liittyvää energiaa. Tällöin lämpöenergian tilalla tulisi käyttää systeemin sisäenergiaa U , joka sisältää lämpöenergian lisäksi esimerkiksi sidosten kemiallisen energian sekä ydinenergian. Lukiossa termodynaamisten prosessien tarkastelu rajoittuu tavallisesti tilanteisiin, joissa ainoa tutkittava sisäenergian muoto on lämpöenergia, jolloin $\Delta E_t = \Delta U$. Systeemin kokonaisenergian muutos on:

$$\Delta E_{sys} = \Delta E_{mek} + \Delta E_t = W_{ext}. \quad (13)$$

Termodynamiikassa systeemi voi vastaanottaa tai luovuttaa energiaa joko työnä tai lämpönä. Tämä on huomioitava yhtälössä (13) lisäämällä oikealle puolelle systeemin luovuttama tai vastaanottama lämpömäärä Q . Ympäristön systeemiin tekemää työtä ei eroteta konservatiivisten ja dissipatiivisten voimien tekemästä työstä. Tämän vuoksi laajennamme työn käsitteen poistamalla alaindeksin ext , jolloin

$$\Delta E_{sys} = \Delta E_{mek} + \Delta E_t = W + Q. \quad (14)$$

Tarkasteltavat termodynaamiset systeemit ovat tavallisesti sellaisia, kuten vesiaastia tai kaasusäiliö, joiden mekaaninen energia ei oleellisesti muutu termodynaamisen prosessin aikana eli $\Delta E_{mek} = 0$, jolloin ensimmäinen pääsääntö saa muodon

$$\Delta E_t = W + Q. \quad (15)$$

2.8 Toinen pääsääntö

Toinen pääsääntö on luonnonlaki, joka liittyy prosessien suuntaan. Toisen pääsäännön mukaan eristetyn systeemin entropia kasvaa spontaaneissa prosesseissa. Spontaani prosessien suunta on kohti suurempaa epäjärjestyä. Seuraavaksi esitellään muutama vaihtoehtoinen mutta ekvivalentti muotoilu toiselle pääsäännölle:

- Tapahtumien spontaani suunta on kohti suurempaa epäjärjestystä.
- Lämpöä on mahdotonta muuttaa kokonaan työksi.
- Systeemin spontaania suuntaa kohti termodynaamista tasapainotilaa ei voi kääntää päinvastaiseksi ellei samalla muuteta työtä lämmöksi.
- Lämpötilojen T_1 ja T_2 välillä työskentelevistä lämpövoimakoneista Carnot'n koneella on paras mahdollinen hyötysuhde.

Lämpöopin toisen pääsäännön yleisin muotoilu on systeemin ja ympäristön kokonaisentropian avulla ilmaistu

$$\Delta S_{tot} \geq 0, \quad (16)$$

missä ΔS_{tot} kuvaa systeemin ja ympäristön kokonaisentropian muutosta. Systeemin ja ympäristön kokonaisentropia ei siis voi pienentyä ja se voi olla nolla ainoastaan reversiibelissä prosessissa.[11]

Toinen pääsääntö ei kiellä systeemin entropian pientymistä. Jos systeemin entropia pienenee, ympäristön entropia kasvaa enemmän kuin systeemin entropia pienenee, jolloin kokonaisentropia kasvaa.[11] Tällainen tilanne tapahtuu esimerkiksi veden jäätyessä. Vedelle muodostuu sen jäätyessä säännöllinen kiderakenne eli veden epäjärjestys pienenee, jolloin myös veden entropia pienenee. Vesi luovuttaa jäätyessään lämpöä ympäristölle, jolloin ympäristön entropia kasvaa siten, että yhtälö (16) toteutuu.

2.9 Kolmas pääsääntö

Kolmannen pääsäännön, joka tunnetaan myös Nernstin lakina, mukaan absoluuttisessa nollapisteessä ($T = 0$ K) entropia on nolla.[11] Kolmannen pääsäännön ymmärtäminen edellyttää mikrotason näkökulmaa. Lämpötilan laskiessa hiukkasten lämpöliike pienenee ja järjestys lisääntyy, mikä tarkoittaa entropian pienenemistä. Entropia on epäjärjestyksen mitta, joten sen ollessa nolla, aine on täysin järjestäytyntä. Täydellisesti järjestäytyneen kiteen entropia on nolla. Absoluuttinen nollapiste on mahdoton saavuttaa, joten entropia ei ole koskaan nolla.

3 Oppikirjat fysiikan opetuksessa

3.1 Opetussuunnitelma

Opetushallitus laatii valtakunnallisen opetussuunnitelman (OPS), jonka pohjalta kunta laatii kunnallisen opetussuunnitelman. Kukin koulu laatii oman opetussuunnitelmansa kunnallisen opetussuunnitelman pohjalta.[13] Opetussuunnitelman käsitettä voidaan jäsentää kirjoitetun, toimeenpannun ja koetun opetussuunnitelman avulla. Kirjoitettuja ovat valtakunnalliset ja tavallisesti myös kunnalliset ja koulukohtaiset opetussuunnitelmat, joita opettaja pyrkii toimeenpanemaan omassa opetuksessaan. Opettaja tekee oman tulkintansa kirjoitetusta opetussuunnitelmasta ja tällöin puhutaan toimeenpannusta opetussuunnitelmasta. Oppilaiden tasolla voidaan tutkia, mitä oppilaat ovat oppineet eli kuinka opetussuunnitelma on toteutunut.

Opetussuunnitelma on tärkeä ohjekirja opetuksen suunnittelussa, toteutuksessa ja arvioinnissa. Sen sisällöt ja tavoitepohdinnat ovat ohjeita opettajalle, mutta samalla on syytä muistaa, että opettajalla on menetelmien vapaus opetussuunnitelman puitteissa.[13] Opetussuunnitelma on kehys, joka jättää vapauksia yksilölliselle opettamiselle ja oppimiselle.[14] Opettajan on tunnettava opetussuunnitelman määrittelemät opetuksen suuntaviivat, koska muutoin hän on valtavan oppimateriaalimäärän ja tietoverkkojen riepoteltavana. Samalla OPS auttaa opettajaa pohtimaan, mikä asia opetuksessa on tärkeää ja miksi.[14]

Lukion opetussuunnitelman perusteet on laadittu vuonna 2003. Fysiikka 2 -kursille on asetettu seuraavat tavoitteet [15]:

- tuntee lämpöön liittyvät ilmiöt
- tutkii aineen termodynaamiseen tilaan tai lämpöopin pääsääntöihin liittyviä ilmiöitä
- saa valmiuksia osallistua ympäristöä ja teknologiaa koskevaan kriittiseen keskusteluun ja päätöksentekoon.

Annetut tavoitteet ovat melko laaja-alaisia ja haasteellisia. Samalla voidaan havaita, että ne antavat opetuksen toteuttamiseen paljon liikkumatilaa ja korostavat ilmiöiden tutkimista ja kvalitatiivista tarkastelua. Opetussuunnitelma auttaa

opettajaa kurssien suunnittelussa antamalla kursseille keskeiset sisällöt. Lämpöopin kurssin keskeisiä sisältöjä opetussuunnitelman perusteiden mukaan ovat muun muassa [15]:

- kappaleiden lämpeneminen, jäähtyminen, olomuodonmuutokset ja lämpöenergia
- mekaaninen energia, työ, teho ja hyötysuhde
- lämpöopin pääsäännöt, sisäenergia.

Kurssille asetetut sisällöt ovat käsitteellisesti vaikeita mutta mahdollistavat erilaisten lähestymis- ja työskentelytapojen käytön. Opetushallituksen antamien sisältöjen ymmärtäminen vaatii sekä opettajalta että oppilaalta paljon, minkä vuoksi niiden opetuksen tutkiminen ja kehittäminen ovat tärkeitä aiheita.

3.2 Oppikirja opetuksen apuvälineenä

Opetuksen tueksi on tarjolla runsaasti erilaista opetusmateriaalia, jonka määrä kasvaa jatkuvasti internetin myötä. Oppimateriaali on keskeinen opetussuunnitelman toteutumista palveleva tekijä opetuksessa ja ohjaa voimakkaasti opetustahtumaa. Kirjallinen opetussuunnitelma toteutuu opetuksessa merkittävältä osin juuri oppimateriaalin avulla.[16] Tämän vuoksi oppimisen tavoitteet ovat merkittävässä asemassa oppimateriaalia valittaessa.[14] Oppikirja on säilyttänyt merkittävän asemansa opetuksen apuvälineenä huolimatta oppimateriaalin valtavasta tulvasta, minkä vuoksi tässä tutkielmassa perehdytään oppimateriaaleista ainoastaan oppikirjoihin.[13] Aluksi tutkitaan oppikirjan roolia opetuksessa ja tämän jälkeen perehdytään kahteen lukion kursseilla käytettävään oppikirjaan fysiikan opetuksen näkökulmasta.

Tutkimusten mukaan opetus rakentuu pääosin oppikirjojen tai muun kirjallisen materiaalin varaan eli opettajat ovat varsin oppimateriaalisidonnaisia.[17] Kurssia suunniteltaessa on tyypillistä, että noudatetaan täsmälleen oppikirjan mukaista järjestystä. Oppikirja ei voi kuitenkaan olla opettajan opetussuunnitelma, vaikka oppikirjan tekijöiden työtä ohjaa valtakunnallinen opetussuunnitelma.[14] Kirjan tekijöillä on oma kokemukseen perustuva näkemyksensä siitä, miten tietty

aihe tulisi käsitellä, minkä tiedostaminen on opettajalle tärkeää, jotta hän kykenee hyödyntämään kirjan tarjoamat mahdollisuudet ja painottamaan opetusta oikein.[4, 14] Oppikirjan tekijän näkemys ei välttämättä sovellu kaikille opettajille oppilasryhmien erilaisten tarpeiden ja valmiuksien vuoksi. Valitessaan sopivaa oppikirjaa opettaja on siis melkoisen haasteen edessä. Oppikirjaa käyttäessään opettaja lisäksi päättää, millaisen roolin hän sille antaa opetuksessa. Liiallinen turvautuminen oppikirjaan tekee opetuksesta kaavamaisista ja kahlitsee opettajan omaa pedagogista ajattelua.[14] Tällöin opetuksen luovuus ja monimuotoisuus kärsivät. Oppikirjan keskeisiä tehtäviä ovat oppimisen tukeminen, motivointi, kysymysten asettaminen ja vastausten etsimiseen houkuttelevuus. Motivointi on erittäin keskeistä, koska vain kiinnostus oppimiseen tekee oppimisen mahdolliseksi. Samalla oppikirjan tulee ottaa huomioon eritasoiset oppilaat ja tarjota lisämateriaalia.[14] Hyvän oppikirjan asiasisällön tulee edetä loogisesti ja järkevästi, mikä on erityisen tärkeää juuri fysiikan oppikirjojen kohdalla fysiikan tietorakenteen vuoksi. Fysiikan tietojärjestelmällä on tietty kvantitatiivinen rakenne, jossa suureilla on kova hierarkia, jonka määräävät suureiden väliset kvantitatiiviset relaatiot. Hierarkiaongelma kohdataan juuri oppikirjoja laadittaessa ja kursseja suunniteltaessa, sillä hierarkian vuoksi suureiden opetusjärjestyksessä ei sallita useita eri vaihtoehtoja. Ilmiöiden havainnointi eli kvalitatiivisen tason opetus on tässä mielessä vapaampaa, mutta tällöinkin on ennakoitava kvantitatiivista rakennetta. Kvalitatiivisen tason opetuksessa tulee kiinnittää huomiota ilmiömaailmaan siten, että se vastaa fysiikan kvantitatiivisia käsitteitä ja lakeja. Fysiikan käsitteiden välisille yhteyksille luodaan pohja jo kvalitatiivisen opetuksen aikana.[4] Tämä pohjan luominen on aloitettu perusopetuksessa ja sitä jatketaan lukiossa, missä siirrytään kohti kvantitatiivista tasoa eli käsitteiden välisten yhteyksien tarkastelua.

4 Oppikirja-analyysi

Tässä tutkielmassa perehdytään kahteen lukion Fysiikka 2 -kursilla käytettävään oppikirjaan. Tutkimuksen kohteena ovat seuraavat kirjat [18, 19]:

- Fysiikka 2 Lämpö, Aallot, Tammi, 2005
- Physica 2 Lämpö, WSOY, 2005.

Lukioissa on käytössä myös Otavan kustantamaa Fotoni-kirjasarjaa, mutta se jätetään tämän tutkimuksen ulkopuolelle, koska yksikään oppilaskyselyyn osallistunut ryhmä ei käyttänyt Fotoni-kirjasarjaa ja oppikirja-analyysin tuloksia hyödynnetään oppilaskyselyn yhteydessä. Suoritettava oppikirja-analyysi keskittyy pedagogiseen ja asiasisällön tutkimukseen. Tavoitteena on selvittää, miten ja missä järjestyksessä lämpöopin keskeiset käsitteet esitetään lukion oppikirjoissa. Erityisen tarkastelun kohteena ovat termodynamiikan pääsäännöt sekä termodynaaminen tasapainotila. Oppikirja-analyysi ja oppilaskysely liittyvät toisiinsa, sillä oppilaskyselyn avulla tutkitaan, miten kurssilla käytetty oppikirja on vaikuttanut oppimiseen.

Analyysin rakenne on sellainen, että ensin luodaan lyhyt katsaus oppikirjojen yleisilmeeseen eli tutkitaan esimerkiksi miten kappaleet on muotoiltu ja miten kuvia on käytetty. Seuraavaksi käydään läpi oppikirjojen sisällöt eli mitä asioita kirjoissa käsitellään. Tämän jälkeen kumpikin kirja käsitellään rinnakkain aihekohtaisesti. Tiettyyn aihepiiriin liittyvät tehtävät analysoidaan Kurki-Suonion luokitteluperusteiden pohjalta tätä tarkoitusta varten laaditulla arviointimenetelmällä, joka arvioi tehtäviä fysikaalisuuden ja muotoilun näkökulmasta.[4] Tehtävän fysikaalisuutta arvioidaan tyyppin, tilanteen ja sen kuvauksen mukaan ja muotoilua rajauksen, määrittelyn ja kytkennän mukaan. Arviointi tehdään välille 0–1 sijoittuvalla asteikolla. Tehtäväanalyysin arviointiperusteet ja tulokset on koottu liitteessä oleviin taulukoihin (Liite 1).

4.1 Yleisilme

Fysiikka-kirja on ulkoiselta ilmeeltään hyvin selkeä ja helppolukuinen. Jokaisen luvun alussa esitellään luvun pääkohdat ja mainitaan keskeiset käsitteet, mikä auttaa muodostamaan kokonaiskuvaa opittavasta aiheesta. Kappaleen alussa on

tavallisesti oppilastyö, joten lähestymistapa uuteen aiheeseen on oikeaoppisesti kokeellinen.[4] Työohjeen vieressä on usein havainnollistava kuva. Kuvien käyttö Fysiikka-kirjassa on tarkoituksenmukaista, sillä kuvat liittyvät tekstissä käsiteltävään asiaan ja useimpiin niistä liittyy kuvateksti. Kirjassa on leveät marginaalit, jotka sisältävät kuvia ja huomautuksia, mutta oppilaat voivat käyttää marginaaleja myös omien tai opettajan tekemien huomautusten ja tarkennusten kirjoittamiseen. Tärkeät käsitteet on lihavoitu ja keskeiset asiat on kirjoitettu tekstin sekaan kelta-pohjaisiin laatikoihin. Muutaman kappaleen jälkeen on erivärisillä sivuilla teknisiä sovelluksia ja historiaa käsittelevää lisämateriaalia. Jokaisen kappaleen jälkeen on *Pohdi ja etsi* -osio, jossa käsiteltyjä asioita kytketään arkipäivään. Tämän jälkeen on kappaleeseen liittyviä tehtäviä. Oppilas voi testata osaamistaan luvun lopussa *Testaa, osaatko* -osion avulla, missä kysytään luvussa käsiteltyjä perusasioita. Jokaisen luvun lopussa on vielä erikseen keskeiset käsitteet, kaavat ja lait kokoa-va tiivistelmä, joka on oppikirjassa hyvin keskeisessä roolissa. Oppilaat lukevat usein kirjasta pelkät tiivistelmät, koska he ovat havainneet, että niiden avulla pääsee kokeen läpi.[3] Tekstistä muistetaan hyvin kohdat, jotka ovat korkealla tekstin informaatorakenteessa, kuten tiivistelmät.[16]

Physica-kirja on värikäs ja houkuttelee lukijaa visuaalisen näyttävyytensä turvin. Kirja on kuitenkin sekava ja työläs lukea tekstin ladonnan ja kuvien käytön vuoksi. Teksti on jaettu kahteen palstaan ja kuvat ovat tekstin seassa, minkä vuoksi lukijan on vaikea hahmottaa tekstin etenemistä. Osa kuvista on huomattavan suurikokoisia, mikä kiinnittää lukijan huomion ja tekee samalla varsinaisesta tekstistä pirstaleista. Uuden luvun alussa on lyhyt palsta, jossa fysiikan ilmiöitä kytketään arkipäivään ja mainitaan luvussa käsiteltävät keskeiset asiat. Keskeiset käsitteet, lait ja kaavat on koottu tekstin sekaan selvästi erottuviin ruskeapohjaisiin laatikoihin. Tekstin seassa on sinipohjaisia *Tutki & kokeile* -laatikoita, jotka käsittelevät kokeellisia töitä selkeiden kuvien avulla. Kirjassa on muutaman luvun lopussa erillinen *Extra*-osio, joissa käsitellään arkipäivän ilmiöitä ja mikrotason malleja. Luvun lopussa on yhteenvetona toimiva käsitekartta, johon on koottuna keskeiset käsitteet ja niiden väliset yhteydet. Tämän avulla pyritään välttämään tilanne, jossa käsitteet jäävät toisistaan irrallisiksi.[14] Keskeiset käsitteet on koottu jokaisen luvun loppuun vielä erilliseksi listaksi käsitekartan lisäksi. Tehtävät ovat kunkin luvun lopussa kappalenumeroinnin mukaisessa järjestyksessä.

4.2 Sisältö

Lämpöopin kokonaisuus on Fysiikka 2 -kirjassa jaettu kuuteen lukuun, joiden aiheet käydään seuraavaksi lyhyesti läpi. Lämpöopin kurssi aloitetaan energiaa käsittelevällä luvulla, jossa tarkastellaan lämpöopin historiaa, energian säilymistä, mekaanista energiaa, työtä ja tehoa sekä hyötysuhdetta. Seuraava luku on nimeltään *Lämpötila ja paine*. Tässä luvussa käsitellään termodynaamista systeemiä, lämpötilaa ja painetta, joista tässä analyysissä keskitytään kahteen ensimmäiseen. Kolmas luku käsittelee lämpölaajenemista, kineettistä kaasuteoriaa, lämpötilaa ja painetta mikrotasolla sekä tilanyhtälöitä. Neljännen luvun aiheena ovat aineen olomuodot ja olomuodonmuutokset. Analyysissä luvut 3 ja 4 jätetään käsittelemättä lukuunottamatta luvun 4 kemiallista tasapainoa ja haihtumista käsitteleviä kappaleita. Oppikirja-analyysin kannalta kirjan viides luku on keskeisin, koska se käsittelee lämpöä, lämmönsiirtymistä, lämpöopin pääsääntöjä ja lämpövoimakonetta. Lämmön siirtymistavat jätetään oppikirja-analyysissä käsittelemättä. Viimeisessä luvussa käsitellään energiavaroja, joita ei tutkita tässä analyysissä.

Physica-kirjassa lämpöoppi on jaettu kahdeksaan lukuun. Physican tarjoama lähestymistapa lämpöoppiin on hyvin samankaltainen kuin Fysiikka-kirjan eli ensimmäinen luku käsittelee energiaa. Toinen luku keskittyy työhön, mekaniikan energiaperiaatteeseen ja tehoon. Mekaanista energiaa ja työtä käsitellään Physica-kirjassa kuitenkin selvästi Fysiikka-kirjaa enemmän. Kolmas luku on oppikirja-analyysin kannalta keskeinen, sillä se käsittelee lämpöopin käsitteitä ja malleja sekä mikroettä makrotasolla. Tässä luvussa käsitellään myös lämmön siirtymistä ja lämpölaajenemista, jotka jätetään oppikirja-analyysissä huomiotta. Neljännessä luvussa tarkastellaan painetta ja viidennessä luvussa puolestaan kaasujen tilanyhtälöä sekä ideaalikaasua. Molemmat luvut jätetään oppikirja-analyysissä käsittelemättä, sillä niiden aiheet eivät ole keskeisiä tämän tutkimuksen kannalta. Kuudes luku keskittyy lämpöön, olomuotoihin ja faasikaavioihin, joista tässä analyysissä tarkastellaan lämpöä ja kemiallisen tasapainon osalta myös olomuotoja. Lämmön käsitteen kohdalla on merkittävin ero kahden tutkittavan oppikirjan välillä. Physica-kirjassa lämpö käsitellään ennen olomuotoja mutta Fysiikka kirjassa vasta olomuotojen jälkeen. Lämpöopin pääsääntöihin perehdytään luvussa seitsemän, mikä on tämän vuoksi oppikirja-analyysin kannalta erittäin keskeinen luku. Viimeinen luku käsittelee Fysiikka 2 -kirjan tapaan energiavaroja ja se kuuluu oppikirja-analyysin piiriin lämpöpumpun osalta.

Oppikirjat noudattavat pääpiirteissään samanlaista etenemisjärjestystä. Kirjojen sisällysluetteloista havaitsee opetussuunnitelman läsnäolon oppikirjoja kirjoitettaessa. Molempien kirjojen kappaleiden otsikot ovat kuin yksi yhteen opetussuunnitelman perusteissa Fysiikka 2 -kurssille asetettujen keskeisten sisältöjen kanssa. Pelkkä kirjan sisältö ei kuitenkaan vielä takaa sitä, että toteutunut opetussuunnitelma on tavoitteiden mukainen. Tämän tutkiminen vaatii oppimisen mittaamista, mihin perehdytään tarkemmin oppilaskyselyn yhteydessä.

4.3 Energia ja työ

Työn käsitteen ymmärtäminen mekaniikassa on keskeistä myös lämpöopin kannalta. Tutkimusten mukaan monet opiskelijat ymmärtävät työn käsitteen heikosti vielä yliopistotasollakin, ja työn käsitteen siirtäminen mekaniikasta lämpöopin yhteyteen on vaikeaa.[2, 20] Näiden syiden vuoksi työn käsite on syytä käydä läpi huolellisesti ennen lämpöopin opiskelun aloittamista ja se on tarkastelun kohteena oppikirja-analyysissä.

Fysiikka

Lämpöopin käsittely aloitetaan aukeaman käsittävällä katsauksella lämpöopin historiaan. Käsitteiden ja lakien syntyhistoriaa korostavaa lähestymistapaa kutsutaan geneettiseksi lähestymistavaksi. Fysiikan historian avulla on tarkoitus tuoda esille ajatuskulut ja mallit, jotka ovat ohjanneet fysiikan kehitystä ja luoda mahdollisimman totuudenmukainen kuva käsitteenmuodostuksen empiirisestä perustasta.[4] Tutustuminen luonnontieteilijöiden tekemiin havaintoihin, tulkintoihin ja virheisiin saattaa auttaa oppilasta käsitteenmuodostuksessa. Kirjan teksti kuvaa kohtuullisen hyvin lämpöopin kehitystä ja ennen kaikkea ehkäisee virhekäsitysten muodostumista käsittelemällä esimerkiksi kalorikkiteoriaa eli lämmön käsittämistä aineeksi. Katsauksessa kokonaisuus on rajattu onnistuneesti keskeisiin käsitteisiin: energiaan ja sen säilymiseen. Teksti on painettu lisämateriaalia kuvaavalle siniselle pohjalle, mikä on harmillista, koska tällöin se jää usein lukematta.

Ensimmäinen kappale käsittelee energian säilymlakia, jota lähestytään energialajien avulla. Muutama eri energialaji, kuten liike-energia ja lämpöenergia sekä niiden muuntuminen toisikseen mainitaan esimerkkien kanssa. Energian käsitettä

pyritään selittämään mainitsemalla, että systeemillä on kyky tehdä työtä, jos sillä on mekaanista energiaa. Vastaavasti kerrotaan, että mikäli systeemissä vallitsee lämpötilaero, myös lämpöenergia voi tehdä työtä. Energian kerrotaan muuttuvan lämmöksi kitkan ja väliaineen vastuksen vuoksi, mikä on harhaanjohtava maininta. Tämän selityksen perusteella lukijalle muodostuu helposti kuva, että lämpö ei ole energiaa. Energian säilymlaki on kirjoitettu keltapohjaiseen laatikkoon seuraavasti: Energia voi luonnonilmiöissä siirtyä tai muuntua muodosta toiseen. Energian kokonaismäärä kuitenkin säilyy.

Työ ja teho -kappale alkaa oppilastyöllä, jossa tuolilla istuvaa oppilasta työnnettään eteenpäin ja määritetään tehdyn työn suuruus. Tehdyn työn laskemiseksi annetaan kaava, joka pätee siinä tapauksessa, että vaikuttava voima ja siirtymä ovat samansuuntaiset. Oppilastyöhön palataan uudestaan teorian käsittelyn jälkeen, jolloin siihen esitetään malliratkaisu. Kappaleen loppuosa käsittelee tehoa, joka ei ole tarkastelun kohteena tässä analyysissä.

Kolmannen kappaleen nimi on *Hyötysuhde*. Aiheeseen liittyen marginaalissa on kaaviokuva koneesta ja sen energiataloudesta. Kuvaan on merkitty nuolilla ja symboleilla, että kaikkea koneen ottamaa energiaa ei voida muuttaa työksi vaan osa menee hukkaan. Kaavio toimii pohjustuksena toiselle pääsäännölle ja sen yhteydessä tarkasteltavalle Carnot-koneelle. Hyötysuhteen laskemiseksi annetaan kaava sekä tekstimuodossa että symboleilla kirjoitettuna.

Neljäs kappale käsittelee mekaanista energiaa. Kappaleen alussa todetaan, että linnun lentäessä sillä on sekä potentiaali- että liike-energiaa, joiden summaa kutsutaan mekaaniseksi energiaksi. Sekä potentiaali- että liike-energian tutkiminen aloitetaan oppilastyöllä ja molempien laskemiseksi annetaan yhtälöt keltapohjaisissa laatikoissa. Kappaleen pudotessa sen potentiaalienergian mainitaan muuttuvan liike-energiaksi, jonka kerrotaan olevan yhtä suuri kuin painovoiman kappaleeseen tekemä työ mikäli ilmanvastus jätetään huomiotta. *Testaa osaatko* -osion sisältämät kysymykset ovat pääosin kvantitatiivisia ja painottavat laskukaavoja.

Physica

Physica-kirjan alussa on ennen ensimmäistä kappaletta osio, jonka otsikkona on *Energiaa on kaikkialla*. Tässä osiossa käsitellään energialajeja sekä niiden luokitte-
telua vapaisiin ja sidottuihin. Lämpöenergian todetaan olevan vapaata energiaa,

koska se on aineen rakenneosien liikettä. Energian kerrotaan muuttuvan muodosta toiseen mutta sen säilymisestä ei puhuta tässä yhteydessä mitään. Ensimmäisen luvun alussa on lyhyt palsta, jossa tarkastellaan keinujan liikettä ja todetaan keinujan energian muuttuvan muodosta toiseen.

Ensimmäisen kappaleen aiheena on mekaaninen energia, jonka todetaan olevan kappaleen liikkeestä ja asemasta aiheutuvien energioiden summa. Potentiaali- ja liike-energian laskemiseksi annetaan yhtälöt ja tehdään selkeät esimerkkilaskut. Fysiikka-kirjasta poiketen Physicassa ei ole mekaanisen energian yhteydessä kokeellisia töitä, mikä on harmillista, sillä fysikaalisen aiheen tarkastelu muodostaa ymmärrettävän kokonaisuuden vain, jos siitä ilmenevät sekä aiheen kokeelliset ja teoreettiset perusteet että niiden liittyminen toisiinsa.[4]

Toinen kappale käsittelee mekaanisen energian säilymistä. Tarkastelu aloitetaan Fysiikka-kirjan tapaan tutkimalla uimahyppääjän energian muuttumista muodosta toiseen. Tilannetta havainnollistetaan selkeällä kuvalla, johon on merkitty uimahyppääjän potentiaali- ja liike-energiat alussa ja lopussa. Kuvan alapuolella on ruskeapohjainen laatikko, jossa määritellään mekaaninen energia. Mekaanisen energian todetaan säilyvän vain, jos kappaleeseen vaikuttaa ainoastaan painovoima. Kirjassa on mekaanisen energian säilymiseen liittyvä kokeellinen työ, jossa massaltaan erilaisia kappaleita pudotetaan samalta korkeudelta ja mitataan niiden loppunopeudet. Tällä tavoin saatuja tuloksia verrataan mekaanisen energian säilymislain antamiin tuloksiin ja pohditaan, mistä erot johtuvat.

Kolmannessa kappaleessa keskitytään työn käsitteeseen, jota lähestytään tarkastelemalla potkukelkkailijan liike-energiaa. Tilanteesta päätellään, että mekaanisen energian muuttumiseen tarvitaan työn käsitettä. Työn laskemiseksi annetaan yhtälö, jonka kerrotaan pätevän, kun voima ja siirtymä ovat yhdensuuntaisia ja vaikuttava voima on vakio. Lämpöoppia ja erityisesti ensimmäistä pääsääntöä ajatellen on hyvä, että tässä yhteydessä käsitellään työhön liittyvät merkkisäännöt. Aiheeseen liittyen käsitellään kaksi kuvilla varustettua esimerkkilaskua.

Physicassa mekaniikan energiaperiaate käsitellään kirjan toisessa luvussa yhdessä tehon ja koneiden kanssa. Oppikirja-analyysin laajuuden puitteissa näistä käsitteistä keskitytään vain mekaniikan energiaperiaatteen tarkasteluun. Aihetta lähestytään toteamalla ikiliikkuja mahdolltomaksi. Tämän jälkeen pohditaan yleisellä tasolla kappaleeseen vaikuttavia voimia sekä esitetään mekaniikan energiaperiaate ruskeapohjaisessa laatikossa. Mekaniikan energiaperiaatteeseen liittyen esitetään

neljä esimerkkilaskua, jotka käsittelevät muun muassa liukuvaa kirjaa, auton jarrutusta ja laskuvarjohyppääjän putoamista. Esimerkkilaskujen ohessa on myös kokeellinen työ, jossa määritetään kaltevalla tasolla liukuvaan kappaleeseen vaikuttavan kitkavoiman tekemä työ. Tehtävänanto on avoin, joten oppilaat pääsevät soveltamaan tietojaan sekä kehittämään ongelmanratkaisukykyään.

4.4 Systemi ja ympäristö

Fysiikka

Lämpöopin käsittely alkaa Fysiikka-kirjassa varsinaisesti toisessa luvussa, jonka ensimmäinen kappale on nimeltään *Termodynaaminen systeemi*. Aluksi kerrotaan lämpötilan ja paineen vaikutuksesta elinympäristöömme, kuten sääilmiöihin. Termodynaamisen systeemin käsitettä lähestytään kokeellisella työllä, jossa tutkitaan avaamattoman virvoitusjuomapullon sisältöä kääntelemällä pulloa. Työohje on yhden lauseen mittainen ja virvoitusjuomapullo oppilaille tuttu, joten työ soveltuu hyvin johdatteluksi tärkeään aiheeseen. Systeemi käsitellään huolellisesti, mutta ympäristöä ei selitetä lainkaan, mikä on vakava puute, sillä oppilaille on ongelmia erottaa systeemi ja ympäristö toisistaan.[7] Marginaalissa on selkeä kuva, joka esittää eristettyä, suljettua ja avointa systeemiä. Systeemi on piirretty ympyränä, jonka ulkopuolelle jäävä osa on ympäristöä. Tässä yhteydessä ympäristön olisi voinut selittää vielä tekstissä, jotta oppilaille muodostuu siitä oikea käsitys. Termodynaamisen systeemin tilaa kuvaavat tilamuuttujat ja niiden muuttuminen mainitaan. Kirjassa on systeemin ja ympäristön käsitteisiin liittyen vain yksi tehtävä *Pohdi ja etsi* -osiossa. Tehtävässä kysytään, millaisena termodynaamisena systeeminä voidaan pitää styroksista valmistettua kylmälaukkua.

Physica

Kirjan kolmas luku aloitetaan lämpöopin peruskäsitteillä, joista ensimmäisenä tarkastellaan lämpötilaa ja seuraavaksi termodynaamista systeemiä. Systeemin määrittelyssä otetaan avuksi oppilaille aiemmin tuttu mekaniikassa tarkasteltu kappale, johon systeemi rinnastetaan. Ruskeapohjaisessa laatikossa kerrotaan lyhyesti, että systeemi on tarkastelun kohde ja tarkastelun ulkopuolelle jäävä osa on ympäristö. Kappaleessa täsmennetään, että systeemin määrittely tehdään tapauskoh-

taisesti. Tämän jälkeen termodynaamiset systeemit luokitellaan eristettyihin, suljettuihin ja avoimiin, joista jokainen käydään läpi kuvan ja arkielämään liittyvän esimerkin avulla. Samalla mainitaan, että mikään systeemi ei voi olla täysin eristetty vaan systeemin pitäminen eristettynä on käytännössä vain approksimaatio. Systeemin ja ympäristön käsitteet käydään Physicassa kokonaisuudessaan selkeästi läpi, mutta harmillista on, että kirjassa ei ole aiheeseen liittyen lainkaan tehtäviä.

4.5 Tasapainotila

Fysiikka

Tasapainotilaa tarkastellaan Fysiikka-kirjassa termodynaamisen systeemin kanssa samassa kappaleessa. Haastavaa käsitettä lähestytään oppilastyöllä, jossa tarkastellaan lämpötilan muuttumista vettä ja jääpaloja sisältävässä termospullossa. Työohjeessa pyydetään odottamaan niin kauan, että lämpötila ei enää muutu, jolloin pullossa vallitsee terminen tasapaino. Marginaalissa on yksinkertainen poikkeileikkauskuva termospullosta, ja kuvatekstissä termospullossa olevien aineiden todetaan muodostavan lähes eristetyn systeemin. Tekstissä ei kuitenkaan kerrota, miksi termospullon sisältö ei ole täysin eristetty systeemi eli tämän seikan huomioiminen jää opettajan vastuulle. Oppilastyön jälkeen todetaan, että eristetty termodynaaminen systeemi pyrkii siirtymään termodynaamiseen tasapainotilaan, jossa ei esiinny lämpötilaeroja. Termodynaamiseen tasapainotilaan vaadittavat tasapainoehdot mainitaan, mutta niitä ei selitetä lainkaan, joten mekaaninen ja kemiallinen tasapaino jäävät oppilaalle vieraiksi käsitteiksi.

Oppilastyöhön palataan uudestaan termodynaamisen tasapainotilan käsittelyn jälkeen. Tällöin selitetään, miten pullossa oleva ilma ja vesi asettuvat jään sulamisen jälkeen termiseen tasapainoon. Keltapohjaisessa laatikossa kerrotaan, että eristettyyn systeemiin muodostuu itsestään termodynaaminen tasapaino. Tämän jälkeen tarkennetaan, että ollessaan termodynaamisessa tasapainossa systeemillä on tietty tilavuus ja kaikkialla sama lämpötila. Systeemin vakiotilavuuteen ei kuitenkaan liitetä aiemmin mainittua mekaanisen tasapainon käsitettä. Lämpötilaerojen tasoitumisen avulla määritellään lämpöopin nollas pääsääntö.

Kappaleessa on kuvia erilaisista termodynaamisista systeemeistä, kuten kahvikupista ja kaukolämpöverkosta. Arkipäiväisten välineiden käyttö fysiikan opetuksessa on keskeistä, koska tällöin opetus tulee lähemmäksi oppilaan maailmaa. Kirjassa

on *Pohdi ja etsi* -osiossa yksi tasapainotilaa käsittelevä tehtävä, jossa tarkastellaan pöydällä olevaa virvoitusjuomaa ja jääpaloja sisältävää juomalasia.

Luvussa neljä käsitellään olomuodonmuutoksia, joiden yhteydessä perehdytään kemiallisen tasapainon muodostumiseen. Tekstissä kerrotaan, että suljettu systeemi saavuttaa ajan kuluessa dynaamisen tasapainotilan, jossa haihtuminen ja tiivistyminen ovat yhtä runsasta. Marginaalissa esitetään hieman sekava kuva kemiallisesta tasapainosta suljetussa astiassa.

Physica

Physicassa termodynaamista tasapainotilaa ei käsitellä lainkaan. Lämpötilan yhteydessä todetaan, että mitattaessa kahvin lämpötilaa, lämpömittari ja kahvi asetuvat lämpötasapainoon, joka on harhaanjohtava käsite. Lämpötasapainon mainitseminen aiheuttaa helposti käsityksen, että lämpö tasaantuu kahden kappaleen välillä, vaikka todellisuudessa kyse on lämpötilojen tasaantumisesta. Oppilailla on vaikeuksia ymmärtää, mikä lämpökontaktissa olevien kappaleiden välillä tasoittuu, ja lämpötasapainon mainitseminen johtaa tässä yhteydessä entistä enemmän harhaan. Valitettavasti lämpötasapainosta puhuminen tukee myös yleisen virhekkäisyyden, jonka mukaan lämpötila on lämmön mitta, kehittymistä.[5] Lämpötilojen tasoittumisen yhteydessä tekstissä mainitaan, että lämpötila voidaan lukea, kun tasapainotila on saavutettu. Pelkkä tasapainotilan mainitseminen ei kuitenkaan merkitse mitään, sillä tekstistä ei selviä, mitä tasapaino tarkoittaa tai millaisesta tasapainosta on kysymys.

Termodynaamisen tasapainotilan käsitettä ei mainita kirjassa, mutta kemiallista tasapainoa käsitellään olomuotojen yhteydessä luvussa kuusi. Kemiallisen tasapainon muodostuminen selitetään kahden mikrotason malleja esittävän kuvan avulla. Kuvatekstissä mainitaan, että tasapainotilassa nestettä höyrystyy ja tiivistyy yhtä nopeasti.

4.6 Lämpötila

Fysiikka

Lämpötilaa tarkastellaan termodynaamisen systeemin ja tasapainotilan jälkeen luvussa kaksi. Lähtökohta on hyvin arkipäiväinen liittyen ihon havaitsemaan lämpö-

tilan muutokseen. Mikroskooppiselle tasolle siirrytään huomattavan nopeasti mainitsemalla, että lämpötila on tilastollinen suure, joka riippuu rakenneosasten lämpöliikkeestä johtuvasta keskimääräisestä liike-energiasta. Samassa kappaleessa käsitellään myös kelvinasteikko ja absoluuttinen nollapiste. Lämpötila-kappaleessa esitetään yksi esimerkkilasku, jossa celsius- ja kelvinasteita muunnetaan toisiinsa. Kappaleen jälkeen on aukeman mittainen osio, jossa on syventävää tietoa liittyen lämpötilan mittaamiseen.

Pohdi ja etsi -osiossa on tehtäviä, joissa kysytään lämpömittarin nesteeltä vaadittavia ominaisuuksia, vaatteiden pesulämpötiloja, kehon lämpötilan vaihtelua, maailmankaikkeuden keskilämpötilaa sekä huoneen sisälämpötilan vaikutusta lämmityskuluihin. Sisälämpötilan vaikutus lämmityskuluihin sopii hyvin yhteen opetussuunnitelman perusteissa annettujen lämpöopin kurssin tavoitteiden kanssa.[15] Tehtävä-osiossa muunnetaan lämpötiloja eri asteikoista toiseen ja rakennetaan lämpömittari.

Physica

Lämpötila esiintyy Physicassa kolmannen luvun alussa lämpöopin käsitteistä ensimmäisenä, mikä on luontevaa, koska lämpötilan mittaaminen on oppilaille arkielämästä tuttua. Toinen asia sitten on, miten hyvin oppilaat ymmärtävät sen, mitä he ovat mittaamassa.[21] Physicassa lämpötilan käsitettä lähestytään Fysiikka-kirjan tavoin tuntoaistimuksen avulla eli kuinka lämpimältä tai kylmältä jokin kappale tuntuu. Tämän jälkeen perustellaan lämpömittarin käyttöönotto tuntoaistimuksen epätarkkuudella ja tarkastellaan lämpömittarin toimintaa käyttämällä virheellistä lämpötasapainon käsitettä. Ruskeapohjaisessa laatikossa, jonka otsikkona on lämpötila, mainitaan ainoastaan SI-järjestelmän mukainen tunnus ja yksikkö lämpötilalle. Tämän jälkeen annetaan muunnoskaavat celsius- ja kelvinasteikkojen välille sekä tehdään niihin liittyen kaksi esimerkkilaskua. Lämpötilaan liittyvät tehtävät ovat samankaltaisia kuin Fysiikka-kirjassa.

Kirjassa ei lämpötilan yhteydessä esitellä lainkaan mikrotason mallia eli lämpötilan ja aineen rakenneosasten keskimääräisen nopeuden välistä yhteyttä ei mainita. Erillisen *Mikro ja makromallit* -alaotsikon alla siirrytään mikrotasolle, jolloin myös lämpötilaa käsitellään hieman perusteellisemmin toteamalla, että yksittäisellä atomilla tai molekyyllillä ei ole lämpötilaa eikä painetta. Mikromalleihin liittyen kappaleessa on oppilastyö, jossa ilmapallo laitetaan huoneenlämpötilassa tyhjän

muovipullon suulle ja pullo upotetaan sekä lumeen että kuumaan veteen, jolloin ilmapallon tilavuus muuttuu riippuen sen sisällä olevan ilman lämpötilasta. Seuraavassa lämmön siirtymistä käsittelevässä kappaleessa käytetään myös mikrotason malleja, kun todetaan, että kuumassa kappaleessa mikroskooppiset rakenneosaset värähtelevät enemmän kuin kylmässä.

4.7 Lämpö ja lämpöenergia

Fysiikka

Lämmön käsitteeseen perehdytään viidennessä luvussa, jonka nimi on *Lämpö on energiaa*. Aluksi tarkastellaan tilannetta, jossa kosketetaan kehon lämpötilaa alemmassa lämpötilassa olevaa kappaletta ja mainitaan lämmön siirtyvän itsestään kehosta kappaleeseen. Samalla todetaan, että lämpö voi siirtyä ulkoisella energialla toimivan koneen avulla myös toiseen suuntaan, millä pohjustetaan toista pääsääntöä. Lämmön käsitteeseen johdatellaan kaksiosaisella kokeellisella työllä. Ensimmäisessä osassa otetaan kaksi koeputkea, joista toiseen laitetaan kylmää ja toiseen kuumaa vettä, minkä jälkeen ne asetetaan vierekkäin eristettyyn astiaan, kuten styroksilaatikkoon. Molempien koeputken veden lämpötila mitataan alussa ja jonkin ajan kuluttua. Toisessa osassa kuumennetaan metallipunnus kiehuvaan veteen ja pudotetaan se kylmää vettä sisältävään astiaan. Veden lämpötilan muuttumista seurataan lämpömittarin avulla. Työohjeen alla on keltapohjainen laatikko, jossa lämpö määritellään energiaksi, joka siirtyy lämpötilaeron vuoksi systeemistä toiseen. Kokeelliseen työhön viitataan tekstissä todettaessa, että luovutettu lämpömäärä on yhtä suuri kuin vastaanotettu lämpömäärä. Tekstissä täsmennetään, että lämpötilat pyrkivät tasoittumaan, mikä ehkäisee virhekäsitysten syntymistä. Tässä kohdassa kirjan teksti toimii esimerkillisesti, sillä oppikirjatekstin tulee virheettömyytensä lisäksi myös aktiivisesti ehkäistä virhekäsityksiä.[4]

Lämpö määritellään aineen rakenneosasten liike-energiaksi ja samalla sen korostetaan olevan yksi energiamuoto. Kappaleessa määritellään keltapohjaisessa laatikossa lämmön säilymlaki, jonka mukaan kahden eri lämpötilassa olevan kappaleen välisessä lämpökontaktissa kylmempi kappale vastaanottaa yhtä suuren lämpömäärän kuin kuumempi luovuttaa. Fysiikassa ei kuitenkaan ole lämmön säilymis-

lakia vaan energiansäilymlaki, joten kirjan määrittely on oppilasta varten tehty kansankielinen yksinkertaistus. Epämääräisen säilymlain jälkeen todetaan, että lämpö voi muuttua eri energiamuodoiksi, mutta energian kokonaismäärä pysyy muuttumattomana.

Physica

Physicassa lämpöä tarkastellaan kolmannessa ja kuudennessa luvussa. Kolmannessa luvussa lämmön käsitettä tutkitaan mikroskooppisesta näkökulmasta eli lähestymistapa on selkeästi erilainen kuin Fysiikka-kirjassa. Erityisen huomionarvoista on, että sisäenergia käsitellään Physicassa ennen lämpöenergian ja lämmön käsitteitä, mikä on luonteva järjestys, sillä lämpöenergia on sisäenergiaa. Lämpöenergian kerrotaan olevan se osa sisäenergiasta, joka muodostuu rakenneosien liike-energiasta. Tämän jälkeen todetaan tarkentavasti, että lämpöenergiaa ei voida määrittellä makrotasolla. Lämpö määritellään lämpötilaerojen takia kahden systeemin välillä siirtyväksi energiaksi. Tilanteeseen pyritään tuomaan konkreettisuutta mainitsemalla, että asetettaessa kuuma ja kylmä käsi vastakkain kylmempi saa lämpöä kuumemmalta, ja lämpötilat tasoittuvat. Kappaleen lopussa on vihreäpohjainen laatikko, johon on koottu lämpöopin keskeiset käsitteet makro- ja mikrotasolla.

Kuudennessa luvussa lähestymistapa lämpö-käsitteelle on samankaltainen Fysiikka-kirjan kanssa. Kappaleen otsikkona on *Lämpö on siirtyvää energiaa*, ja sen alapuolella on oppilastyö, jossa pudotetaan kuuma rautakappale kylmään veteen. Seuraavalla sivulla on kuva kahdesta eri lämpötilassa olevasta kappaleesta lämpöeristetyn astian sisällä. Kappaleiden väliselle rajapinnalle on piirretty nuoli, jossa lukee *lämpöä*. Lämpötilojen kerrotaan tasoittuvan, mutta termisen tasapainon käsitettä ei mainita. Tekstissä kerrotaan, että kuumempi kappale jäähtyy ja kylmempi lämpenee, mutta ilmiölle ei mainita mitään kokeellista perustaa. Linkki edellisen sivun oppilastyöhön jää puuttumaan, jolloin oppilaan on vaikea kytkeä hyvää kuvaa omiin havaintoihinsa. Systeemin todetaan olevan eristetty, jolloin sen kokonaisenergia säilyy. Kuumemman kappaleen sisäenergian kerrotaan pienenevän sen luovuttamalla energian määrällä ja kylmemmän kappaleen sisäenergian vastaavasti kasvavan vastaanotetulla energian määrällä.

Kirja korostaa lämpöopin yhteydessä käsitteiden oppimista ja ymmärtämistä. Tehtävä-osiossa on lämpötilaan liittyvien tehtävien lisäksi määrittelytehtävä, jossa

pyydetään määrittelemään ja selittämään lämpö, lämpöenergia ja sisäenergia. Ongelmana on kuitenkin se, että kirja ei selvitä, miksi tällaiset käsitteet tulee ottaa käyttöön eli ne jäävät merkityksettömiksi.

4.8 Ominaislämpökapasiteetti

Ominaislämpökapasiteetin käsite ei ole mielenkiinnon kohteena tässä tutkielmassa, mutta sitä tarkastellaan analyysissä kahdesta syystä. Ensinnäkin ominaislämpökapasiteetti liittyy lämmön käsitteeseen, ja toiseksi molemmissa oppikirjoissa esiintyy sen yhteydessä esimerkkilaskuja, jotka liittyvät tämän tutkielman kannalta mielenkiintoisiin käsitteisiin, kuten systeemiin, ympäristöön ja lämpöopin pääsääntöihin. Lämpökapasiteetin ja ominaislämpökapasiteetin käsitteitä analysoidaan vain niiltä osin kuin tutkielman aiheen puitteissa on mielekästä.

Fysiikka

Lämpökapasiteettia tarkastellaan heti lämmön jälkeen *Lämmön mittaaminen* nimisessä kappaleessa. Lämpökapasiteetin käsitteen merkitys luodaan esimerkin avulla, jossa mitataan kylmään veteen siirtyvää lämpöä pudotettaessa kuuma rautakappale kylmään veteen. Tässä yhteydessä todetaan, että veden lisäksi myös lämpömittari ja kalorimetri lämpenevät, minkä vuoksi tarvitaan uusi suure, lämpökapasiteetti. Lyhyen johdattelun jälkeen seuraa kuvalla varustettu oppilastyö, jossa määritetään lämpökapasiteetti lämmittämällä kalorimetrissa olevaa vettä uppo-kuumentimella. Keltapohjaisissa laatikoissa esitetään sekä lausekkeet lämpökapasiteetille että kappaleen luovuttamalle tai vastaanottamalle lämmölle.

Ominaislämpökapasiteetti käydään läpi samalla tavalla kuin lämpökapasiteetti. Aluksi on kolmiosainen oppilastyö, jossa mitataan kahden eri lämpötilassa olevan aineen lämpötilojen tasoittumista. Kahdessa ensimmäisessä kohdassa seurattiin vesien lämpötilaeron tasoittumista, kun kolmannessa kohdassa pudotettiin kiehu-
vassa vedessä ollut rautakappale kalorimetrissä olevaan veteen. Tekstissä kerrotaan, että lämpöä siirtyi raudasta veteen, mutta missään ei selitetä miksi lämmön siirtyminen tapahtuu juuri tähän suuntaan. Keltapohjaisissa laatikossa esitetään lauseke ominaislämpökapasiteetin ja lämpömäärän laskemiseksi.

Kirjassa on ominaislämpökapasiteettiin liittyen oppilastyö ja esimerkkilaskuja, joissa puhutaan jälleen lämmön säilymislaista. Toinen huomionarvoinen seikka on, että

kirjan ensimmäisessä lämpöoppia käsittelevässä kappaleessa esiintynyttä termistä tasapainoa ei mainita tehtävissä, joissa lämpötilaerot tasoittuvat. Terminen tasapaino on siis jäänyt irralliseksi käsitteeksi, mikä heikentää sen oppimista, sillä käsitteiden merkitykset opitaan vähitellen käyttämällä niitä eri yhteyksissä.[4]

Physica

Ominaislämpökapasiteettia käsitellään kuudennessa luvussa, joka on nimeltään *Lämpö ja olomuoto*. Tarkastelu aloitetaan Fysiikka-kirjan tapaan pudottamalla kuuma rautakappale kylmään veteen. Ominaislämpökapasiteetin todetaan olevan aineelle ominainen energian luovutus- ja vastaanotto-kykyä kuvaava suure. Yhtälöt lämpömäärän ja ominaislämpökapasiteetin laskemiseksi esitetään ruskeapohjaisissa laatikoissa. Ominaislämpökapasiteettiin ja lämpökapasiteettiin liittyy molempiin yksi esimerkkilasku.

Merkittävin ero Physica- ja Fysiikka -kirjojen välillä ominaislämpökapasiteetin kohdalla esiintyy siinä, että Physicassa käytetään kappaleen lämpötilan muutoksen yhteydessä sisäenergian käsitettä. Toinen ero on, että Physicassa ominaislämpökapasiteetti käsitellään ensin ja lämpökapasiteetti sen jälkeen, kun Fysiikka-kirjassa järjestys on päinvastainen.

4.9 1. pääsääntö

Fysiikka

Viidennen luvun neljännen kappaleen otsikkona on *Termodynamiikan pääsäännöt*. Kappaleen aluksi on oppilastyö, jossa tutkitaan kaasun sisäenergian muutoksia polkupyöränpumpun avulla sekä kvalitatiivisesti tuntoaistin turvin että kvantitatiivisesti tietokonepohjaisella mittauslaitteistolla. Fysiikka-kirjassa sisäenergian käsite esiintyy ensimmäistä kertaa tämän oppilastyön yhteydessä, jolloin kaasun sisäenergian kerrotaan kasvavan, kun pumpun avulla tehdään työtä kaasusysteemiin. Tekstissä ei kuitenkaan mainita, että systeemi on approksimatiivisesti adiabaattinen. Oppilas kohtaa sisäenergian käsitteen ensimmäistä kertaa vaikean ilmiön selityksessä, jolloin se ei varmasti avaudu hänelle ilman opettajan ohjausta ja selitystä. Fyysikolle on selvää, että työn tekeminen kaasuun kasvattaa sen lämpötilaa

mutta oppilaan kohdalla tilanne voi olla toinen.[3] Oppilaan voi olla vaikea ymmärtää miksi pumppu lämpenee, sillä oppilaille on tutkimusten mukaan vaikeuksia kytkeä työ ja kaasun lämpötila toisiinsa.[1]

Systeemin rajapinnan läpi kerrotaan siirtyvän energiaa sekä lämpönä että työnä. Aiheeseen liittyen annetaan käytännön esimerkki auton lukkojarrutuksesta. Seuraavaksi annetaan olomuodonmuutoksen avulla esimerkki tilanteesta, jossa sisäenergia muuttuu mutta lämpötila pysyy vakiona. Latenttilämmön kerrotaan olevan olomuodonmuutoksiin liittyvä sisäenergian muutos. Sisäenergia on mainittu tässä kappaleessa jo useita kertoja mutta vasta nyt käsitettä selitetään. Sisäenergian kerrotaan koostuvan systeemin sisäisten rakenneosien erityyppisten liike-energioiden ja sidosten potentiaalienergioiden summasta, minkä ymmärtäminen vaatii siirtymistä mikrotasolle. Tämän jälkeen kuitenkin tehdään approksimaatio toteamalla, että yleensä kaasun sisäenergia riippuu pääasiassa sen lämpötilasta. Käsitettä täsmennetään mainitsemalla, että gravitaatiokenttään liittyvä potentiaalienergia ja systeemin etenemiseen liittyvä liike-energia eivät ole sisäenergiaa. Oppilaan voi olla hankala muodostaa kokonaiskuvaa eri energiamuodoista, joten kunnollinen kaaviokuva olisi tässä kohdassa paikallaan. Tekstissä kerrotaan lisäksi, että sisäenergian arvoa ei yleensä voida määrittää, joten fysiikassa tarkastellaan sisäenergian muutoksia. Samalla sisäenergian mainitaan olevan tilanfunktio, jolloin sen arvo on kahden tilan välisestä prosessista riippumaton. Kahden selkeän kuvan avulla havainnollistetaan kahta eri tilannetta termodynaamisissa systeemeissä. Ensimmäisessä tilanteessa kaasua lämmitetään ja siihen tehdään työtä. Toinen tilanne on muuten samanlainen mutta siinä kaasu tekee työtä.

Lämpöopin 1. pääsääntö esitetään sekä matemaattisesti että sanallisesti. Ensimmäisen pääsäännön kerrotaan olevan eräs energian säilymislain muoto eli systeemin energia voi muuttua muodosta toiseen, mutta sen kokonaismäärä pysyy vakiona. Oppilaille kuitenkin jää epäselväksi, kuinka ensimmäinen pääsääntö liittyy aiemmin tarkasteltuun energian säilymiseen. Tilanteen mystisyyttä oppilaan kannalta lisää entisestään se, että ensimmäisessä pääsäännössä esiintyy uusi ja outo sisäenergian käsite. Kappaleen lopuksi todetaan, että sisäenergian muutosta laskettaessa tarvitsee tietää vain ne energiamuodot, jotka muuttuvat prosessissa.

Physica

Lämpöopin pääsääntöjä käsittelevän luvun alussa on kuva mehiläisparvesta ja kuvatekstissä viitataan mehiläisten tekemään työhön. Ensimmäisen pääsäännön tarkastelu aloitetaan mainitsemalla, että eristetyn systeemin kokonaisenergia ei muutu sekä viittaamalla mekaanisen energian säilymiseen. Seuraavaksi todetaan, että systeemin termodynaamista tilaa voidaan muuttaa joko tekemällä työtä tai lämmittämällä systeemiä. Oppilaiden on hankala mieltää, että systeemin lämpötilaa voidaan muuttaa työtä tekemällä.[20] Tämän vuoksi on hyvä, että työn tekemistä systeemiin havainnollistetaan kuvaajalla, jossa esitetään tehosekoittimella sekoitetun veden lämpötila ajan funktiona. Kuvatekstissä kerrotaan, että veden lämpötilaa voidaan muuttaa sekoittamisen lisäksi myös lämmittämällä. Tässä yhteydessä oppilastyö tai demonstraatio toimisi vielä paremmin, koska tällöin oppilaat tekevät havainnot itse. Kirjassa on aiheeseen liittyvä oppilastyö, jossa hauleja sisältävä pieni pussi pudotetaan 100 kertaa lattialle ja mitataan lämpötilanmuutos. Tällainen oppilastyö on tylsä liiallisen toiston vuoksi, ja lisäksi haulien lämpötilaerojen havaitseminen voi olla vaikeaa. Oppilastyön jälkeen todetaan, että mekaniikassa työ muuttaa systeemin mekaanista energiaa, mutta termodynamiikassa lämmön siirto ja työ muuttavat vastaavasti systeemin sisäenergiaa. Ensimmäinen pääsääntö esitetään matemaattisesti ruskeapohjaisessa laatikossa ja lisäksi tekstissä mainitaan ensimmäisen pääsäännön olevan yksi energian säilymislain muodoista.

Physicassa sisäenergiaa käsiteltiin jo aiemmin luvussa kolme, mutta siihen palataan uudelleen ensimmäisen pääsäännön yhteydessä. Käsitteily tehdään molemmissa luvuissa samalla tavalla. Systeemin sisäenergian muutosta havainnollistetaan systeemin alku- ja lopputilaa kuvaavilla kaavioilla, joiden yhteydessä korostetaan, että lämpö ja työ eivät ole systeemissä, vaan ne kuvaavat energian siirtoa. Kaaviot näyttävät fyysikon silmissä yksinkertaisilta, mutta oppilaat kokevat ne melko vaikeina, minkä vuoksi niiden käyttö vaatii harjoittelua ja opettajan selitystä.[3] Tekstissä todetaan, että olomuodonmuutos voidaan saada aikaan ilman lämpöä työn avulla. Esimerkkinä tällaisesta prosessista annetaan jään hakkaaminen, jolloin muodostuu nestemäistä vettä.

Laajenevan kaasun tekemä työ käsitellään erikseen oman otsikkonsa alla. Aihetta tarkastellaan selkeiden kuvien avulla. Lauseke työn laskemiseksi isobaarisessa laajenemisessa annetaan ruskeapohjaisessa laatikossa.

Kirjassa on ensimmäisen pääsäännön yhteydessä kolme esimerkkiä, joista kaksi liittyy arkielämään. Ensimmäisessä esimerkissä keitetty peruna jäähtyy huoneenlämpötilaan, ja lasketaan perunan sisäenergian muutos, ympäristöön siirtyvä lämpö sekä ympäristön sisäenergian muutos. Toisessa esimerkissä tarkastellaan liedellä olevaa keittokattilaa. Keittoa lämmitetään ja vatkataan samanaikaisesti. Esimerkissä lasketaan keiton sisäenergian muutos. Kolmas esimerkki liittyy kaasun isobaariseen laajenemiseen.

4.10 2. pääsääntö

Fysiikka

Toisen pääsäännön tutkiminen aloitetaan oppilastyöllä, jossa mustepisara leviää vedessä. Työn huonona puolena on, että siinä tapahtuva ilmiö ei oppilaiden näkökulmasta katsoen liity välittömästi lämpöoppiin.[22] Väriaineen sekoittuessa todetaan värillisten ionien jakautuvan tasaisesti liuokseen, minkä jälkeen mainitaan, että lämpötilat tasoittuvat lämpöilmiöissä. Lämpöopin toisen pääsäännön kerrotaan liittyvän tapahtumien suuntaan ja lämmön siirtyvän itsestään korkeammasta lämpötilasta matalampaan, mutta termisestä tasapainosta ei puhuta tässä yhteydessä mitään. Kaikkien termodynaamisten prosessien todetaan suuntautuvan kohti tasapainoa. Lämpöopin toinen pääsääntö ilmaistaan myös kahdessa muussa täsmällisessä muodossa. Toinen pääsääntö esitetään lisäksi energian huononemisen avulla, jolloin todetaan, että luonnon prosessit vähentävät energian kykyä tehdä työtä. Toista pääsääntöä käsitellään myös mikrotasolla, jolloin se voi rikkoutua hetkellisesti. Makroskooppista ainemäärää tarkasteltaessa satunnaisvaihtelu todetaan kuitenkin merkityksettömäksi.

Entropiaa käsitellään lyhyesti toteamalla, että se kuvaa systeemin epäjärjestyttä. Entropian kasvu kytketään ajan kulumiseen. Myöhempi ajanhetki liitetään tilaan, jossa epäjärjestys on suurempi. Käytännön esimerkkejä entropian kasvamisesta annetaan savun leviämisen ja koneiden kulumisen muodossa. Entropia käsitteen vaikeuden vuoksi nämä esimerkit eivät avaudu oppilaalle ilman opettajan täsmennyä selitystä.

Lämpövoimakone käsitellään omassa kappaleessaan viittaamalla toiseen pääsääntöön. Marginaalissa esitetään lämpövoimakoneen toimintaa kuvaava kaavio, jossa käytetään, kuten tekstissäkin, harhaanjohtavaa lämpösäiliön käsitettä. Läm-

pösäiliö tai lämpövarasto muodostaa kuvan, että lämpö on ainetta, jota voidaan varastoida.[3] Terminen ja Carnot-hyötysuhde esitetään erillisissä laatikoissa, joiden jälkeen todellisen hyötysuhteen todetaan olevan laskettua hyötysuhdetta pienempi. Lämpövoimakoneeseen liittyen käsitellään kaksi esimerkkiä, jotka käsittelevät höyrykonetta ja lämpövoimakoneen energiakaavioita. Jäähdytyskoneen ja lämpöpumpun toiminta esitetään selkeiden kuvien avulla varsinaisten esimerkkien jälkeen. Fysiikan kannalta oleellista on, että tässä yhteydessä jäähdytyskoneen ja lämpöpumpun kerrotaan toimivan päinvastaiseen suuntaan kuin lämpövoimakone.

Physica

Merkittävin ero toisen pääsäännön käsittelyssä Fysiikka- ja Physica kirjojen välillä on se, että Physicassa lämpövoimakone käsitellään ennen toista pääsääntöä. Physicassa on ennen toista pääsääntöä aiheeseen johdattelua kappale, jonka otsikkona on *Kaikkea lämpöä ei voi muuttaa työksi*. Johdatteluna aiheeseen toimii oppilastyö, jossa tarkastellaan kumilankaa lämpövoimakoneena lämmittämällä sitä hiustenkuivaajalla. Oppilastyön jälkeen käsitellään Feynmanin kumilankakonetta selkeän ja suurikokoisen kuvan avulla sekä määritellään ruskeapohjaisessa laatikossa, mikä on lämpövoimakone. Lämpövoimakoneen toimintaperiaate käydään läpi huolellisesti mutta jälleen tässä yhteydessä käytetään lämpösäiliön käsitettä. Hyötysuhde ja Carnot-hyötysuhde esitetään ruskeapohjaisissa laatikoissa. Kirjassa esitetään sivunkokoiset kaaviokuvat selityksineen polttomoottorin ja hiilivoimala toiminnasta, joten kirjassa on selkeästi painotettu aiheeseen liittyviä sovelluksia. Kappaleessa on kolme lämpövoimakoneen hyötysuhteeseen liittyvää esimerkkitehtävää.

Toisen pääsäännön tarkasteluun siirrytään luontevasti toteamalla, että lämpövoimakone ei voi muuttaa kaikkea ottamaansa lämpöä työksi. Tässä vaiheessa ei mainita mitään prosessien suunnasta, vaan ainoastaan kerrotaan toisen pääsäännön liittyvän lämpövoimakoneisiin. Tämän jälkeen tarkastellaan eri energiamuotojen muuttumista lämpöenergiaksi ja esitetään toinen pääsääntö energian huononemisen avulla.

Seuraavan kappaleen, jonka otsikkona on *Entropia kuvaa systeemin epäjärjestyttä*, alussa kerrataan ensimmäinen pääsääntö ja todetaan, että kaikki termodynaamiset prosessit suuntautuvat kohti tasapainoa. Prosessien suuntaa kohti suurempaa epäjärjestyttä yritetään havainnollistaa kuvasarjalla, jossa väriaine leviää vedessä.

Kuvatekstissä kerrotaan, että aluksi entropia on pieni, mutta väriaineen leviämisen jälkeen entropialla on suuri arvo. Sekoittumiseen liittyen esitetään myös mikrotason malli, jossa hieman eri värisävyillä piirretyt pallot kuvaavat eri molekyyliä. Värisävyjen ero on kuitenkin niin pieni, että kuvan tulkitseminen on vaikeaa. Entropiaa kuvaavien mallien ja kuvien tulisi olla mahdollisimman selkeitä ja yksinkertaisia, sillä epäjärjestystä käsiteltäessä oppilaiden käsitykset mikrotason malleista ovat hyvin rajoittuneet.[5] Entropian kerrotaan kuvaavan systeemin järjestyksen astetta ja sen todetaan kasvavan luonnollisissa prosesseissa.

Energian huononemista havainnollistetaan pallon pomppimisen avulla. Pallon mekaanisen energian huomataan muuttuvan pallon ja lattian rakenneosien lämpöliik-keeksi. Kirjassa selvitetään kuvien avulla, miksi pallo ei pomppaa itsestään ilmaan eli lämpöenergia muutu takaisin mekaaniseksi energiaksi. Toisen pääsäännön yhteydessä esiintyvät kuvat ja esimerkit ovat havainnollisia, mutta ne eivät kytkeydy lämpöopin ilmiöihin.[22]

Physicassa lämpöpumppu ja jäädytyskone käsitellään kahdeksannessa luvussa, jonka nimi on *Energia ja yhteiskunta*. Mielenkiintoista on havaita, että jäädytys-konetta ja lämpöpumppua käsiteltäessä ei viitata lainkaan toiseen pääsääntöön. Jäädytyskoneen suorituskyvyn lauseke esitetään erillisessä laatikossa, ja jääkaa-pin toiminnasta esitetään havainnollinen kuva. Esimerkkilaskussa lasketaan pa-kastimen suorituskyky ja jäädytysteho. Lämpöpumppu käydään läpi vastaavalla tavalla kuin jäädytyskone. Sen toiminnasta esitetään suurikokoinen selkeä kuva ja lausekkeet lämpöpumpun suorituskyvylle esitetään erillisissä laatikoissa.

4.11 Tehtävistä

Oppikirjojen tehtävien analysoinnin tulokset on esitetty liitteessä 1. Tässä yhtey-dessä käydään läpi muutama keskeinen havainto kirjojen analysointiin liittyen.

Tehtävät liittyvät hyvin käsiteltävään aiheeseen ja suurin osa niistä on kvantitatiivisia. Fysiikka-kirjassa tehtäviä on selvästi enemmän kuin Physica-kirjassa, mut-ta monet niistä ovat samankaltaisia. Oppikirjoista löytyy useita tehtävien analyysin perusteella samaan luokkaan kuuluvia tehtäviä, mikä tarjoaa valinnanvaraa esi-merkiksi harjoitustehtäviä valittaessa. Molemmille kirjoille tyypillisessä tehtävässä annetaan lähtöarvot ja pyydetään laskemaan tietyn suureen arvo.

Molemmissa kirjoissa on perinteisten laskutehtävien lisäksi myös käsitteiden ja lakien ymmärtämistä kehittäviä tehtäviä, joissa pyydetään esimerkiksi määrittelemään tietyt käsitteet. Oppimisen kannalta keskeistä on lisäksi se, että tehtävien kuvailut ja lähtötilanteet ovat pääosin luonnollisia ja liittyvät monessa kohdin arkielämään.

Lämpöopin pääsääntöjen osalta kirjojen tehtävät ovat samankaltaisia. Ensimmäiseen pääsääntöön liittyen molemmista kirjoista löytyy sekä kvantitatiivisia, suljettuja tehtäviä että kvalitatiivisia, avoimia tehtäviä. Kirjat painottavat tässä yhteydessä kuitenkin laskutehtäviä. Toisen pääsäännön kohdalla tehtävät käsittelevät molemmissa kirjoissa lämpövoimakoneen toimintaa kvantitatiivisesti. Ilahduttavasti kirjoista löytyy näiden tehtävien lisäksi kvalitatiivisia, toisen pääsäännön ideaa käsitteleviä tehtäviä.

Oppikirjat tarjoavat sisällöltään ja haastavuudeltaan monipuolisia tehtäviä. Opettajalla on siis käytössään, oppikirjasta riippumatta, runsaasti hyviä tehtäviä, joiden hyödyntäminen jää hänen vastuulleen. Selitys- ja pohdintatehtävistä keskusteltaessa opettaja voi ohjata oppimista esimerkiksi esittämällä tehtäviin liittyviä lisäkysymyksiä.

5 Oppilaskyselyn teorian esittely

5.1 Tutkimusongelma

Tämän Pro gradu -tutkielman päätavoitteena on selvittää, miten lukiolaiset ymmärtävät lämpöopin peruskäsitteitä ja pääsääntöjä. Tutkimuksessa selvitetään, miten oppimateriaali tukee oppimista eli ovatko esimerkiksi kirjassa esiintyneet kuvat aiheuttaneet tai ehkäisseet virhekäsitysten syntymistä. Tutkielman laajuuden puitteissa tutkimus keskittyy muutamaankin käsitteeseen, joiden ymmärtämistä tutkitaan perusteellisesti. Tutkimuskohteita ovat:

- termodynaaminen tasapainotila
- sisäenergia ja lämpöopin ensimmäinen pääsääntö
- entropia ja lämpöopin toinen pääsääntö.

Nämä ovat sellaisenaan laajoja tutkimuskohteita, joten varsinainen tutkimusongelma on rajattava tarkemmin. Tutkimuksessa keskitytään fysiikan käsitteiden osalta tiettyihin keskeisiin kysymyksiin, jotka esitellään seuraavaksi.

Termodynaaminen tasapainotila

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää tunnistavatko oppilaat tasapainotilan käsitteen ja miten sen ymmärtäminen vaikuttaa lämpöopin perusilmiöiden ymmärtämiseen. Oppilaiden käsityksiä tasapainotilasta tutkitaan sekä makro- että mikro-tasolla. Termodynaamisen tasapainotilan kohdalla asetelma on varsin mielenkiintoinen, sillä oppikirja-analyysissä todettiin, että toinen oppikirjoista ei mainitse lainkaan tätä käsitettä eikä sitä mainita opetussuunnitelman perusteissa. Lämpöopin tietorakenteessa tasapainon käsite on kuitenkin hierarkisesti korkealla.

Sisäenergia ja lämpöopin ensimmäinen pääsääntö

Sisäenergian kohdalla tutkitaan ymmärtävätkö oppilaat, mitä sisäenergia tarkoittaa vai onko se jäänyt vain ulko-opetelluksi oudoksi ja irralliseksi sanaksi, jota käytetään lämpöopin kurssilla. Oppikirjat käsittelevät sisäenergian eri kohdissa lämpöopin kurssia, joten tutkimuksen avulla selvitetään, onko tämä ero merkittävä.

Ensimmäisen pääsäännön tutkimuksessa rajoitetaan selvittämään, miten oppilaat ymmärtävät energian säilymisen ilmiöissä. Tähän yhteyteen liittyy kiinteästi myös sisäenergia käsitteen ymmärtäminen, koska ensimmäisen pääsäännön ymmärtäminen ilman tätä käsitettä on mahdotonta.

Entropia ja lämpöopin toinen pääsääntö

Tässä tutkimuksessa selvitetään oppilaiden kykyä ymmärtää entropian kasvu luonnollisissa prosesseissa ja lisäksi testataan oppilaiden päättelykykyä käsittelemällä osasynteesin entropiaa, joka ei kuulu lukion oppimäärään. Entropia ja lämpöopin toinen pääsääntö ovat tutkimusten mukaan liian vaikeita käsitteitä opittaviksi tavalla, jolla fysiikkaa lukiossa opetetaan.[3, 5] Tästä huolimatta toisen pääsäännön ymmärtäminen on keskeisessä roolissa pohdittaessa energiantuotantoa ja energia-varoja, jotka ovat opetussuunnitelmassa mainittuja keskeisiä tavoitteita lämpöopin kursseilla.[6] Edellä mainitut seikat asettavat entropia käsitteen tutkimisen varsin mielenkiintoiseen asemaan.

5.2 Rakenne

Oppilaskyselyn rakenne käydään aluksi läpi pääpiirteissään, minkä jälkeen perehdytään tarkemmin tutkimusongelmia käsitteleviin yksittäisiin tehtäviin ja niiden kysymyksenasetteluihin. Kyselylomake on erillisenä liitteenä tutkielman lopussa (Liite 2). Oppilaskysely koostui neljästä tehtävästä, jotka kaikki olivat vastaamiseen käytettävän rajallisen ajan puitteissa monivalintakysymyksiä. Kyselyn alussa selvitettiin vastaajien yleisiä tietoja, kuten sukupuoli ja kursseilla käytetty oppikirja sekä mielipiteitä lämpöopin kurssin vaikeustasosta, jonka avulla voidaan tutkia, miten oppilaiden mielipiteet vaikeustasosta vaikuttavat oppilaskyselystä suoriutumiseen. Opiskelijoiden motivaatiota luonnontieteiden opiskelua kohtaan mitattiin kysymällä, kuinka monta fysiikan ja kemian kurssia he aikovat suorittaa lukiossa. Tehtävissä 1 ja 2 opiskelijoiden tuli ympyröidä oikeat väittämät, joita saattoi olla useita. Tällä tavoin laaditun tehtävänannon avulla oli mahdollista testata monta käsitettä samassa tehtävässä ilman, että testistä tulee liian pitkä. Menetelmän heikkona puolena on se, että opiskelijat voivat sivuuttaa heille tuntemattomalta kuulostavan tai vaikean käsitteen, ja tällöin ei saada mitään tietoa opiskelijoiden käsityksistä tai ajattelutavasta. Tehtävissä 3 ja 4 opiskelijoiden tuli ympyröidä

yksi oikea vastausvaihtoehto. Tehtävät olivat tarkoituksella haastavia sekä osittain lukion oppimäärän ylittäviä ja niissä käytettiin arkipäiväisiä tai oppilaille aiemmin tuttuja tilanteita, jotta opiskelijat pääsivät helpommin pohtimaan niiden taustalla olevaa fysiikkaa. Samoja käsitteitä testattiin monessa eri tehtävässä, jotta saatiin selville, ymmärtävätkö opiskelijat käsitteiden merkitykset erilaisissa yhteyksissä tai käytettäessä erilaista kielellistä muotoilua. Alla olevassa taulukossa (taulukko 1) on koottuna, mitä käsitettä on tutkittu tiettyssä tehtävässä tai tietyn väittämän avulla.

Taulukko 1: Taulukosta selviää, mitä käsitteitä on tutkittu tiettyjen tehtävien ja väitteiden avulla. TD1 tarkoittaa lämpöopin ensimmäistä pääsääntöä ja TD2 lämpöopin toista pääsääntöä.

Käsite	Tehtävä / Väittämät
Tasapainotila	1b, 1d, 2a, 2d
Lämpö ja lämpötila	1c, 1d
Haihtuminen	2b, 2c
Sisäenergia	1a, 3
Entropia	4
TD1	1a, 3
TD2	4

5.3 Tehtävä 1: Termospullo

Tehtävänanto muotoiltiin tarkoituksella samalla tavalla kuin oppikirjoissa ja tehtävään valittiin mahdollisimman arkipäiväinen tilanne, jotta opiskelijoilla olisi pienempi kynnyks vastata tehtävään. Termospullo on hyvä esimerkki eristetystä systeemistä, vaikka kannen läpi on työnnetty lämpömittari. Tehtävän kuvauksen voi ymmärtää monellakin tavalla. Vettä voi olla hyvin vähän ja jääpaloja niin paljon, että lopulta termospullossa on pelkkää jäätä. Tämä vaihtoehto on kuitenkin tehtävänannon perusteella epärealistinen. Toinen vaihtoehto on, että jääpalat sulavat kokonaan, minkä jälkeen pullossa on vain vettä, ja kolmannessa vaihtoehdossa tasapainotilassa on sekä vettä että jääpaloja samassa lämpötilassa. Nämä tilanteet eivät vaikuta väittämien oikeellisuuteen.

Termisen tasapainon käsite on keskeinen asia lämmön ja lämpötilan fysikaalisen ymmärtämisen kannalta. Tämän käsitteen tärkeys korostuu myös muiden lämpöopin käsitteiden oppimisessa. Tutkimusten mukaan opiskelijoilla on sekä lukiossa että jatko-opinnoissa ongelmia tämän käsitteen kanssa.[23] Opiskelijoilla on vielä yliopistotasolla vaikeuksia ymmärtää, että eri materiaaleista valmistetut kappaleet ovat samassa lämpötilassa, kun ne ovat olleet pitkään kontaktissa ympäristön kanssa. Termisen tasapainon käsite on siis huonosti ymmärretty.[24] Haastavuutensa ja tärkeytensä ansiosta tasapainon käsitteelle on annettu tässä kyselyssä paljon painoarvoa, minkä vuoksi ensimmäisessä tehtävässä on kaksi siihen eksplisiittisesti liittyvää väittämää. Toinen väittämistä (1d) liittyi termisen tasapainon muodostumiseen ja tilamuuttujien määrittelyyn. Tasapaino-käsitteen haastavuus ei rajoitu vain termiseen tasapainoon, vaan yliopisto-opiskelijoilla on havaittu ongelmia myös kemiallisen tasapainon kanssa, vaikka fysikaalisen kemian kurssi olisi suoritettu.[23] Tämän vuoksi toinen tasapainotilaa käsittelevistä väittämistä (1b) liittyi kemialliseen tasapainoon.

Mikrotason mallit opetuksessa herättävät mielipiteitä puolesta ja vastaan. Yleinen käsitys kuitenkin on, että ilmiöitä ei tule käsitellä opetuksen varhaisessa vaiheessa pelkästään mikrotasolla.[2] Tätä käsitystä tukee tieto siitä, että ihmisen kyky käsitellä abstrakteja kokonaisuuksia kehittyy iän myötä ja tutkimuksissa on havaittu mikrotason väärinymmärrysten johtavan väärinymmärryksiin myös makrotasolla.[2, 25] Lukio-opetuksessa ilmiöitä kannattaa ainakin aluksi tarkastella havaittavalla tasolla, sillä liian aikainen siirtyminen mikrotasolle jättää aukkoja perusasioiden hallintaan.[26] Lukion lämpöoppi on osittain syvällistä fysiikkaa, minkä vuoksi on perusteltua antaa ilmiöille myös mikrotason selityksiä, vaikka pääpaino on makroskooppisen tason tarkastelussa.[22] Näiden syiden vuoksi kyselyyn muotoiltiin kaksi mikrotasoa käsittelevää väittämää eli väittämät 1b ja 1c.

Väittämä 1b liittyi kemiallisen tasapainon muodostumiseen ja sen avulla pyrittiin selvittämään, kuinka moni opiskelija tunnistaa, että termodynaamisessa tasapainotilassa ei tapahdu makroskooppisia muutoksia. Väittämään ei ollut absoluuttisen oikeaa tai väärää vastausta vaan kyse oli tarkastelun tasosta, mikä huomioitiin myös vastauksia analysoitaessa. Jos kemiallista tasapainoa tutkitaan makrotasolla, ei haihtumista tai tiivistymistä tapahdu, sillä systeemin ollessa tasapainotilassa siinä ei tapahdu makroskooppisia muutoksia. Mikrotasolla molekyyliä sen sijaan siirtyy neste- ja kaasufaasien välillä siten, että molekyyliä siirtyy nestefaasista

kaasufaasiin yhtä suurella nopeudella kuin kaasufaasista nestefaasiin, eli mikrotasolla tapahtuu haihtumista ja tiivistymistä.

Toinen mikrotasoa testaava väittämä oli 1c, joka testasi opiskelijoiden ymmärrystä lämpötilan tilastollisesta luonteesta. Väite oli oppikirja-analyysin pohjalta tarkasteltuna mielenkiintoinen, sillä Physica-kirjassa kerrotaan, että yksittäisen atomin tai molekyylin lämpötilaa ei voida mitata. Fysiikka-kirjassa asiaa ei mainita lainkaan, joten väitteen perusteella selviää, miten oppimateriaali on näiltä osin vaikuttanut oppimiseen.

Lämpötilan ja lämmön välisen eron ymmärtäminen on keskeistä toisen pääsäännön oppimisen kannalta, minkä vuoksi opiskelijoiden kykyä erottaa nämä kaksi käsitettä toisistaan tutkittiin myös tässä oppilaskyselyssä.[5] Tutkimusten mukaan opiskelijoilla on ikäryhmästä riippumatta merkittäviä vaikeuksia erottaa lämpötilan ja lämmön käsitteet toisistaan.[6] Käsitteiden erottamisen haastavuutta kuvaa se, että edes kaikki fysiikan ja kemian parissa työskentelevistä tutkijoista eivät ole halukkaita tai eivät kykene määrittelemään eroa lämpötilan ja lämpöenergian välille.[27] Käsitteiden välistä eroa on pyritty vahvistamaan kokeellisen työskentelyn ja tietokonepohjaisten mittausten avulla, mutta yksiköitä merkittävämmän eron synnyttäminen on ollut tässäkin yhteydessä vaikeaa.[28] Monet opiskelijat pitävät sinnikkäästi kiinni omista käsityksistään lämpöön ja lämpötilaan liittyen, minkä vuoksi heidän virhekäsityksensä on pyrittävä kumoamaan esimerkiksi kokeellisessa työssä tehdyn havainnon avulla. [24] Yleinen virhekäsitys on, että lämpötila on lämmön mitta, minkä yleisyyttä suomalaisten lukiolaisten keskuudessa selvitetään oppilaskyselyn väittämän 1d avulla. Suurin osa opiskelijoista ymmärtää lämpötilan mitattavana suurena mutta lämpöä ei heidän mukaansa voida mitata.[5] Kahdeksasluokkalaisten keskuudessa on havaittu käsitys, jonka mukaan lämpötila tarkoittaa koko lämpömittarin asteikkoa mutta lämpö ainoastaan kuumaa osaa.[28] Tällainen virhekäsitys on täysin mahdollinen myös lukiolaisten keskuudessa, sillä lämpöoppia ei käsitellä perusopetuksessa kahdeksannen luokan jälkeen.

Virhekäsitykset eivät rajoitu lämpötilan ja lämmön erottamiseen toisistaan vaan myös lämmön käsitteeseen liittyy monenlaisia käsityksiä. Lämpö ymmärretään yleisesti aineeksi, joka virtaa kappaleiden välillä. Tämä virhekäsitys on havaittu vielä osalla insinööriopiskelijoita, joten käsityksen muuttaminen on melko vaikeaa.[29] 10–16-vuotiaiden keskuudessa lämpö käsitetään yksinkertaisesti kuumak-

si, joka voi lämmittää kappaleita.[30] Ensimmäisen pääsäännön ymmärtämisen kannalta huolestuttavin asia on kuitenkin se, että opiskelijat eivät tavallisesti ymmärrä lämpöä energian muotona.[5]

5.4 Tehtävä 2: Vesilasi

Tehtävänanto poikkesi tarkoituksella hieman lukiossa käsitellyistä tehtävistä mutta oli samalla arkipäiväinen ja yksinkertainen. Tehtävässä testattiin tasapainotilan ymmärtämistä tehtävän 1 tapaan ja tutkittiin lisäksi hieman opiskelijoiden käsityksiä olomuodonmuutoksista rajoittuen haihtumiseen. Opiskelija joutui vastaus- ta pohtiessaan huomioimaan annetut lukuarvot sekä huomautukset. Veden lämpötila oli ilman lämpötilaa alhaisempi, jolloin vesi luovutti lämpöä huoneilmaan. Huoneilma oli kuivaa, minkä vuoksi vettä haihtui. Koko prosessia tarkasteltaessa on syytä huomioida, että vedestä siirtyy lämpöä huoneilmaan haihtumisen lisäksi myös johtumalla ja säteilemällä. Tehtävän ratkaisemiseksi tuli ymmärtää, että lämpö siirtyy kuumemmasta kylmempään.

Ensimmäinen väittämä on ongelmallinen, sillä sen kohdalla on vastausta valittaessa tehtävä päätös, käsitelläänkö haihtumista mikro- vai makrotason ilmiönä. Makrotasolla haihtuminen tarkoittaa veden vähenemistä astiasta ja mikrotasolla molekyylien irtoamista nesteen pinnalta. Tehtävän tilanteessa muodostuu ensin termien tasapaino, minkä jälkeen vettä alkaa haihtua siten, että sen määrän voidaan havaita vähenevän.

Väittämät 2b ja 2c liittyivät molemmat haihtumiseen, joka ei ollut käsitteenä tarkastelun kohteena tässä tutkimuksessa. Haihtuminen liittyy kuitenkin erittäin keskeisesti tasapainotilan muodostumiseen, minkä vuoksi se on ymmärrettävä ennen kuin on mahdollista ymmärtää kemiallisen tasapainon muodostuminen tämän esimerkin tapauksessa. Haihtumista käsittelevien väittämien avulla oli tavoitteena saada tietoa siitä, ovatko haihtumiseen liittyvät käsitykset vaikuttaneet tasapainotilan käsitteen ymmärtämiseen. Väittämässä 2b opiskelijan oli ymmärrettävä haihtumisen käsite mikrotasolla eli että molekyylillä tulee olla riittävästi liike-energiaa, jotta se voi irrota muiden molekyylien vuorovaikutuskentästä. Systemi oli eristetty ja vesi lämpimämpää kuin ilma, jolloin haihtumiseen tarvittava energia on veden lämpöenergia eli vesi luovuttaa haihduttamalla lämpöä huoneilmaan.

Väittäjä c testasi oppilaiden kykyä ymmärtää, että haihtumista tapahtuu kaikissa lämpötiloissa. Oppikirja-analyysin valossa tarkasteltuna väittäjä on mielenkiintoinen, sillä Fysiikka-kirjassa mainitaan, että haihtumista tapahtuu myös kiehumispistettä alhaisemmissa lämpötiloissa mutta Physica kirjassa tätä asiaa ei mainita. Tämän väittäjän kohdalla voi päätyä oikeaan vastaukseen ilman oppikirjaakin arkikokemuksen perusteella.

Kemiallisen tasapainon muodostumista käsitellään molemmissa oppikirjoissa ja sen ymmärtämistä testataan väittäjän d avulla. Tehtävässä kuvatussa tilanteen kohdalla tulee ymmärtää, että kemiallisen tasapainon muodostumiseen kuluu aikaa, minkä jälkeen haihtumisen ja tiivistymisen tapahtuvat yhtä nopeasti.

5.5 Tehtävä 3: Energia

Tehtävänanto oli täsmälleen Physica-kirjassa esiintyvän kuvan kaltainen mutta oppilaskyselyssä tilanne kuvattiin sanallisesti. Systemi koostui kahdesta eri lämpötilassa olevasta tiilestä, jotka olivat lämpöeristetyssä astian sisällä. Tehtävän tavoitteena oli tutkia opiskelijoiden käsityksiä sisäenergiasta ja ensimmäisestä pääsäännöstä, joihin molempiin on todettu liittyvän virhekäsityksiä useiden tutkimusten perusteella. Tehtävän ymmärtämiseen liittyi keskeisesti myös lämpötilaerojen ta-soittuminen, joka sisältää myös paljon virhekäsityksiä.

Ensimmäisen pääsäännön eli energian säilymisen havaitseminen on arkikokemuksen perusteella vaikeaa dissipaation vuoksi.[31] Tästä syystä opiskelijat hylkäävät helposti energian säilymisen. Saksassa 15–16-vuotiaille suoritetun tutkimuksen perusteella vain 9 % oppilaista ymmärsi energian olevan jotain, joka ei häviä.[5] Energian säilymisestä puhutaan paljon eri yhteyksissä, mutta se on valitettavan usein vain ulkoa opeteltu lause vailla syvällisempää ymmärrystä.[5] Käsitteen heikko ymmärrys tulee esille sovellettaessa sitä. Opiskelijoilla on yliopistotasolla heikot valmiudet soveltaa ensimmäistä pääsääntöä, minkä vuoksi sen opetuksen kehittämiseen on syytä paneutua huolellisesti.[2] Ongelmat johtuvat osittain siitä, että lämmöllä, työllä ja sisäenergialla on kaikilla sama yksikkö, minkä vuoksi niiden erottaminen toisistaan on hankalaa.[20] Opiskelijoilla on myös vaikeuksia siirtää työn käsite mekaniikasta lämpöopin yhteyteen ja ymmärtää, että työ voi muuttaa systeemin sisäenergiaa.[2, 20]

Kahden kappaleen ollessa termisessä kontaktissa opiskelijoiden on hankala ymmärtää, mikä prosessissa tasoittuu: lämpö, lämpötila vai energia.[5] Pudotettaessa kuuma metallikappale kylmään veteen oppilaille on selvää, että lämpötilat pyrkivät tasoittumaan. 13–16-vuotiaille suoritetun tutkimuksen mukaan heille ei kuitenkaan ole lainkaan selvää, että vesi ja metallikappale saavuttavat yhteisen loppulämpötilan eli termisen tasapainon muodostumista ei ymmärretä oikein. Tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että oppilaat antoivat ympäristölle merkittävän roolin prosessissa, minkä vuoksi on mielenkiintoista tutkia, saadaanko oppilaskyselyssä samansuuntaisia tuloksia, vaikka kyseessä oleva systeemi oli eristetty. Osa tutkimukseen osallistuneista oppilaista ei käsitellyt tilannetta vuorovaikutusprosessina vaan ymmärsi, että kappale voi jäähtyä itsestään spontaanisti. Väittämällä 3d oli tarkoitus testata tämän virhekäsityksen yleisyys. Tässä kuvitteellisessa ja virheellisessä tilanteessa molempien tiilien sisäenergia pienenisi ja väittämä olisi oikein. Toinen mielenkiintoinen havainto on, että osa oppilaista uskoo kappaleiden lämpötilojen muuttuvan termisen tasapainon saavuttamisen jälkeen itsestään lämmön kuvitteellisen inertian vuoksi.[6]

Tehtävän 3 ratkaisemiseksi tuli ymmärtää, että eristetty systeemi ei ole vuorovaikutuksessa ympäristönsä kanssa, lämpö energiamuotona ja lisäksi lämpötilaerojen tasoittuminen, jota käsitellään seuraavaksi. Tehtävässä esiintyneistä väittämistä vain yksi oli oikein. Ensimmäinen väittämä oli pelkästään ensimmäisen pääsäännön valossa tarkasteltuna varsin petollinen, sillä systeemi oli eristetty ja tällöin voisi huolimattomasti ajateltuna kuvitella väittämän olevan oikein. Tehtävässä tuli kuitenkin ottaa huomioon, että koko systeemin sisäenergian pysyminen vakiona ensimmäisen pääsäännön mukaisesti ei estä yksittäisen tiilen eli osasysteemin sisäenergian muutosta. Tiilien välille pyrkii muodostumaan terminen tasapaino. Toinen tiilistä luovuttaa lämpöä ja toinen vastaanottaa. Prosessissa ei tehdä työtä, joten tiilien sisäenergia muuttuu ainoastaan luovutetun tai vastaanotetun lämmön verran. Valinta väittämien 1b ja 1c välillä vaati tiedon siitä, että lämpö siirtyy itsestään kuumemmasta kylmempään, jolloin on selvää, että kuumempi tiili luovuttaa lämpöä kylmemmälle. Kun kylmempi tiili vastaanottaa lämpöä sen sisäenergia kasvaa ensimmäisen pääsäännön mukaisesti eli väittämä 1b oli oikein.

5.6 Tehtävä 4: Entropia

Kyselyn neljäs tehtävä keskittyi entropian ja toisen pääsäännön tutkimiseen. Tutkimusten mukaan opiskelijoilla on vähän tai ei lainkaan käsitystä entropiasta ja lukioikäiset ovat harvoin oppineet toisen pääsäännön perusideaa, vaikka se on yhtä tärkeä kuin ensimmäinen pääsääntö, johon kiinnitetään opetuksessa paljon huomiota tutkittaessa termodynaamisia prosesseja.[5, 7] Toisen pääsäännön merkitys korostuu energia-käsitteen ja energian säilymisen ymmärtämisessä. Arkipäiväisissä ilmiöissä energia ei näytä säilyvän energian huononemisen vuoksi, jolloin opiskelija hylkää energian säilymisen.[6] Toisen pääsäännön ymmärtäminen yhdessä energian säilymisen kanssa auttaa opiskelijaa energia-käsitteen ymmärtämisessä ja siihen liittyvien virhekäsitysten välttämässä.[5]

Kansainväliset tutkimustulokset opiskelijoiden käsityksistä entropiasta ja toisesta pääsäännöstä ovat toimineet perustana myös oppilaskyselyn neljännen tehtävän muotoilulle. 15–16-vuotiaille suoritetun tutkimuksen mukaan virhekäsitys siitä, että energia kuluu prosesseissa loppuun, on hyvin yleinen. Suurimmalle osalle opiskelijoista on selvää, että esimerkiksi heiluri ei lähde itsestään liikkeelle ympäristöä viilentäen, mutta perustelut ovat erilaiset kuin fyysikolla. Tutkimukseen osallistuneiden opiskelijoiden mukaan perusteluksi riittää, että mitään sellaista ei ole koskaan tapahtunut ja prosessit etenevät tiettyyn suuntaan, koska se on luonnollista. Opiskelijoiden käsitykset prosessien suunnasta perustuvat arkielämän havaintoihin koulussa esiteltyjen teorioiden sijaan.[6] Irreversiibelin prosessin täsmällinen ymmärtäminen vaatii energian ja sen muodosta toiseen muuttumisen syvällistä ymmärtämistä, mikä jää useimmilta lukioikäisiltä saavuttamatta.[5]

Tehtävässä käytettiin samaa tehtävänantoa kuin kolmannessa tehtävässä, jotta tilanne olisi opiskelijoille aiemmin tuttu eikä vastatessa kuluisi aikaa uuden koeasetelman pohtimiseen. Tehtävän 3 kaltainen asetelma toimisi hyvin myös oppilastyönä toista pääsääntöä opiskeltaessa.[5] Tehtävän ensimmäisessä eli A-osassa tutkittiin oppilaiden käsityksiä toisesta pääsäännöstä. Oikean vastausvaihtoehdon valintaan tarvittiin tieto kokonaisentropian kasvamisesta spontaaneissa prosesseissa. Vastausvaihtoehdon c avulla pyrittiin selvittämään, onko opiskelijoilla taipumusta ajatella, että eristetyn systeemin entropia säilyy vakiona energian tapan. Aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että opiskelijat sotkevat entropian ja liikeenergian keskenään.[7]

B-osassa selvitettiin opiskelijoiden päättelykykyä ja käsityksiä entropiasta käyttämällä lukion oppimäärän ylittävää osasysteemin entropian käsitettä. Tehtävään vastaaminen edellytti tietoa entropiasta ja epäjärjestyksen kasvusta lämpötilan noustessa. Samalla B-osassa testattiin toista pääsääntöä, sillä oikeaan vastausvaihtoehtoon päätymiseen tarvittiin tieto siitä, että lämpö siirtyy kuumemmasta kylmempään. Jos tehtävän A-osassa oli päätynyt oikeaan vaihtoehtoon, B-osan vastausvaihtoehto d oli tällöin mahdoton. Tilanteen täsmällinen päättely vaatii osasysteemien tarkastelua. Osasysteemejä ovat kuuma ja kylmä tiili. Kuumempi tiili luovuttaa lämpöä kylmemmälle tiilelle, jonka lämpötila nousee. Lämpötilan noustessa systeemin epäjärjestys ja entropia kasvavat. Oikea vastausvaihtoehto oli siis a.

6 Tulokset

6.1 Toteuttaminen

Tutkimus toteutettiin oppilaskyselyinä viidessä Suomen lukiossa tammi-helmikuun aikana vuonna 2009. Kyselyn yhteydessä kerättiin materiaalia kahteen erilliseen oppinnäytetyöhön, minkä vuoksi kysely oli kaksiosainen. Kyselyyn osallistuvat lukiot olivat erikokoisia ja eri puolilta Suomea, jolloin saatiin hyvä ja monipuolinen kuva lukiolaisten käsityksistä. Oppilaskyselyyn osallistui seitsemän opetusryhmää ja kaikkiaan 144 opiskelijaa, joista 80 oli poikia ja 64 tyttöjä. Kysely toteutettiin Fysiikka 2 -kurssin, joka on fysiikan ensimmäisen syventävä kurssi, lopussa oppitunnin aikana. Vastausaikaa ei rajoitettu vaan opettajat saivat itse päättää, kuinka paljon oppitunnista käytetään kyselyyn vastaamiseen.

Oppilaskyselyn pisteet laskettiin siten, että oikeasta vastauksesta sai yhden pisteen. Tehtävissä 1 ja 2 opiskelija sai pisteen, kun hän oli ympyröinyt oikean väittämän tai jättänyt väärän väittämän ympyröimättä. Mikäli henkilö vastasi oikein kaikkiin neljään väittämään, hän sai tehtävästä neljä pistettä. Väittämää 1b ei otettu mukaan pistelaskentaan sen luonteen vuoksi eli tällöin ensimmäisestä tehtävästä sai maksimissaan kolme pistettä. Tehtävissä 3 ja 4, joissa oli vain yksi oikea vaihtoehto, pisteet laskettiin samalla tavalla kuin kahdessa ensimmäisessä tehtävässä eli henkilö sai pisteen, mikäli hän oli valinnut oikean vaihtoehdon ja lisäksi yhden pisteen jokaisesta virheellisestä vaihtoehdosta, jonka hän oli jättänyt valitsematta. Tällöin neljästä vastausvaihtoehdosta koostuvan monivalintatehtävän maksimipistemäärä oli neljä pistettä. Oppilaskyselyn maksimipistemäärä oli tällöin 18 pistettä.

6.2 t-testi

Tulosten analysointiin käytettiin tilastollisia testejä, jotka suoritettiin Excel-ohjelmaa käyttämällä. Tilastollisessa testauksessa tehdään nollahypoteesi, joka jää voimaan tai hylätään testin perusteella. Verrattaessa kahden toisistaan riippumattoman ryhmän keskiarvoja toisiinsa nollahypoteesi on, että ryhmien keskiarvot ovat samat.

Kahden ryhmän välisten keskiarvojen vertailuun käytettiin t-testiä, jonka avulla saadaan selvitettyä, poikkeavatko kahden riippumattoman ryhmän keskiarvot toi-

sistaan vai johtuuko ero satunnaisvaihtelusta.[32] Testin tuloksia tulkittaessa on huomioitava, että se kertoo ainoastaan, onko keskiarvojen välillä ero, mutta se ei kerro, mistä ero aiheutuu. Tällaisen tilastollisen testin avulla voidaan esimerkiksi selvittää, onko eri oppikirjaa käyttäneiden ryhmien keskiarvoissa eroa. Analysoinnissa käytettiin kaksisuuntaista t-testiä, sillä ryhmien keskiarvojen keskinäisistä suuruuksista ei ollut tietoa. Tämä tarkoittaa sitä, että ennen testin suorittamista ei voida tietää, onko esimerkiksi Physica-kirjaa käyttäneiden opiskelijoiden keskiarvo jossain tehtävässä korkeampi kuin Fysiikka-kirjaa käyttäneiden tai päinvastoin.[33]

Ennen t-testin suorittamista oli selvitetävä, ovatko kahden ryhmän varianssit eli keskihajonnan neliöt yhtä suuret, sillä tämä vaikuttaa sopivan t-testin valintaan. Varianssien testaus tehtiin F-testillä, jossa otokselle laskettiin F-testiarvo, jota verrattiin F-jakaumasta saatavaan raja-arvoon. Jos varianssit olivat yhtä suuret, käytettiin yhtä suurten varianssien t-testiä ja muussa tapauksessa eri suurten varianssien t-testiä.

Oletuksena t-testille on, että muuttuja noudattaa normaalijakaumaa ja on välimatka-asteikollinen.[32] Testi suoritetaan laskemalla t-arvo, jota verrataan t-jakaumasta määräytyvään merkitsevyystasosta p riippuvaan raja-arvoon. Merkitsevyystaso tässä tutkimuksessa oli 0,05, mikä tarkoittaa sitä, että hylättäessä nollahypoteesi tehdään virhe 5 %:n varmuudella.[32] Havaittu merkitsevyystaso eli p -arvo ilmoittaa, kuinka suurella todennäköisyydellä ryhmien välinen ero on aiheutunut sattumalta. Jos p -arvo on esimerkiksi 0,067, ryhmien välinen ero on tilastollisesti merkitsevä 6,7 %:n riskitasolla. Mikäli p -arvo on pienempi kuin 0,05, ero ryhmien välillä on tilastollisesti merkitsevä.

6.3 Konsentraatiotesti

Yhden oikean vaihtoehdon sisältäneiden monivalintatehtävien (tehtävät 3 ja 4) analysointiin käytettiin Yhdysvalloissa kehitettyä konsentraatiotestiä. Analyysi esittää monivalintatestin vastausjakauman tiedot muodossa, jonka avulla on helppompi havainnoida laajempia kokonaisuuksia kuin pelkkiä prosenttiosuuksia tarkastelemalla.[34] Konsentraatioanalyysin avulla on mahdollista tarkastella opiskelijoiden vastausten jakaumaa ja selvittää tällä tavoin heidän virhekkäisyyksiään. Jos opiskelijoilla on tiettyjä käsityksiä, vastausten tulisi olla jakautunut näitä käsityksiä tukeviin vaihtoehtoihin, jolloin jakaumaan muodostuu piikkejä. Mikäli opiske-

lijoilla ei ole selkeitä käsityksiä tai niitä on useita, vastaukset ovat jakautuneet satunnaisesti eri vaihtoehtojen välille ja jakauma on tasainen. Menetelmää on käytetty mm. FCI-testin (Force Concept Inventory) tulosten analysoinnissa.[35]

Käsitellään esimerkkinä tilannetta, jossa 100 opiskelijaa on vastannut viidestä eri vaihtoehdosta koostuvaan monivalintatehtävään. Taulukossa 2 on esitetty kolme vaihtoehtoista tapaa vastauksien jakautumiselle. Tyypin I kohdalla vastaukset ovat jakautuneet tasaisesti kaikkien vaihtoehtojen kesken kuin satunnaisesti arvaamalla. Tyypin II jakauma on tyypillisempi monivalintatehtävän vastausjakauma, jossa muutamaa vaihtoehtoa on valittu selvästi enemmän ja muita vaihtoehtoja tasaisesti. Tyypissä III kaikki opiskelijat ovat valinneet saman vaihtoehdon. Määrittelemme konsentraatiotekijän C , jonka arvot ovat välillä $[0, 1]$. Suuremmat arvot kuvaavat tyypin III tilannetta ja pienemmät arvot vuorostaan tyypin I tilannetta.

Taulukko 2: Kolme vaihtoehtoista vastausjakaumaa monivalintatehtävään, jossa on viisi vastausvaihtoehtoa ja 100 opiskelijaa.

Tyyppi	A	B	C	D	E
I	20	20	20	20	20
II	50	10	30	5	5
III	100	0	0	0	0

Seuraavaksi käsitellään lyhyesti kuinka konsentraatioanalyysi tehdään. Monivalintatehtävässä on m -kappaletta vastausvaihtoehtoja, joista yksi on oikein. Tehtävään vastaa yhteensä N opiskelijaa. Yksittäisen opiskelijan vastaus voidaan esittää m -ulotteisena vektorina

$$\vec{r}_k = (y_{k1}, \dots, y_{ki}, \dots, y_{km}), \quad (17)$$

missä $k = 1, \dots, N$ esittää eri opiskelijoita ja $y_{ki} = 0$, jos vaihtoehtoa ei ole valittu ja vastaavasti $y_{ki} = 1$, jos vaihtoehto on valittu.

Summaamalla yksittäisten opiskelijoiden vastausvektorit saadaan kokonaisvastausvektori

$$\vec{r} = \sum_{k=1}^N \vec{r}_k = (n_1, \dots, n_i, \dots, n_m), \quad (18)$$

missä n_i on kyseisen vaihtoehdon valinneiden opiskelijoiden lukumäärä. Vastausvaihtoehtoja on yhteensä m -kappaletta, joten tulee olla $\sum_i^m n_i = N$.

Kokonaisvastausvektorin pituus antaa tietoa jakauman konsentraatiosta. Tyypin III vastauksessa kokonaisvastausvektorin pituus on N ja tyypin I vastauksessa $\sqrt{\left(\frac{N}{m}\right)^2 m} = \frac{N}{\sqrt{m}}$. Muissa vastaustyypeissä vektorin pituus on näiden arvojen välissä. Kokonaisvastausvektorin skaalattu pituus r_0 määritellään seuraavasti:

$$r_0 = \frac{\sqrt{\sum n_i^2}}{N}, \quad (19)$$

missä $\frac{1}{\sqrt{m}} \leq r_0 \leq 1$. Konsentraatiotekijäksi valitaan normitettu r_0 vähennettynä kokonaisvastausvektorin minimipituudella, jolloin saadaan:

$$C = \frac{\sqrt{m}}{\sqrt{m} - 1} \cdot \left(r_0 - \frac{1}{\sqrt{m}} \right) = \frac{\sqrt{m}}{\sqrt{m} - 1} \cdot \left(\frac{\sqrt{\sum n_i^2}}{N} - \frac{1}{\sqrt{m}} \right). \quad (20)$$

Havaitaan, että lauseke (20) saa arvon 1, jos yksi n_i on N ja muut ovat nollia. Vastaavasti lauseke saa arvon nolla, jos kaikki n_i :t ovat yhtä suuria eli saavat arvon N/m . Muissa tapauksissa C :n arvo on välillä $[0, 1]$. Voidaan myös osoittaa, että C :llä on vain yksi minimi kohdassa, jossa kaikille n_i pätee $n_i = N/m$. [35]

Virheellisten vastausten konsentraatio eli konsentraatiohajonta Γ saadaan vähentämällä yhtälöstä (20) oikeiden vastausten lukumäärä N_s sekä vähentämällä vastausvaihtoehtojen lukumäärä $m - 1$:een. Konsentraatiohajonta on muotoa:

$$C = \frac{\sqrt{m-1}}{\sqrt{m-1}-1} \cdot \left(\frac{\sqrt{\sum n_i^2 - N_s^2}}{N - N_s} - \frac{1}{\sqrt{m-1}} \right). \quad (21)$$

Γ saa kaikki arvot väliltä $[0, 1]$ siten, että pienemmät arvot viittaavat tasaisempaan jakaumaan ja suuremmat arvot piikkiin eli tietyn virheellisen vaihtoehdon suosimiseen.

Yksinkertaisin menetelmä opiskelijoiden vastauksia tulkittaessa on käyttää oikeiden vastausten prosenttiosuutta S sekä konsentraatiotekijää C ja kuvata niiden suuruuksia kaksikirjaimisilla koodeilla. Muuttujille S ja C käytetään kolmitasoista koodausta: L (low) kuvaa matalia, M (medium) keskitasoisia ja H (high) korkeita arvoja. Jos esimerkiksi tehtävän pisteet ovat huonot, mutta konsentraatio suuri, kyseessä on LH-tyypin vastausjakauma. Tarvittaessa vastausjakaumaa voidaan tutkia myös konsentraatiohajonnan avulla. Tiettyä lukuarvoa vastaavat kirjainkoodit on koottu taulukkoon 3. Raja-arvot on määritetty simuloimalla monivalin-

tateestille, jossa $m = 5$, mutta pienillä $m:n$ arvoilla muutokset rajoissa ovat pieniä ja samoja rajoja voidaan käyttää myös tilanteissa $m = 3$ ja $m = 4$.

Taulukko 3: Kolmitasoinen koodausjärjestelmä tehtävän tulokselle, konsentraatiolle ja konsentraatiohajonnalle.

Tulos (S)	Taso	Konsentraatio (C)	Taso	Konsentraatiohajonta (Γ)	Taso
0 - 0,4	L	0 - 0,2	L	0 - 0,2	L
0 - 0,7	M	0,2 - 0,5	M	0,2 - 0,4	M
0,7 - 1,0	H	0,5 - 1,0	H	0,4 - 1,0	H

Jakaumia tutkittaessa havaitaan kolme yleistä tyyppiä. Yhden voimakkaan piikin tilanteessa konsentraatiotekijän arvo on H. Tällöin HH-tyypin vastaus kertoo, että vastaukset ovat selvästi keskittyneet oikeaan vaihtoehtoon eli tehtävä on osattu hyvin. LH-tyypin vastauksessa opiskelijat ovat valinneet runsaasti yhtä väärää vastausvaihtoehtoa, mikä kertoo virhekäsityksen olemassaolosta. Toinen mahdollinen jakauman muoto on kahden piikin tilanne, jolloin konsentraatio saa arvon M. Vastaustyyppi on tällöin LM tai MM. Näissä vastaustyypeissä toinen piikeistä on tavallisesti virheellisessä ja toinen oikeassa vaihtoehdossa. LM vastausvaihtoehdossa molemmat piikit voivat olla myös virheellisen vaihtoehdon kohdalla. Tällöin opiskelijoilla on ainakin kaksi virheellistä käsitystä monivalintatehtävään aiheeseen liittyen. Kolmas vaihtoehto on, että konsentraatio saa arvon L, ja tällöin jakauma on tasainen. Vastaustyyppi on tällöin esimerkiksi LL. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että opiskelijoilla on useita käsityksiä aiheeseen liittyen. Eräs vaihtoehto tasaisen jakauman kohdalla on, että vastaus on valittu arvaamalla, mikä kertoo joko tehtävän huonosta muotoilusta tai siitä, että opiskelijoilla ei ole selkeää käsitystä tehtävän tilanteesta. Taulukkoon 4 on koottu esimerkkejä vastaustyypeistä ja niiden tulkinnasta.

Taulukko 4: Eri vastaustyyppien tulkintaa.

Jakauman muoto	Vastaustyyppiä	Johtopäätös
Yksi piikki	HH	Yksi oikea käsitys
	LH	Yksi voimakas virhekäsitys
Kaksi piikkiä	LM	Kaksi virhekäsitystä (tai oikea ja virh.)
	MM	Oikea ja virheellinen käsitys
Tasainen	LL	Lähes satunnainen tilanne

6.4 Opiskelijoiden motivaatiosta

Kyselyyn osallistuneiden opiskelijoiden motivaatiotasoa luonnontieteiden opiskeluun mitattiin selvittämällä, kuinka monta fysiikan ja kemian kurssia he aikovat suorittaa lukiossa. Tällainen menetelmä ei anna täsmällistä ja luotettavaa kuvaa motivaatiotasosta, mutta se antaa tietoa siitä, kuinka tosissaan opiskelijat aikovat paneutua luonnontieteisiin. Opiskelijoista 70,8 % aikoi suorittaa vähintään 5 fysiikan kurssia ja 43,1 % vähintään 5 fysiikan ja kemian kurssia. Näiden tulosten perusteella voidaan päätellä, että suurin osa kyselyyn vastanneista aikoo paneutua tosissaan fysiikan opintoihin.

Opiskelijoiden mielipiteitä Fysiikka 2 -kurssin eli lämpöopin kurssin vaikeustasosta kartoitettiin viisiportaisen asteikon avulla. Lämpöopin kurssi koettiin haastavana, sillä 75,0 % vastanneista kertoi kurssin olevan vaikea tai melko vaikea ja ainoastaan 21,5 % piti kurssin vaikeustasoa sopivana. Opiskelijat, joiden mukaan kurssi oli melko helppo, eivät menestyneet testissä muita paremmin.

6.5 Yleiskatsaus

Oppilaskyselyn tuloksia tarkastellaan ensin koko testin osalta ja tämän jälkeen tehtäväkohtaisesti. Vastausvaihtoehdon valintaa vastaavat prosenttiluvut on koottu taulukkoon 5 ja tehtäväkohtaiset pistekeskiarvot taulukkoon 6.

Taulukko 5: Oppilaskyselyn vaihtoehtojen vastausprosentit taulukoituna. Oikeat vastausvaihtoehdot on kirjoitettu lihavoidulla fontilla.

Tehtävä	a.	b.	c.	d.
1.	50,7	45,8	47,2	47,9
2.	49,3	74,3	9,0	38,2
3.	12,6	77,6	0,7	9,8
4A.	11,3	25,3	63,4	-
4B.	45,1	8,4	30,3	16,2

Taulukko 6: Tehtäväkohtaiset keskiarvot ja keskihajonnat.

Tehtävä	K-A	σ	Vastanneita	Paras	Heikoin
1.	1,50	1,04	144	3	0
2.	2,53	0,80	144	3	0
3.	3,55	0,84	143	4	2
4A.	1,51	0,87	142	3	1
4B.	2,90	1,00	142	4	2
Koko testi					
	11,90	2,34	144	16	3

Pistemäärien keskiarvoa tarkasteltaessa voidaan havaita, että kyselyn vaikeustaso on ollut sopiva. Kukaan opiskelijoista ei saavuttanut täyttä pistemäärää. Tehtäväkohtaiset erot keskiarvoissa ovat huomattavan suuria. Tarkempien johtopäätösten tekeminen tulosten perusteella vaatii tehtäväkohtaista tarkastelua.

Kyselyn otos jaettiin kurssilla käytetyn oppikirjan mukaisesti kahteen ryhmään, joiden keskiarvoja verrattiin toisiinsa t-testin avulla. Tulokset ovat koottuna taulukkoon 7. Eri oppikirjoja käyttäneiden ryhmien koko testin keskiarvoissa ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa. Tehtäväkohtaisissa keskiarvoissa oli sen sijaan

havaittavissa eroja, joita käsitellään tarkemmin tehtäväkohtaisen analyysin yhteydessä.

Taulukko 7: Tehtäväkohtaiset keskiarvot kurssilla käytetyn oppikirjan mukaan.

Tehtävä	Fysiikka	Physica	p
1.	1,40	1,58	0,303
2.	2,48	2,57	0,498
3.	3,40	3,67	0,057
4A.	1,41	1,59	0,214
4B.	2,94	2,87	0,698
Koko testi			
	11,56	12,18	0,112

6.6 Tehtävä 1: Termospullo

Pistekeskiarvoja tarkasteltaessa ensimmäinen tehtävä meni kyselyn tehtävistä heikoiten, mikä kertoo lämpöopin peruskäsitteiden haastavuudesta. Taulukosta 5 voidaan havaita, että kaikkia väittämiä on valittu tasaisesti. Tuloksia analysoitaessa tulee ottaa huomioon, että pelkkä oikean vaihtoehdon valinneiden lukumäärän tai prosenttiosuuksien tarkastelu ei anna kattavaa kuvaa opiskelijoiden käsityksistä vaan on pohdittava, miksi he ovat päätyneet tiettyyn vastausvaihtoehtoon. Tilanne voi vaikeiden käsitteiden kohdalla olla sellainen, että opiskelija on valinnut oikean vastausvaihtoehdon, mutta hän on käyttänyt päättelyssä virheellisiä käsityksiä.

Väittämä 1a liittyi ensimmäiseen pääsääntöön, mutta tehtävänannossa ei tarkoituksella mainittu sisäenergiaa tai ensimmäistä pääsääntöä. Kyselyyn osallistuneista 50,7 % vastasi oikein tähän väittämään. Toisin sanoen puolet opiskelijoista oli sitä mieltä, että termospullo vaihtaa energiaa ympäristönsä kanssa. Osa vastanneista on varmasti ajatellut, että termospullo ei ole täysin eristetty, minkä vuoksi energiaa voi siirtyä ympäristön ja systeemin välillä. Tämän oppilaskyselyn perusteella ei kuitenkaan ole mahdollista sanoa, kuinka suuri osa vastanneista on käsittänyt termospullon epäideaalisena eristettynä systeeminä. Joukossa on myös opiskelijoita, jotka eivät ole ymmärtäneet sisäenergiaa ja sen säilymistä eristetyssä systeemissä. Tähän palataan tarkemmin tehtävän 3 analysoinnin yhteydessä.

Väittämää 1b ei huomioitu pistelaskussa, sillä siihen ei ollut oikeaa tai väärää vastausta. Tämän väittämän vastausten tulkinnessa on syytä olla varovainen. Jos opiskelija ei ole valinnut 1b väittämää, tämä ei välttämättä tarkoita, että hän käsittelee tasapainotilaa mikrotasolla. Väittämän kohdalla on mahdollista, että opiskelija ei tunnista tasapainotilan käsitettä kunnolla ja jättää tämän vuoksi väittämän valitsematta. Tuloksen perusteella voidaan sen sijaan todeta, että hieman alle puolet vastanneista tietää, että tasapainotilassa ei tapahdu haihtumista tai tiivistymistä.

Otoksesta valittiin kaikki ne opiskelijat, jotka olivat valinneet väittämän 1b, ja tutkittiin t-testin avulla, olivatko he vastanneet muita paremmin myös muihin tasapainotilaa käsitelleisiin väittämiin (2a, 2d). Tässä yhteydessä tasapainotilaa käsittelevillä väittämillä tarkoitettiin sellaisia väittämiä, jotka testasivat ainoastaan tasapainotilan ymmärtämistä. Tämän vuoksi esimerkiksi väittämää 1d ei huomioitu tässä tarkastelussa, koska se käsitteli myös lämpötilaa. Väittämän 1b valinneiden henkilöiden keskiarvo oli väittämän 2a kohdalla 0,58, kun muiden keskiarvo oli vastaavasti 0,42. Keskiarvojen ero oli merkitsevä 7 %:n riskitasolla eli 5 %:n merkitsevyystasolla ero ei ole tilastollisesti merkitsevä.

Väittämän 2d kohdalla tilanne on mielenkiintoinen, sillä väittämän 1b valinneiden ja valitsematta jättäneiden keskiarvojen välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa, minkä perusteella on aiheellista kysyä, ovatko 1b:n valinneet henkilöt ymmärtäneet, miksi tasapainotilassa ei tapahdu tiivistymistä tai haihtumista. Väittämän 1b tulkinnessa tarvittiin tieto siitä, että haihtumista ja tiivistymistä tapahtuu yhtä nopeasti, mikä oli vuorostaan 2d väittämän keskeinen sisältö. Tämän päättelyn perusteella kohdan 1b valinneiden opiskelijoiden olisi tullut valita myös väittämiä 2d, mutta t-testin tulosten perusteella tilanne ei kuitenkaan ollut tällainen. Kyselyyn vastanneista 29,9 % valitsi väittämän 1b mutta ei väittämää 2d, mikä kertoo ristiriitaisuudesta vastausten päättelyssä.

Lämpötilan tilastollista luonnetta käsitellyt väittämiä 1c antoi mielenkiintoisia tuloksia, kun kyselyn otos jaettiin kahteen ryhmään käytetyn oppikirjan mukaan ja väittämän 1c keskiarvoja verrattiin toisiinsa käyttämällä t-testiä. Physicaa käyttäneet opiskelijat valitsivat enemmän tätä väittämää kuin Fysiikka-kirjaa käyttäneet. Ero ei ollut kuitenkaan tilastollisesti merkitsevä p-arvon ollessa 0,12. Tämä tulos on yllättävä, sillä oppikirja-analyysissä havaittiin, että Physicassa annetaan suora

vastaus kyseiseen väittämään. Oppikirjalla ei ole tämän tuloksen perusteella ollut merkittävää vaikutusta lämpötilan tilastollisen luonteen oppimiseen.

Väittämät 1b ja 1c liittyivät molemmat lämpöopin käsitteiden tarkasteluun mikrotasolla, minkä vuoksi on mielekästä tutkia, onko väittämien välillä korrelaatiota. Lähes kolmannes (31,9 %) vastanneista valitsi väittämän c mutta ei b:tä. Vastaa- vasti 30,6 % valitsi väittämän b mutta ei c:tä ja molemmat väittämät valitsi vain 15,3 % vastanneista. Väittämän b valitsematta jättäneet opiskelijat muodostavat mielenkiintoisen ryhmän jatkotutkimusta ajatellen. Tähän ryhmään kuuluu henkilöitä, jotka käsittelevät tasapainotilaa mikrotasolla, mikä on ymmärrettävissä oppikirjoissa esiintyvien kuvien avulla sekä henkilöitä, jotka eivät ymmärrä tasa- painotilan käsitettä lainkaan. Jatkotutkimuksen avulla olisi mahdollista selvittää, kuinka suuri osa lukiolaisista käsittelee kemiallista tasapainoa mikrotasolla.

Väittämän 1d on valinnut hieman alle 50 % vastanneista, mikä sopii yhteen ai- empien kansainvälisten tutkimustulosten kanssa.[5] Kyselyn osallistuneista opis- kelijoista noin puolella on tämän tuloksen perusteella virhekäsitys lämpötilasta lämmön mittana. Otos kyselyssä oli riittävän suuri, jotta sen perusteella voidaan todeta, että suomalaisista lukiolaisista noin 50 % käsittää lämpötilan lämmön mit- tana.

Kyselyn otos jaettiin kahteen ryhmään sen mukaan, oliko molempiin lämpötilaa kä- sitteleviin väittämiin (1c, 1d) vastattu oikein vai ei. Molemmille ryhmille laskettiin koko testin keskiarvot, joiden mahdollisen eron merkitsevyys testattiin t-testillä. Opiskelijoiden, jotka vastasivat oikein molempiin lämpötilaa käsitteleviin väittei- siin, koko kyselyn keskiarvo (13,7) oli parempi kuin muiden (11,1). Ero on huomata- tava ja tilastollisesti merkitsevä alle 0,1 %:n riskitasolla. Lämpötila-käsitteen ym- märtäneet opiskelijat menestyivät muita paremmin 2b ja 2c kohdissa. Tehtävissä 3 ja 4 tämän ryhmän keskiarvo oli muita korkeampi, mutta ero ei ollut tilastollises- ti merkitsevä, mikä on hieman yllättävä tulos, sillä lämpötilan ja lämmön välisen eron ymmärtäminen on keskeistä näiden tehtävien taustalla olevan fysiikan, kuten toisen pääsäännön, oppimisessa [5].

6.7 Tehtävä 2: Vesilasi

Tehtävässä 2 testattiin termodynaamisen tasapainotilan ja siihen liittyvän haih- tumisen ymmärtämistä. Kokonaisuutena tehtävä meni selvästi paremmin kuin en-

simmainen tehtävä, sillä tehtäväkohtaisissa pistekeskiarvoissa oli noin yhden pisteen ero tehtävän 2 hyväksi. Ero selittyy pääosin sillä, että tehtävässä 2 esiintyi osittain olomuodonmuutoksiin liittyviä ilmiöitä, jotka ovat opiskelijoille sekä oppikirjan että arkikokemuksen perusteella tutumpia kuin tehtävässä 1 esiintyneet käsitteet.

Ensimmäinen väittämä oli vaikea, sillä siihen liittyvää teoriaa ei käsitelty kummasakaan oppikirjassa, joten opiskelijat vastasivat siihen ensisijaisesti ennakkokäsitystensä pohjalta. Lähes puolet vastanneista oli valinnut väittämän eli heillä oli käsitys, että termien tasapaino muodostuu ennen kuin neste alkaa haihtua. Tuloksen valossa tasapainotilan muodostumisen ymmärtäminen on lukiolaisille haastavaa. Kokeellisuus saattaisi tarjota uuden ja avartavan mahdollisuuden teoreettisen käsitteen oppimiseen. Termodynaamisen tasapainotilan muodostumisen tutkiminen on mahdollista seuraavan koejärjestelyn avulla. Kokeen toteuttamiseen tarvitaan mahdollisimman tiivis astia tai tila, esimerkiksi tiivistetty vetokaappi, jonka sisällä oleva ilma on mahdollisimman kuivaa. Tämän vuoksi koe kannattaa tehdä pakaspäivänä. Vetokaappiin laitetaan vesilasi, jossa on vettä ja lämpömittari. Ilman kosteutta vetokaappin sisällä tarkkaillaan hiuslankamittarin avulla. Kokeen avulla voidaan seurata lämpötilaerojen tasoittumista eli termisen tasapainon muodostumista sekä haihtumista ja tiivistymistä eli kemiallisen tasapainon muodostumista. Väittämän 2b oli valinnut 74,3 % vastanneista, mikä liittyy todennäköisesti opiskelijoiden arkikokemuksiin siitä, kuinka iholta haihtuva vesi saa aikaan kylmän olon ja veden keittämiseen tarvitaan energiaa. Opiskelijat, jotka vastasivat väärin tähän väittämään, menestyivät muita heikommin koko testissä. Heidän keskiarvonsa oli 10,59 ja muiden 12,35. Ero keskiarvoissa oli merkitsevä 0,08 %:n riskitasolla. Huomionarvoista on, että heidän keskiarvonsa oli muita alhaisempi myös lämpötilaa käsitelleen väittämän 1c kohdalla ja muita korkeampi tasapainotilaan liittyvien väitteiden kohdalla. Lämpötila-käsitteen epäselvyys on ollut todennäköisesti ainakin osittain syynä siihen, miksi osa vastanneista on päätenyt väärän vastaukseen 2b-kohdassa.

Opiskelijoista ainoastaan 9 % valitsi väittämän c eli väitti, että haihtumista ei tapahdu lämpötilan ollessa alle kiehumispisteen. Väittämän valinneet oppilaat menestyivät kyselyssä muita heikommin kaikissa tehtävissä. Suurimmat erot keskiarvoissa väittämän c valinneiden ja muiden opiskelijoiden välillä oli tehtävissä 1 ja 2. Tehtävässä 1 ero oli tilastollisesti merkitsevä 0,60 %:n ja tehtävässä 2 vastaavasti

alle 0,1 %:n riskitasolla. Tehtävissä 3 ja 4 väittämän c valinneiden keskiarvo oli myös heikompi muiden, mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Tämän ryhmän muita heikompi menestyminen kaikissa tehtävissä viittaa siihen, että väittämän c valinneet oppilaat eivät ole motivoituneita fysiikan opiskeluun.

Viimeinen tehtävän väittämistä liittyi tasapainotilan muodostumiseen ja siihen päätyi hieman alle 40 % kyselyyn vastanneista. Pelkkien yksittäisten vastausten prosenttiosuuksien tarkastelu ei tuo tässä vaiheessa riittävästi tietoa, vaan on tutkittava, ovatko opiskelijat vastanneet samaa käsitettä testaaviin väittämiin samalla tavalla. Tehtävässä 2 väittämät a ja d liittyvät tasapainotilan muodostumiseen ja ovat molemmat oikein. Väittämän 2a valinneista opiskelijoista vain 9,7 % valitsi johdonmukaisesti myös väittämän 2d, mikä kertoo siitä, että vain harvalla opiskelijalla on käsitys termodynaamisen tasapainotilan muodostumisesta.

Tarkastellaan seuraavaksi, millaiseen vastausvaihtoehtoon päätyivät ne opiskelijat, jotka eivät vastanneet sekä kohtaan 2a että 2d oikein. Tällöin saadaan mahdollisesti tietoa tekijöistä, jotka ovat vaikuttaneet tietyn vastausvaihtoehdon valintaan. Kyselyyn vastanneista 39,6 % valitsi väittämän a mutta ei d:tä ja vastaavasti 28,5 % valitsi väittämän d mutta ei a:ta. Nämä tulokset paljastavat, kuinka vaikeaa tasapainotilan ymmärtäminen on. Molemmissa oppikirjoissa mainitaan haihtumisen ja tiivistymisen tapahtuvan tasapainotilassa yhtä nopeasti, mutta tästä huolimatta opiskelijoiden on ollut vaikea sisäistää tätä. Sen sijaan oppikirjat eivät käsittele kohdan a väittämää lainkaan, mutta tästä huolimatta siihen on päätynyt lähes puolet vastanneista. Epäjohdonmukainen vastaaminen selittyy sillä, että tasapainotilan käsite on ollut opiskelijoille vieras ja osa on tämän vuoksi arvannut vastauksen.

Termodynaamisen tasapainotilan käsitteen vaikutusta lämpöopin ilmiöiden ymmärtämiseen tutkittiin jakamalla otos kahteen ryhmään sen mukaisesti, oliko tasapainotilaa käsitteleviin väittämiin vastattu oikein vai ei. Kun jaottelu tehtiin niiden väittämien mukaan, jotka testasivat vain tasapainotilan käsitettä (2a, 2d), ei ryhmien välillä ollut tilastollisesti merkitseviä eroja tarkasteltaessa koko testin keskiarvoja. Tulokset muuttuivat merkittävästi, kun jaottelu tehtiin väittämien 1d, 2a ja 2d mukaan, jolloin mukana oli osittain myös lämpötilaan liittyvä väittäminen. Henkilöiden, jotka olivat vastanneet kaikkiin kolmeen väittämään oikein, koko testin keskiarvo oli 13 pistettä, ja muiden keskiarvo oli 11,8 pistettä. Keskiarvojen ero oli tilastollisesti merkitsevä 3,9 %:n riskitasolla. Tämän tuloksen perusteella

ei kuitenkaan voida vielä päätellä, että tasapainotilan käsitteen jollain tasolla ymmärtäneet opiskelijat ymmärtäisivät myös lämpöopin ilmiöitä ja käsitteitä muita paremmin, vaan päättelyn tueksi tarvitaan yksityiskohtaisempaa tarkastelua, joka tehdään seuraavaksi.

Kaikkiin kolmeen väittämään oikein vastanneiden keskiarvo oli tehtävässä 4A lähes pisteen parempi kuin muiden ja keskiarvojen ero oli merkitsevä 4,1 %:n riskitasolla. Tehtävissä 1, 3 ja 4B keskiarvojen ero kahden ryhmän välillä ei ollut puolestaan tilastollisesti merkitsevä. Tehtävä 4A käsitteli toista pääsääntöä, joten tasapainotilan käsitteen voidaan näillä perusteilla todeta edistyneen toisen pääsäännön oppimista.

6.8 Tehtävä 3: Energia

Tehtävä meni kyselyn tehtävistä parhaiten ja oikeaan vaihtoehtoon siinä päätyi 77,6 % vastanneista. Konsentraatio oli korkea (0,52) ja vastaustyyppi HH eli vastaukset ovat selkeästi keskittyneet oikeaan vastausvaihtoehtoon. Yksi opiskelija jätti vastaamatta tehtävään ja toinen valitsi kaksi vastausvaihtoehtoa. Physicaa käyttäneiden keskiarvo oli 3,67 ja Fysiikka-kirjaa käyttäneiden vastaavasti 3,40. Keskiarvojen ero ei ole tilastollisesti merkitsevä kaksisuuntaisen t-testin p-arvon ollessa 0,0575. Johtopäätöksiä keskiarvojen erosta ei kuitenkaan kannata tehdä pelkkään tilastolliseen analyysiin nojautuen. Samalla on syytä huomioida, että p-arvo on melko lähellä 5 %:n merkitsevyystasoa. Tämän vuoksi oppikirjan vaikutusta sisäenergia-käsitteen oppimiseen tutkittiin tarkentavan analyysin avulla. Taulukosta 7 havaitaan, että muissa tehtävissä tilastollisen merkitsevyyden riskitaso on huomattavasti suurempi kuin tehtävässä 3. Tämä antaa tukea päätelmälle, että tehtävän 3 keskiarvojen ero ei ole sattumaa.

Tutkittaessa eri oppikirjaa käyttäneiden opiskelijoiden vastauksia sisäenergiaa testanneeseen väittämään 1a ja tehtävään 3 havaitaan, että Physicaa käyttäneistä opiskelijoista 44,9 % vastasi oikein sekä väittämään 1a että tehtävään 3, kun Fysiikka-kirjaa käyttäneille opiskelijoille vastaava luku oli 32,3 %. Tämä tulos antaa tukea johtopäätökselle, että oppikirjalla on ollut vaikutusta sisäenergia-käsitteen oppimiseen.

Ero tehtävä 3 tuloksissa selittyy oppikirja-analyysin tuloksilla, sillä Physicassa on kuva ja siihen liittyvä selitys tehtävän 3 tilanteesta. Sisäenergian käsite esiteltiin

Physicassa ensimmäisen kerran systeemin yhteydessä, mikä on luontevampi kuin Fysiikka-kirjan tapa lähestyä haastavaa käsitettä. Tulosten perusteella voidaan todeta Physican selkeän kuvan ja luontevan lähestymistavan vaikuttaneen sisäenergian käsitteen oppimiseen.

Tehtävään 3 oikein vastanneet ovat selvästi ymmärtäneet, että systeemin sisäenergia kasvaa, kun siihen tuodaan lämpöä, ja lisäksi lämpövirran suunnan kuumemmasta kylmempään. Mikäli ensimmäistä pääsääntöä käytetään huolimattomasti ja ilman tilanteen tarkempaa ajattelua, tehtävässä päädytään vaihtoehtoon a. Näin teki onneksi vain 12,6 % vastanneista.

Väittämä 1a ja tehtävä 3 liittyivät sisäenergiaan ja lämpöopin ensimmäiseen pääsääntöön. Ensimmäisen tehtävän väittämä testasi sisäenergian ymmärtämistä käsitteenä ja energian säilymistä. Tehtävässä 3 keskityttiin sisäenergian muutokseen ja lämpövirran suuntaan. Tehtävään pystyi vastaamaan ymmärtämättä oikein sisäenergian käsitettä. Huomionarvoista on, että 39,2 % vastasi oikein sekä väittämään 1a että tehtävään 3. Vastanneista 38,5 % puolestaan vastasi oikein tehtävään 3, mutta väärin väittämään 1a, minkä perusteella voidaan todeta, että ensimmäisen pääsäännön ymmärtäminen energian säilymlakina ei ole itsestäänselvä. Opiskelijoista 11,9 % vastasi oikein väittämään 1a, mutta väärin kolmanteen tehtävään. Näiden tulosten perusteella voidaan päätellä, että opiskelijat osaavat vastata johdateltuihin tehtäviin, mutta tilanteessa, jossa sisäenergian käsitettä ei mainita ja vaaditaan energian säilymisen ymmärtämistä, lähes puolelle opiskelijoista tulee vaikeuksia. Yhdysvalloissa suoritettussa tutkimuksessa on havaittu, että noin 80 % yliopiston ensimmäisiä kursseja suorittavista opiskelijoista on kykenemättömiä käyttämään ensimmäistä pääsääntöä vieraassa ympäristössä, ja myös muissa tutkimuksissa on saatu samanlaisia tuloksia, joten tässä yhteydessä tehty havainto on yhdenmukainen muiden tutkimusten kanssa.[1, 2] Tämän vuoksi lukio-opetuksessa olisi tarvetta teoriaosassa tehdylle esitykselle, jossa ensimmäinen pääsääntö ja energian säilyminen kytketään toisiinsa.

6.9 Tehtävä 4: Entropia, osa A

Tehtävien 4A ja 4B konsentraatiotestin tulokset on koottu taulukkoon 8.

Taulukko 8: Tehtävien 4A ja 4B konsentraatiotestin tulokset.

Tehtävä	S	C	Γ	Tyyppi
4A	0,254	0,271	0,530	LM
4B	0,451	0,146	0,157	ML

Tehtävän 4 A-osa oli opiskelijoille varsin ongelmallinen, mikä oli odotettavissa entropia-käsitteen vaikeuden vuoksi. Kaksi opiskelijaa, joista toinen oli sama henkilö kuin kolmannessa tehtävässä, jätti vastaamatta sekä tehtävän A- että B-osaan. Konsentraatiotestin perusteella osaamisen taso oli matala ja vastaukset keskittyneet kahteen vaihtoehtoon eli oikeaan b-vaihtoehtoon ja virheelliseen c-vaihtoehtoon. Konsentraatiohajonta oli korkea, joten opiskelijat ovat suosineet virheellistä c-vastausvaihtoehtoa, johon päätyi 63,4 % vastanneista. Oikean vaihtoehdon valitsi vain noin neljännes vastanneista.

Kyselyyn vastanneista peräti 40,9 % vastasi oikein kolmanteen tehtävään mutta väärin neljännen tehtävän A-osaan. Tehtävänannossa kerrottiin, että systeemi on eristetty ja opiskelijat ovat kolmannen tehtävän perusteella ymmärtäneet hyvin lämpövirran suunnan kuumemmasta kappaleesta kylmempään, joten entropian käsite on ollut selvästi ongelmallinen. Tehtävän heikko osaaminen selittyy näillä perusteilla entropian ja toisen pääsäännön puutteellisella ymmärtämisellä. Kun huomioidaan otoksen koko, voidaan tuloksista päätellä, että lukiolaisilla on virhe-käsitys, jonka mukaan entropia pysyy vakiona spontaaneissa prosesseissa.

6.10 Tehtävä 4B: Entropia, osa B

Neljännen tehtävän B-osassa opiskelijat saivat yllättäen parempia tuloksia kuin A-osassa, vaikka oppikirja-analyysin perusteella tilanteen olettaisi olevan päinvastoin, sillä oppikirjoissa ei puhuta mitään osasysteemin entropiasta. Luonnollisesti oppimiseen vaikuttaa oppikirjan lisäksi monta tekijää, kuten opettaja, mutta kyselyn tulokset olivat tämän tehtävän osalta kaikilla ryhmillä parempia kuin tehtävässä 4A, mikä kertoo siitä, että tuloksen taustalla ei voi olla esimerkiksi yksittäisen

opettajan vaikutus. Tehtäväkohtainen keskiarvo oli 4B-kohdassa lähes kaksinkertainen 4A-kohtaan verrattuna. Oikean vaihtoehdon valitsi 45,1 % eli lähes puolet opiskelijoista. Alhainen konsentraatio kertoo, että vastaukset eivät ole keskittyneet tiettyihin vaihtoehtoihin. Konsentraatiohajonta on myös alhainen eli opiskelijoilla ei ole yhtä selkeää virhekäsitystä osasysteemin entropiaan liittyen. Entropia ja toinen pääsääntö ovat tehtävän 4 tulosten mukaan haastavia käsitteitä, sillä vain 7 % vastasi oikein sekä A- että B-osaan ja 36,6 % vastasi väärin molempiin kohtiin.

Erityisen mielenkiintoista on, että 38 % valitsi väärän vaihtoehdon A-osassa, mutta oikean vaihtoehdon B-osassa. Tämän perusteella kaikki tehtävässä 4B oikean vaihtoehdon valinneet eivät ole vastausta pohtiessaan käyttäneet tietoa kokonaisentropian kasvusta spontaaneissa prosesseissa. Sen sijaan on havaittavissa tehtävän 3 hyödyntäminen vastauksen pohdinnassa eli opiskelijat ovat käyttäneet lämpövirran suuntaa kuumemmasta kylmempään vastausta päätellessään, sillä ainoastaan 8,5 % päätyi tehtävässä 3 väärään ja B-osassa oikeaan vastaukseen. Vastanneista 37,3 % päätyi oikeaan vastaukseen molemmissa tehtävissä. Entropia käsitteen vaikeudesta kertoo se, että 40,9 % valitsi oikean vaihtoehdon tehtävässä 3 mutta virheellisen vaihtoehdon tehtävässä 4B. Vastanneista 18,3 % valitsi oikean vaihtoehdon A-osassa ja väärän vaihtoehdon B-osassa.

B-osan tulosta pohdittiin hieman tarkemmin tutkimalla, onko opiskelijoiden virhekäsitys kokonaisentropian säilymisestä vakiona vaikuttanut heidän vastauksiinsa B-osassa. Otoksesta pudotettiin pois kaikki ne opiskelijat, jotka olivat väittäneet, että kokonaisentropia pysyy vakiona spontaanissa prosessissa. Tämän jälkeen otokselle laskettiin osan 4B keskiarvo, joka oli 2,46. Keskiarvo oli hieman alhaisempi kuin koko otoksen osan 4B keskiarvo 2,90. Opiskelijoiden, jotka väittivät A-osassa kokonaisentropian pysyvän vakiona, B-osan keskiarvo oli 3,16 ja muiden vastaava keskiarvo oli 2,46. Kaksisuuntaisen t-testin p-arvo oli $4 \cdot 10^{-5}$, joten keskiarvojen ero oli tilastollisesti merkitsevä. Näiden tulosten perusteella voidaan sanoa, että opiskelijat ovat käyttäneet virheellistä käsitystä kokonaisentropian säilymisestä pohtiessaan B-kohdan vastausta. Tässä yhteydessä olisi ollut mielenkiintoista kysyä opiskelijoilta, mitä tapahtuu kuumemman tiilen entropialle tai vaihtoehtoisesti asettaa väittämä, jonka mukaan kuumemman tiilen entropia pienenee yhtä paljon kuin kylmemmän tiilen entropia kasvaa. Tällaisten väittämien avulla olisi mahdollista selvittää hieman tarkemmin opiskelijoiden käsityksiä kokonaisentropian muutoksesta spontaanissa prosessissa.

Taulukko 9: Tehtävien 4A ja 4B vastausten jakautuminen prosentteina.

Tehtävä 4	Ba	Bb	Bc	Bd
Aa	1,4	2,1	0,7	7,0
Ab	7,0	0,7	16,9	0,7
Ac	36,6	5,6	12,7	8,5

Taulukkoa 9 tutkimalla voidaan esittää muutamia ajatusmalleja, joita opiskelijat ovat käyttäneet pohtiessaan B-osan vastausta. Tehtävän A-osassa väittämän a valinneet opiskelijat valitsivat B-osassa eniten vaihtoehtoa d, mikä on johdonmukaista, sillä molemmissa väittämissä entropia pienenee. Vastaus ei ole kuitenkaan millään tavalla fysikaalinen. Sen sijaan A-osassa oikeaan vaihtoehtoon päätyneistä opiskelijoista 66,7 % päätyi B-osassa väittämään c, jonka mukaan molempien tielten entropia kasvaa. Tässäkin tilanteessa vastaus on looginen, sillä molemmissa väittämissä entropia kasvaa. Suurin osa, hieman alle 40 % vastanneista, päätyi A-osassa väittämään c eli kokonaisentropia pysyy samana ja B-osassa väittämään a eli kylmemmän tiilen entropia kasvaa. Vastanneista 12,7 % päätyi sekä A- että B-osassa vastausvaihtoehtoon c, mikä on hieman ristiriitainen vastaus. Tällöin kokonaisentropia pysyisi samana, mutta molempien tielten entropia kasvaisi. Tällä tavalla vastanneet henkilöt eivät ole hahmottaneet osasysteemin käsitettä.

7 Johtopäätökset

Tässä tutkielmassa selvitettiin lukiolaisten käsityksiä termodynaamisesta tasapainotilasta sekä lämpöopin ensimmäisestä ja toisesta pääsäännöstä. Tutkimuksen tuloksena havaittiin, että vain pieni osa lukiolaisista ymmärtää lämpöopin peruskäsitteet ja kykenee käyttämään niitä oppikirjasta irrallisessa ympäristössä.

Oppikirja-analyysin ja oppilaskyselyn avulla suoritetun tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että termodynaaminen tasapainotila on opiskelijoille vieras käsite, sillä ainoastaan kymmenesosa vastasi oikein molempiin tasapainotilaa käsitteisiin kysymyksiin. Käsitteen puutteellinen ymmärtäminen ilmeni vastausten sisältämistä epäloogisuuksista. Tasapainotilan heikko ymmärtäminen liittyy osittain siihen, että sitä käsitellään oppikirjoissa vähän. Oppikirjalla ei ollut merkittävää vaikutusta tasapainotilan oppimiseen. Oppimateriaalin kehittäminen tasapainon käsitteen osalta on tarpeellista, sillä käsitteen osaaminen vaikutti myönteisesti haasteelliseksi havaitun toisen pääsäännön oppimiseen.

Opiskelijoista 77,6 % ymmärsi systeemin sisäenergian kasvavan, kun siihen tuodaan lämpöä ja 39,2 % ymmärsi eristetyn systeemin energian säilymisen eli lämpöopin ensimmäisen pääsäännön idean. Sisäenergia-käsitteen kohdalla oppikirjalla oli yhteys oppimiseen, sillä Physica-kirjaa käyttäneet opiskelijat menestyivät kyselyssä muita paremmin tätä käsitettä testanneessa tehtävässä. Vaikean käsitteen oppimista auttoivat Physicassa esiintyneen havainnollisen kuvan ja täsmällisen selityksen lisäksi se, että sisäenergia esiintyi Physicassa aiemmin kuin Fysiikka-kirjassa. Tulosten perusteella sisäenergian käsittely kannattaa tehdä jo lämpöopin kurssin alkuvaiheessa.

Tutkittaessa lukiolaisten käsityksiä entropiasta ja lämpöopin toisesta pääsäännöstä havaittiin yleinen virhekäsitys kokonaisentropian säilymisestä vakiona spontaanissa prosessissa. Tällä tavoin vastasi 63,4 % opiskelijoista. Osasysteemin entropiaa käsitteeseen tehtävään vastasi sen sijaan oikein 45,1 % opiskelijoista. Opiskelijat käyttivät virheellistä käsitystä kokonaisentropian säilymisestä vakiona päätellessään osasysteemin entropian muutosta.

Tämän tutkimuksen tulosten mukaan on vahvat perusteet päätellä, että opiskelijat käsittelevät entropiaa energian kaltaisena säilyvänä suureena. Virhekäsityksen varmistamiseksi vaaditaan kuitenkin tarkentavaa tutkimusta, jonka yhteydessä selvitetäisiin, kuinka moni opiskelija ajattelee, että kuumemman kappaleen entropia

pienenee yhtä paljon kuin kylmemmän kasvaa. Tutkimustyötä entropia-käsitteen osalta on syytä jatkaa, sillä entropian ymmärtäminen auttaa energia-käsitteen ja toisen pääsäännön oppimisessa. Entropia-käsitteen kohdalla olisi mahdollisesti järkevää luoda yhteys kemiaan, jossa ilmiöitä käsitellään mikrotasolla aiemmin kuin fysiikan yhteydessä.

Viitteet

- [1] M. E. Loverude, C. H. Kautz, P. R. L. Heron, *American Journal of Physics* Vol. 70 No. 2, Pages 137-148, February 2002
- [2] D. E. Meltzer, *American Physical Society Forum on Education Newsletter*, Spring 2005, Pages 4-5
- [3] R.D. Knight, *Five Easy Lessons, Strategies for Successful Physics Teaching*, Pearson Education, 2004
- [4] K. Kurki-Suonio, R. Kurki-Suonio, *Fysiikan merkitykset ja rakenteet*, Limes, Helsinki, 1994
- [5] S. Kesidou, R. Duit, *Journal of Research in Science Teaching* Vol. 30 No. 1, Pages 85-106, January 1993
- [6] S. Kesidou, R. Duit, *Research in science education* Vol. 18 No. 1, Pages 186-195, December 1988
- [7] A. H. Johnstone, J. J. Macdonald, G. Webb, *Physics Education* Vol. 12 No. 4, Pages 248-251, May 1977
- [8] S. Hemilä, J. Utriainen, *Lämpöoppi*, Jyväskylä, 1989
- [9] P. Atkins, J. D. Paula, *Atkins' Physical Chemistry*, 8 th Edition, Oxford University Press, 2006
- [10] R. Bowley, M. Sánchez, *Introductory Statistical Mechanics*, Oxford Science Publication, Second Edition 1999
- [11] J. Arponen, *Statistinen fysiikka*, Limes ry, Helsinki, 1994
- [12] R. D. Knight, *Physics for Scientists and Engineers*, Second Edition, Pearson Education, 2008
- [13] Toim. J. Kari, *Didaktiikka ja opetussuunnittelu*, WSOY, Juva, 1994
- [14] P. Atjonen, K. Uusikylä, *Didaktiikan perusteet*, WSOY, Juva, 2000
- [15] Opetushallitus, *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2003*, Vammala, 2003

- [16] J. Kari, *Oppimateriaalitutkimuksen teoreettisia lähtökohtia*, Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä, 1987
- [17] P. Kansanen, K. Uusikylä, Opetussuunnitelman toteutuminen: oppilaiden tyytyväisyys oppiaineisiin, opetusmuotoihin ja kouluelämään peruskoulun alasteella, Helsingin yliopisto, 1988
- [18] H. Lehto, T. Luoma, R. Havukainen, J. Leskinen, *Fysiikka 2*, Tammi, Jyväskylä, 2005
- [19] J. Hatakka, H. Saari, J. Sirviö, J. Viiri, S. Yrjänäinen, *Physica 2*, WSOY, Porvoo, 2005
- [20] D. E. Meltzer, American Journal of Physics Vol. 72 No. 11, Pages 1432-1446 November 2004
- [21] M. Rahkonen, Lämpöopin tietorakenteet perusopetuksessa, LuK-tutkielma, Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos, Maaliskuu 2008
- [22] J. Lakanen, Mikrotason kuvailu lukion lämpöopin opetuksessa, Pro gradu, Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos, Helmikuu 2007
- [23] R. W. Schwenz, P. L. Thomas, Journal of Research in Science Teaching Vol. 35 No. 10, Pages 1151-1160, December 1998
- [24] M. F. Thomaz et al., Physics Education Vol. 30 No. 1 Pages 19-26, January 1995
- [25] V. Bar, A. Travis, Journal of Research in Science Teaching, Vol. 28 No. 4, Pages 363-382, April 1991
- [26] Student Preconceptions and Misconceptions in Chemistry, Integrated Physics and Chemistry Modelling Workshop, Arizona State University, June 2001
- [27] E. L. Lewis, M. C. Linn, Journal of Research in Science Teaching Vol. 31 No. 6, Pages 657-677, August 1994
- [28] M. C. Linn, N. B. Songer, Journal of Research in Science Teaching Vol. 28 No. 10, Pages 885-918, December 1991

- [29] R. L. Miller, B. M. Olds, R. A. Streveler, *Using a Delphi Study to Identify the Most Difficult Concepts for Students to Master in Thermal and Transport Science*, University of Colorado
- [30] L. Viennot, *Experimental Facts and Ways of Reasoning in Thermodynamics: Learners' Common Approach*, I.C.P.E Book 1998
- [31] M. Coddington, T. R. Schultz, *Journal of Experimental Child Psychology* Vol. 21 No. 1, Pages 131-153, February 1981
- [32] S. Siegel, *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*, Mc Graw-Hill, Tokyo, 1956
- [33] M. R. Spiegel, L. Stephens, *Schaum's Outline of Theory and Problems of Statistics* McGraw-Hill Companies, New York, 1998
- [34] L. Bao, *Dynamics of Student Modeling: A Theory, Algorithms and Application to Quantum Mechanics*, Ph.D. Dissertation, University of Maryland, 1999
- [35] L. Bao, E. F. Redish, *American Journal of Physics* Vol. 69 No. 7, S45-S53, July 2001

Liitteet

Liite 1: Tehtävänälyysi

Tehtävänälyysin arviointiperusteet:

Tyyppi:	kvantitatiivinen - kvalitatiivinen
Kuvaus:	fysikaalinen - matemaattinen
Tilanne:	luonnollinen - keinotekoinen
Rajaus:	suljettu - avoin
Määrittely:	reaalinen - ideaalinen
Kytkenä aiheeseen:	ei-kytkentää (E), osittainen (O), täydellinen (T)

Tehtävät on arvioitu asteikolla 0–1.

0 tarkoittaa vasemmanpuoleista ja 1 oikeanpuoleista vaihtoehtoa. Esimerkiksi tehtävän tyyppin kohdalla numero 0 tarkoittaa, että tehtävässä pyydetään oppilaalta pelkkä numeroarvo eli kyseessä on laskutehtävä. Vastaavasti numero 1 tarkoittaa, että tehtävässä pyydetään selittämään jokin fysikaalinen ilmiö. Jos tehtävässä halutaan numeroarvon lisäksi hieman selitystä, tyyppiä vastaa tällöin numero välillä 0,1 - 0,5. Vastaavasti numero välillä 0,5 - 0,9 tarkoittaa, että tehtävän painoarvo on ilmiön fysikaalisessa selittämisessä, mutta sen lisäksi halutaan jokin numeroarvo.

Jos kirjassa on ollut useita samanlaisia tehtäviä, niiden kappalemäärä on merkitty Huom-sarakkeeseen.

Taulukko 10: Tehtäväänalyysi Fysiikka luku 1: *Energia*. (P & e = *Pohdi ja etsi*-osio)

Tyyppi	Kuvaus	Tilanne	Rajaus	Määrittely	Kytkentä	Huom.
1	0	0	1	0	T	P & e
1	0	0	0	0	T	P & e
1	0	0	1	0	O	P & e
0,2	0	0	0	0	O	P & e
0,5	0,5	0,2	0	0,2	T	
0,5	0,5	0	0	0	T	
0,2	0	0	0	0	T	
1	0	0,2	0	0,8	T	P & e
0	0,8	0,2	0	0	T	
0	0,8	0	0	0	T	
0	0,5	0	0	0	T	3 kpl

Taulukko 11: Tehtäväänalyysi Fysiikka luku 2: *Lämpötila ja paine*.

Tyyppi	Kuvaus	Tilanne	Rajaus	Määrittely	Kytkentä	Huom.
1	0	0	0	0	T	P & e
1	0	0	0,8	0	T	P & e
1	0	0,2	0,2	0	T	P & e
0,1	0,5	0	0	0	O	P & e
0	0	0	0	0	O	P & e
0	0,8	0	0	0	O	3 kpl
0	1	0,2	0	0	O	
1	0	0	1	0	O	

Taulukko 12: Tehtävänälyysi Fysiikka luku 5: *Lämpö on energiaa.*

Tyyppi	Kuvaus	Tilanne	Rajaus	Määr.	KytKentä	Huom.
0,8	0	0	0,8	0	T	
1	0	0	1	0	T	7 kpl
0,5	0	0	0	0	O	
0	0	0	0	0	T	
0,2	0,2	0,2	0	0	T	
0	0,2	0	0	0	T	
0,8	0	0,5	0,3	0	T	
0	0,5	0	0	0,2	T	6 kpl
0	0,5	0,2	0	0	T	
0	0,5	0	0	0	T	4 kpl
0	0	0,2	0	0	T	
0	0,5	0,5	0	0,2	T	
0,5	0,5	0	0,2	0	T	
0	0,8	0	0	0,2	T	
1	0	0	1	0	T	P & e, 3kpl
1	0	0	0,5	0	T	P & e
1	0	0,5	1	0	T	P & e
0	0,5	0,5	0	0	T	
0,7	0,3	0,2	0,3	0	T	
0	0,5	0,5	0	0	T	
0,7	0,3	0	0,3	0	T	
1	0,5	0	1	0	T	
1	0	0	1	0	O	3kpl
0,5	0,2	0,5	0,5	0	T	
1	0	0,2	1	0	T	
1	0	0,8	1	0	O	
1	0,8	0,8	0	0	O	
0	0,2	0	0	0	O	
0,5	0,5	0	0,5	0	T	
1	0	0	0,5	0	T	
0	0,5	0	0	0	E	

Taulukko 13: Tehtäväänalyysi Physican luku 1: *Energia ja työ* sekä luku 2: *Työ muuttaa mekaanista energiaa*.

Tyyppi	Kuvaus	Tilanne	Rajaus	Määrittely	KytKentä	Huom.
1	0	0	1	0	T	4 kpl
1	0	0	0	0	T	3 kpl
1	0	0	0	0,2	T	2 kpl
1	0	0,2	0,5	0	T	
0	0,5	0	1	0,2	T	2 kpl
0,5	0,2	0	0	0	T	
0	0,5	0	0	0,2	T	2 kpl
1	0	0	0,2	0,2	T	
0,3	0,5	0	0	0	T	
0,25	0,5	0	0	0	T	
0	0	0	0	0	T	
0,5	0,5	0	0,5	0	T	

Taulukko 14: Tehtäväänalyysi Physican luku 3: *Lämpötila ja lämpö* sekä luku 6: *Lämpö ja olomuoto*.

Tyyppi	Kuvaus	Tilanne	Rajaus	Määrittely	KytKentä	Huom.
0	0,5	0	0	0	O	
0	0,5	0,8	0	0	O	
0	1	0	0	0	O	
1	0	0,2	1	0	T	
1	0	0	1	0	T	
1	0	0	0,5	0	T	
0	0	0	0	0	T	
0,3	0,5	0	0,3	0	T	
0	0,5	0	0	0,2	T	2 kpl
0,5	0,5	0	0,5	0	T	
0	0,5	0	0	0	T	4 kpl
0	0,5	0,5	0	0	T	

Taulukko 15: Tehtäväanalyysi Physican luku 7: *Lämpöopin pääsäännöt* sekä luku 8: *Energia ja yhteiskunta*.

Tyyppi	Kuvaus	Tilanne	Rajaus	Määrittely	Kytkenä	Huom.
1	0	0,5	1	0	T	
1	0,2	0	1	0	T	
0	0,5	0	0	0	T	5 kpl
0	0,5	0,5	0	0	T	
1	0	0,8	1	0	O	
0	0,2	0,2	0	0	T	
0	0,5	0,2	0	0	T	3 kpl
0	0,5	0	0,5	0	T	
1	0	0	0,5	0	T	2 kpl
1	0	0	1	0	T	3 kpl

Liite 2: Kyselylomake

Oppilaskysely

Olen mies / nainen

Aion suorittaa fysiikan kursseja _____ kpl

Aion suorittaa kemian kursseja _____ kpl

Fysiikka 2 -kurssilla käyttämäni oppikirja _____

Fysiikka 2 -kurssi on mielestäni ollut: Rastita mieleisesi vaihtoehto.

___ vaikea

___ melko vaikea

___ sopiva

___ melko helppo

___ helppo

Tehtävä 1.

Olet lähdössä kuumana kesäpäivänä retkelle ja otat mukaan hieman vettä litran termospulloon. Laitat termospulloon huoneenlämpöisen veden lisäksi jääpaloja sekä lämpömittarin kannen läpi. Suljet kannen tiiviisti. Mitkä seuraavista väittämistä ovat oikein? Ympyröi **oikeat** väittämät.

- Veden ja jään sisältämä energia ei muutu kannen sulkemisen jälkeen.
- Pullossa ei tasapainotilassa tapahdu tiivistymistä tai haihtumista.
- Yksittäisen vesimolekyylin lämpötilaa ei voida sanoa.
- Tasapainotilassa lämpömittari ilmoittaa pullossa olevan lämmön määrän.

Tehtävä 2.

Vesilasi, jossa on $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ vettä, on tiiviissä eristetyssä huoneessa. Seinällä oleva lämpömittari näyttää lukemaa $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja huoneilma on kuivaa. Mitä veden ja huoneilman välillä tapahtuu? Ympyröi **oikeat** väittämät.

- a) Saavutetaan ensin terminen tasapainotila, minkä jälkeen vesi alkaa haihtua.
- b) Vesi luovuttaa lämpöä huoneilmaan haihduttamalla.
- c) Haihtumista ei tapahdu, koska veden lämpötila on alle kiehumispisteen.
- d) Pitkän ajan kuluttua vettä haihtuu ja tiivistyy yhtä nopeasti.

Tehtävä 3.

Tarkastellaan systeemiä, joka koostuu kahdesta lämpöeristetyn astian sisällä olevasta tiiliskivistä. Tiiliskivet ovat aluksi eri lämpötilassa ja ne saatetaan kosketuksiin toistensa kanssa. Ympyröi **oikea** vaihtoehto (vain yksi).

- a) Kummankaan tiilen sisäenergia ei muutu, koska systeemi on eristetty.
- b) Kylmemmän tiilen sisäenergia kasvaa.
- c) Kuumemman tiilen sisäenergia kasvaa.
- d) Kummankin tiilen sisäenergia pienenee.

Tehtävä 4.

Tarkastellaan vielä **tehtävän 3** tilannetta. Ympyröi **oikea** vaihtoehto (vain yksi).

- A) Systeemin kokonaisentropia
 - a) pienenee
 - b) kasvaa
 - c) pysyy samana

B) Mitä tapahtuu tiilien entropialle? Ympyröi **oikea** vaihtoehto (vain yksi).

- a) Kylmemmän tiilen entropia kasvaa.
- b) Kuumemman tiilen entropia kasvaa.
- c) Kummankin tiilen entropia kasvaa.
- d) Kummankin tiilen entropia pienenee.

Kommentteja:

Kiitos vastauksistasi!