

Lämpömäärämittari kemiallisen reaktion energiamuutosten määrittämiseen Arduino-ohjelmistoympäristössä

Jesse Turpeinen

Kemian opettajankoulutusyksikkö, Kemian osasto
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta, Helsingin yliopisto

Tiivistelmä: Ymmärrys kemiallisiin reaktioihin liittyvistä energiamuutoksista on yksi kemian pääkonsepteista. Energiamuutoksia käsittelevä kemian osa-alue on nimeltään termodynamiikka, jonka opetuksessa hyödynnetään usein kalorimetristä mittausta kokeellisena työnä. Tässä artikkelissa esitellään termodynamiikan opetukseen Arduino-ohjelmistoalustalla kehitetty lämpömäärämittari, jolla voidaan selvittää kemiallisessa reaktiossa sitoutuvan tai vapautuvan energian määrä sekä indikoida visuaalisesti kemiallisen reaktion endo- tai eksotermisyys. Lämpömäärämittaria voidaan käyttää osana projektioppimista, josta esitellään artikkelissa esimerkki.

Avainsanat: kemian opetus, lämpömäärä, termodynamiikka, kemiallinen reaktio, energiamuutos, mittausautomaatio, projektioppiminen, Arduino

1 Johdanto

Kemiallinen reaktio ja siihen liittyvät konseptit ovat perustavanlaatuinen osa kemiaa. Ymmärrys juuri kemiallisiin reaktioihin liittyvistä energiamuutoksista on yksi kemian pääkonsepteista. (Pölloth ym., 2023.) Energiamuutoksia tutkiva kemian osa-alue on nimeltään termodynamiikka, jossa käsitellään muun muassa lämpöä, lämpötilaa ja entalpiaa (Saricayir ym., 2016). Koulukemiassa kalorimetristä toteutettavat kokeelliset työt ovat tyypillinen osa termodynamiikan opetusta (Gomes ym., 2020).

Tässä artikkelissa esitellään Arduino-ohjelmistoalustalla rakennettu mittauslaitteisto, joka on suunniteltu kemiallisessa reaktiossa sitoutuvan tai vapautuvan energian eli lämpömäärän mittaamiseen ja visuaaliseen havainnollistamiseen. Lämpömäärämittari on suunniteltu projektioppimiskontekstiin osana kemian opetusta. Lämpömäärämittarin kehittämisen tarkoituksena on ollut luoda mittausautomaatio työkalu kemiallisen reaktion lämpömäärän määrittämiseen sekä endo- ja eksotermisyyden visuaaliseen ilmaisuun. Mittauslaitteisto on toteutettu osana Helsingin yliopiston Kemian opettajankoulutusyksikön maisterivaiheen kurssia Tutkiva ja eheytävä kemian opetus.



Artikkelin aluksi kuvataan termodynamiikkaan ja kalorimetriseen mittaukseen, Arduinoon sekä projektioppimiseen liittyvää tutkimuskirjallisuutta (luku 2), jonka jälkeen esitellään yksityiskohtaisesti lämpömittarin kehitysprosessi (luku 3). Kehitysprosessin esittelyn jälkeen lämpömittari viedään projektioppimisen kontekstiin esimerkkiprojektin avulla (luku 4). Artikkelin lopuksi tehdään pohdintaa mittausrakenteiden merkityksestä projektioppimisessä (luku 5).

2 Teoreettinen viitekehys

2.1 Kemiallisen reaktion energiamuutokset ja kalorimetrinen mittaus

Kemian perusajatus termodynamiikan tarkasteluissa on energian vapautuminen uusien kemiallisten sidosten muodostuessa (Barker & Millar, 2000). Lähes kaikki kemialliseen reaktioon liittyvät energiamuutokset tapahtuvat muutoksissa kemiallisissa rakenteissa, siis sidosten katkeamisessa tai muodostumisessa (Pölloth ym., 2023). Termodynamiikka on siis välttämättömässä roolissa kaikissa kemiallisissa ilmiöissä (Saricayir ym., 2016).

Käsitteet, kuten eksotermisen reaktion tai aktivaatioenergia, ovat ensisijainen työkalu energian konseptien opettamisessa koulukemiassa (Pölloth ym., 2023). Kuitenkin kemiallisiin sidoksiin ja reaktioihin liittyvät energiamuutokset aiheuttavat opiskelijoille haasteita, sillä esimerkiksi eksotermisen ja endotermisen reaktion määritelmät koetaan haastaviksi. Opiskelijat saattavat ajatella, että palamisreaktiot ovat endotermisiä tai että sidosten katkeaminen on eksotermisen tapahtuma. Lämpötilan muutokset ja entalpiamuutokset ovat myös usein hankalia konsepteja ymmärtää. (Saricayir ym., 2016.) Opiskelijat eivät siis hahmota yhteyttä sidosten muodostumisella (eksotermisen tapahtuma) ja minimienergiaperiaatteella (Barker & Millar, 2000; Pölloth ym., 2023). Tähän saattaa vaikuttaa opiskelijoiden arkipäiväinen ajatus energiasta: energiaa tarvitaan jonkin tekemiseen, joten energiaa tarvitaan myös sidosten muodostumiseen (Boo, 1998).

Kalorimetrialla tarkoitetaan siirtyvän lämpöenergian, siis lämpöenergian, mittausta (Reardon ym., 2006; Reichmann ym., 2017). Kalorimetri on puolestaan laite, jossa lämpöenergia voidaan mitata tunnettaessa tutkittavan aineen massa (Reardon ym., 2006). Koulukemiassa kalorimetrinä toimii usein niin sanottu kahvikuppikalorimetri, joka toimii vakiopainekalorimetrinä. Suolan liukenemiseen liittyvä energiamuutoksen mittaus on esimerkki kalorimetrisestä kokeellisesta työstä koulukemiassa. (Bopegedera, 2023.)

Termodynamiikan tarkasteluissa on olennaista erottaa systeemi ja ympäristö toisistaan. Energiamuutoksia voidaan tarkastella kummastakin näkökulmasta, mutta kalorimetrisissä mittauksissa tarkastelun kohteena on systeemin energia. (Gislason & Craig, 2005.) Olennaista on huomata, että lämpöenergian siirtyessä ympäristöstä systeemiin tai toisinpäin, on systeemin ja ympäristön energiamuutokset yhtä suuret, mutta vastakkaismerkkiset (Gislason & Craig, 2005; Knurr & Hauri, 2020). Tätä systeemin ja ympäristön välistä yhteyttä voidaan kuvata seuraavalla yhtälöllä:

$$Q(\text{sys.}) = -Q(\text{ymp.}) \quad (1)$$

Kalorimetria perustuu puolestaan yhtälöön:

$$Q = cm\Delta T \quad (2)$$

Yhtälössä c kuvaa kalorimetrissä olevan liuoksen ominaislämpökapasiteettia, m liuoksen massaa ja ΔT ympäristön lämpötilanmuutosta (Schick, 2012). Kalorimetrisessä mittauksessa mitataan siis ympäristön lämpötilaa ja lämpötilan muutosta, jonka avulla lasketaan systeemin energiamuutos (Knurr & Hauri, 2020). Eksotermisessä reaktiossa energiaa vapautuu systeemistä ympäristöön (Gulsoy ym., 2024). Tällöin siis $Q < 0$. Vastaavasti endotermisessä reaktiossa sitoutuu energiaa ympäristöstä systeemiin, jolloin $Q > 0$.

2.2 Arduino

SBC on lyhenne englannin kielen sanoista *Single-Board Computer* (Ambrož ym., 2023). Vapaasti suomennettuna tällä tarkoitetaan yhden piirilevyn tietokonetta. Arduino on esimerkki yhden piirilevyn tietokoneesta, jonka käyttö perustuu avoimeen lähdekoodiin (Galadima, 2014). Arduino-ohjelmistoalusta on eniten käytetty ympäristö ohjelmointiin ja datan siirtoon tietokoneen ja USB-johdon välillä (Papadimitropoulos ym., 2021). Arduinolla pystytään tuottamaan mittausdataa fyysisten mittauslaitteiden avulla, mikä mahdollistaa Arduinon hyödyntämisen sekä demonstraatioissa että oppilastöissä (Papadimitropoulos ym., 2021).

Arduinoa hyödyntämällä pystytään luomaan virtuaalis-fyysinen oppimisympäristö, jossa yhdistyvät fyysiset instrumentit ja teknologian käyttö (Papadimitropoulos ym., 2021). Arduinon avulla oppiminen pystytään helposti luomaan ympäristöön, jossa oppiminen tapahtuu tekemisen keinoin. Arduinon käyttö oppimisessa

edistää täten kriittistä ajattelua ja ongelmanratkaisutaitoja. Oppilaiden kannalta Arduino voi puolestaan edistää mielenkiintoa uusien asioiden suunnitteluun ja rakentamiseen. (Galadima, 2014.)

Itse Arduinin käyttöä puoltaa useat eri seikat. Arduinin etuna on erityisesti sen saavutettavuus ja edullisuus. Virtapiirien rakentaminen on myös helppoa, ja ohjelmointikoodin opettelu suhteellisen yksinkertaista. Lisäksi Arduino perustuu avoimeen lähdekoodiin ja sitä voi käyttää useilla eri tietokoneiden käyttöjärjestelmillä USB-johdon välityksellä. (Galadima, 2014.)

2.3 Projektioppiminen

Projektioppimisella tarkoitetaan oppilaskeskeistä luonnontieteiden opetukseen suunniteltua lähestymistapaa, jolla vastataan luonnontieteiden opetuksen kehittämistarpeisiin ja jossa yhdistetään useita eri tieteenalaja (Lavonen & Juuti, 2022; Rodríguez-Becerra ym., 2020). Projektioppimisessa käytetään työskentelyn lähtökohtana ongelmia, joiden myötä kartutetaan uutta tietoa tutkittavasta aiheesta (Rodríguez-Becerra ym., 2020). Keskeistä projektioppimisessä on konkreettinen lopputuotos, joka voi olla esimerkiksi jokin rakennelma ja raportti. Lisäksi projektioppimisessä olennaista on tieteellisten käytäntöjen opiskelu, digi- ja viestintäteknologian käyttö sekä yhteistyötaitojen harjaannuttaminen. Myös projektin aihepiiriin käsitteistö tulee työskentelyn aikana opiskelijoille tutuksi. (Lavonen & Juuti, 2022.)

Projektioppiminen on aina tavoitteellista, joka on yksi projektioppimisen tunnusomaisista piirteistä. Projektityöskentelyn alussa olennaista on ohjaavan kysymyksen esittely opiskelijoille, sillä tämä kysymys ohjaa koko projektityöskentelyä ja mahdollistaa oppimistavoitteiden toteutumisen. Myös opetussuunnitelman keskeiset sisällöt ja tavoitteet toteutuvat projektioppimisen myötä. Projektioppimiseen suunnitellun opintojakson pituus voi vaihdella esimerkiksi muutamasta oppitunnista koko jakson ajaksi. Projektioppimisen on todettu tuottavan parempia oppimistuloksia kuin perinteinen luonnontieteiden opetus. (Lavonen & Juuti, 2022.)

Projektioppiminen etenee karkeasti seuraavalla tavalla:

1. Projektityöskentelyyn orientoituminen
2. Projektin suunnittelu
3. Projektin testaus
4. Lopputuotoksen laatiminen. (Lavonen & Juuti, 2022.)

Projektioppiminen sisältää myös haasteita. Opettajalle projektioppiminen voi olla työllistävää, sillä se vaatii huolellista suunnittelutyötä sekä jatkuvaa arviointia ja

palautteen antamista. Opettaja ohjaa jatkuvasti opiskelijoiden työskentelyä. Opiskelijan näkökulmasta projektioppiminen voi puolestaan olla kuormittavaa sellaisenaan. (Lavonen & Juuti, 2022.)

3 Metodologia

Tässä luvussa esitellään mittauslaitteiston kehitysprosessi. Tarkastelun kohteena ovat laitteen suunnittelu, rakennus ja käytännön testaus.

3.1 Suunnitteluprosessi

Suunniteltavan mittauslaitteiston lähtökohtana oli luoda mittausautomaatiolaite, joka ilmaisee kemiallisessa reaktiossa sitoutuvan tai vapautuvan energiamäärän kilojouleina ja indikoi esimerkiksi eri väristen ledien avulla, onko reaktio endotermiinen vai eksotermiinen. Energiamäärän ilmaisu perustuisi kalorimetriseen mittaukseen, jossa mitataan lämpömittarilla ympäristön lämpötilaa ja sen muuttumista.

Mittauslaitteen suunnittelu on tehty käyttäen niin sanottua insinöörimäistä lähestymistapaa. Tällä tarkoitetaan systemaattista ja tavoitteellista työskentelytapaa, jossa hyödynnetään yleisesti tiedossa olevia yksinkertaisia menetelmiä luomaan ideasta toimiva tuote. Insinöörimäinen lähestymistapa rakentuu niin sanotun suunnitteluprosessin (eng. *design process*) ympärille, jossa hyödynnetään luovaa ajattelua lopputuotoksen luomisen apuna. Suunnitteluprosessi koostuu kolmesta osasta: konseptin synteesi (luominen), konseptin arviointi ja konseptin tuominen käytäntöön. (Ambrož ym., 2023.) Ambrož ym. (2023) mukaan suunnitteluprosessia voidaan myös tarkemmin kuvata vaiheittain seuraavasti:

1. Prosessin aloitus
2. Suunnittelutehtävän ohjeistus
3. Konseptin synteesi
4. Konseptin arviointi
5. Yksityiskohtainen luonnos
 - a. Raportointi
6. Tuotoksen rakentaminen
7. Työn lopetus.

Vaiheet 3 ja 4 sisältävät niin sanotun suunnittelusilmukan (eng. *design loop*), jota voidaan toistaa niin kauan, että konsepti on riittävän hyvä toteutettavaksi (Ambrož ym., 2023).

Mittauslaitteiston suunnitteluprosessin konseptin synteesi -vaihe aloitettiin taulukoimalla toimintoja, joita mittauslaitteessa tulisi olla sekä kuvaukset näiden toimintojen toteutumiselle käytännössä. Kullekin toiminnolle taulukoitiin ikään kuin minimivaatimus sekä mahdollinen täyden intensiteetin toimivuus. Mittauslaitteen toiminnot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Mittauslaitteiston toiminnot

Toiminto	Vaadittu	Tavoiteltava
Lämpötilan mittaaminen	Mittaa lämpötilan, kun pH on lähellä neutraalia	Mittaa lämpötilan missä tahansa pH:ssa
Ekso-/endotermisyyden ilmaisu	-	Ilmaisee ekso-/endotermisyyden syttyvällä ledillä tai LCD-näytöltä
Ominaislämpökapasiteetin syöttö	Syötetään ominaislämpökapasiteetti ohjelmointikoodiin	Kysytään ominaislämpökapasiteettia Arduino IDE-ohjelmistossa koodin ajamisen jälkeen
Massan syöttö	Syötetään massa ohjelmointikoodiin	Kysytään massaa Arduino IDE-ohjelmistossa koodin ajamisen jälkeen
Massan mittaus	Erillinen ulkoinen vaaka	Vaaka, josta massa välittyy suoraan ohjelmaan
Lämpömäärän ilmaisu	Ilmaistaan lämpömäärä Arduino IDE-ohjelmistossa	Ilmaistaan lämpömäärä LCD-näytöltä
Kalorimetri mittausta varten	Styroksiastia	Metallinen kalorimetri

Konseptin synteisiä jatkettiin sitten hyödyntämällä niin sanottua toiminta- ja toiminnallisuus matriisia eli morfologista matriisia, jolla muodostetaan useita toimivia konsepteja arviointia varten (Ambrož ym., 2023). Tässä matriisissa pystyakselilla on laitteistoon tarvittava toiminta ja vaaka-akselilla tämän toiminnan eri toteuttamisvaihtoehdot, joita yhdistelemällä pystyttiin luomaan erilaisia konsepteja mittauslaitetta varten. Tällaisen matriisin käytön on todettu auttavan systemaattista projektin suunnitteluprosessia (Ambrož ym., 2023). Mittauslaitteen morfologinen matriisi on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Mittauslaitteiston morfologinen matriisi

Lämpömäärämittari		Periaate			
		A	B	C	D
Toiminto	1. Lämpötilan mittaaminen	Arduino-lämpömittari	Erillinen, laitteiston ulkoinen analoginen lämpömittari	Arduino-lämpömittari, joka kestää suurempia pH-vaihteluita	
	2. Ekso-/endotermisyyden ilmaisu	Punainen ja sininen ledi	Näky LCD-näytöltä	Näky tietokoneen näytöltä	Ei ilmaista
	3. Ominaislämpökapasiteetin syöttö	Syöttö Arduino Ide:en manuaalisesti	Tarjoaa valmiita vaihtoehtoja muutamille aineille	On valmiina vain vedelle ohjelmistokoodissa	
	4. Massan syöttö	Syöttö Arduino Ide:en manuaalisesti	Alla vaaka, josta massa välittyy suoraan laitteistoon		
	5. Massan mitta	Ulkoinen erillinen vaaka	Vaaka osana laitteistoa		
	6. Lämpömäärän ilmaisu	LED-näyttö	LCD-näyttö	Tietokoneen näyttö	
	7. Kalorimetri mittausta varten	Styroksiastia	Metallinen eristetty astia	Pommikalorimetri	

Mittauslaitteen rakentamista varten morfologisen matriisin pohjalta muodostettiin muutamia potentiaalisia konsepteja valitsemalla jokaiselle toiminnolle aina yksi toimintaperiaate. Erilaiset konseptit on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Toteuttamiskelpoiset konseptit

Konsepti	Periaate	Konseptin "nimi"
Konsepti 1	1A-2A-3A-4A-5A-6B-7A	Perus
Konsepti 2	1A-2B-3C-4A-5A-6B-7A	Ei ledejä, LCD
Konsepti 3	1C-2A-3B-4B-5B-6A-7C	Ihanteellinen
Konsepti 4	1A-2A-3C-4A-5A-6B-7A	Yhdistelmä

Muodostettujen neljän konseptin jälkeen siirryttiin suunnitteluprosessin konseptin arviointi -vaiheeseen. Tämä vaihe toteutettiin käyttäen niin sanottua multikriteerianalyysiä, jossa arvioidaan erikseen kunkin konseptin teknistä arvoa ja taloudellista arvoa. Parhaimmat konseptit ovat niitä, jotka pärjäävät parhaiten kummassakin ja omaavat hyvän tasapainon teknisen ja taloudellisen arvon välillä. Multikriteerianalyysissä valitaan tekniselle arvolle ja taloudelliselle arvolle erikseen välttämättömiä kriteerejä, joista jokaiselle määritetään jokin painokerroin. Tämän jälkeen jokainen syntetisoitu konsepti arvioidaan arvosanalla jokaisen valitun kriteerin

kohdalla erikseen. Lopuksi kullekin syntetisoidulle konseptille lasketaan arvosana. (Ambrož ym., 2023.) Kunkin konseptin tekninen arviointi on esitetty taulukossa 4 ja taloudellinen arviointi taulukossa 5.

Taulukko 4. Konseptien tekniset kriteerit

Tekninen arvo

Kriteeri	Painotus	Konsepti 1	Konsepti 2	Konsepti 3	Konsepti 4
Tarkkuus	3	3	4	5	4
Automaatio	3	3	3	5	4
Saavutettavuus	4	5	5	1	4
Kokoamisen helppous	4	3	4	1	4
Nopeus	2	3	3	5	4
Summa, absoluuttinen	16	56	63	48	64
Summa, normitettu	1	3,50	3,94	3,00	4,00
Sijoitus		3	2	4	1

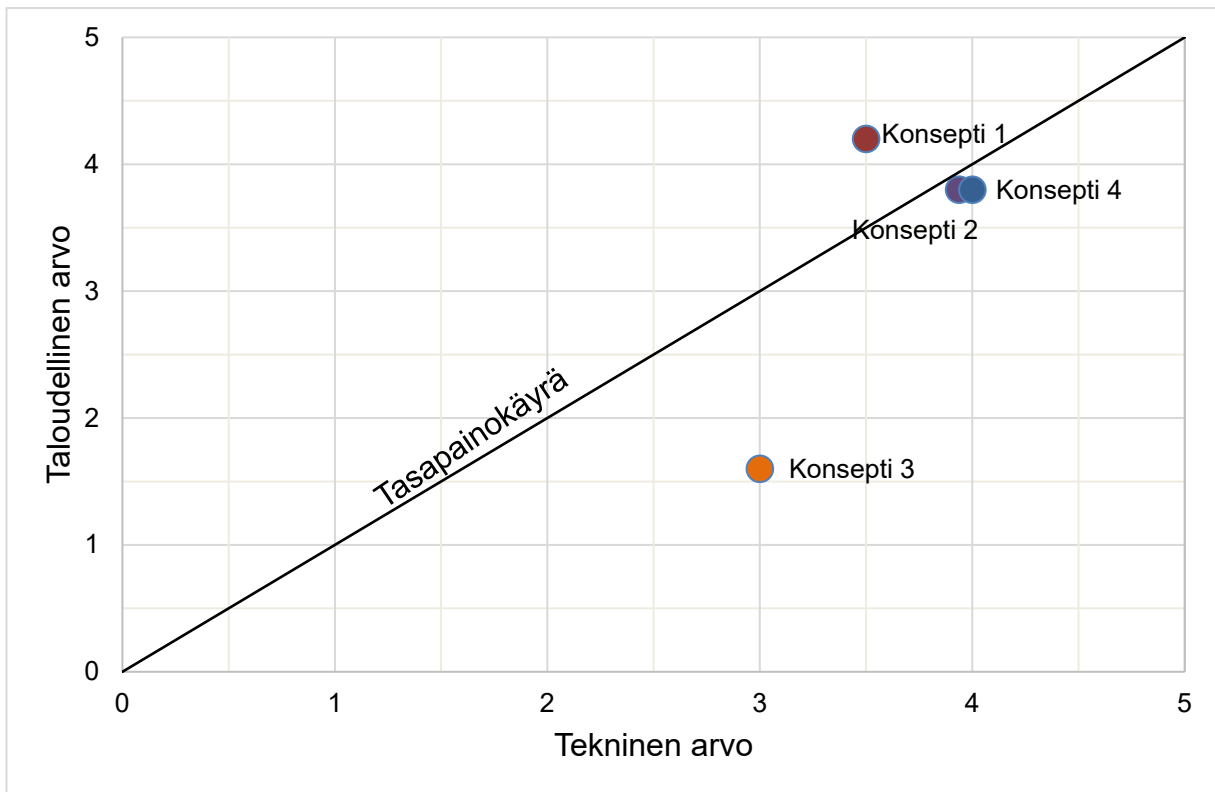
Taulukko 5. Konseptien taloudelliset kriteerit

Taloudellinen arvo

Kriteeri	Painotus	Konsepti 1	Konsepti 2	Konsepti 3	Konsepti 4
Hinta	4	4	4	1	4
Ylläpitokustannukset	2	5	5	2	5
Sovelluskohteet	4	4	3	2	3
Summa, absoluuttinen	10	42	38	16	38
Summa, normitettu	1	4,20	3,80	1,60	3,80
Sijoitus		1	2	4	2

Näiden taulukoiden pohjalta muodostettiin sitten koordinaatisto, jossa vaakakselilla on tekninen arvo ja pystyakselilla taloudellinen arvo. Kukin konsepti asetuu koordinaatistoon edellä esiteltyjen taulukoiden mukaisesti. Koordinaatiston keskellä on tasapainokäyrä, joka vastaa ihanteellista suhdetta teknisen arvon ja taloudellisen arvon välillä. Koordinaatisto on esitetty kuvaajassa 1.

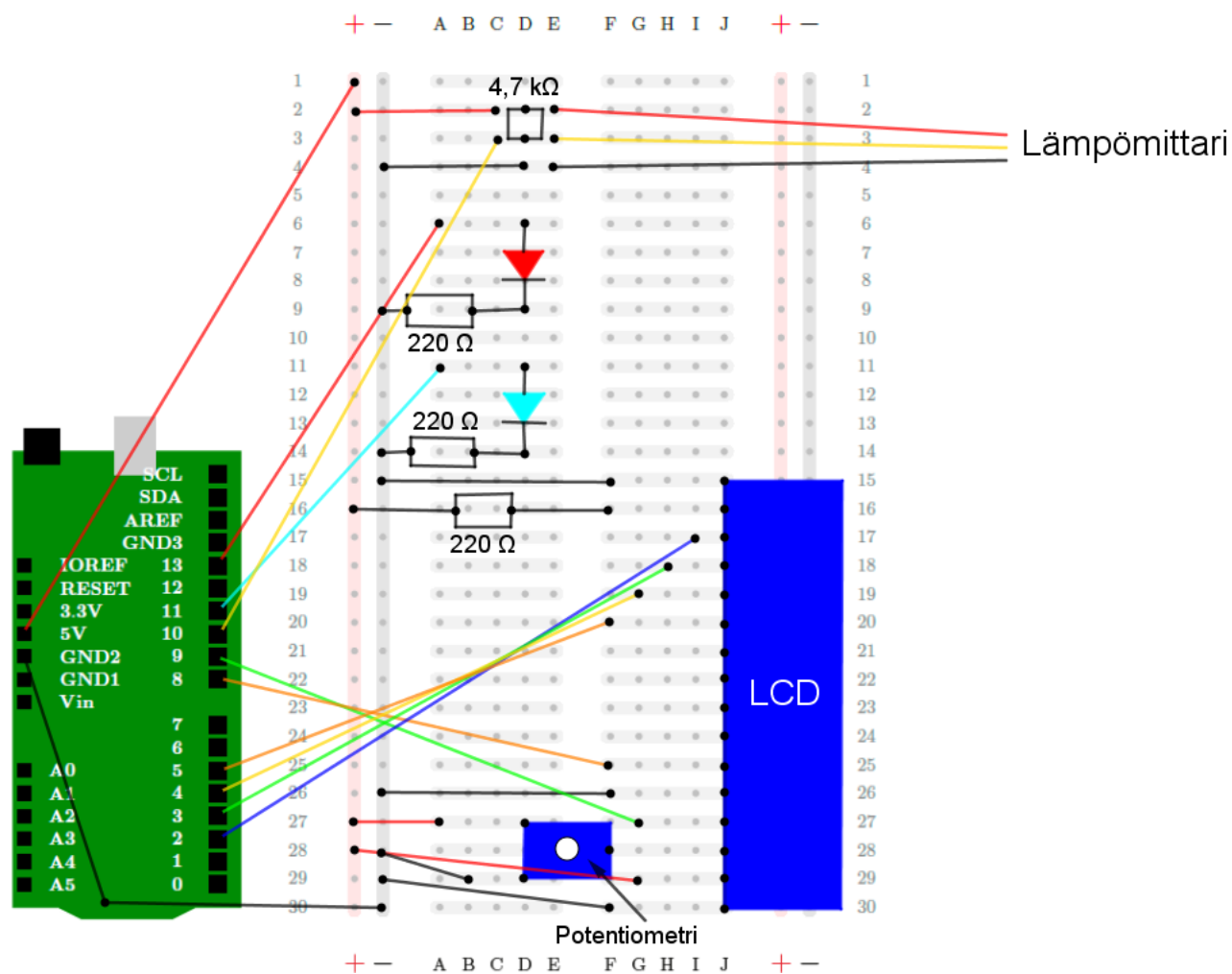
Kuvaaja 1. Konseptien asettuminen tasapainokäyrälle tekninen arvo, taloudellinen arvo -koordinaatistossa



Kuvaajasta nähdään, että konseptien asettuessa kuvaajalle teknisten ja taloudellisten arvojen perusteella konseptit 2 ja 4 ovat hyvin lähellä tasapainokäyrää eli ne ovat suotuisia sekä teknisen että taloudellisen näkökulman kannalta. Tämän tutkimuksen mittauslaitteiston rakentamiseen päädyttiin lopulta valitsemaan konsepti 4 sen parhaimman toteuttamiskelpoisuuden nojalla.

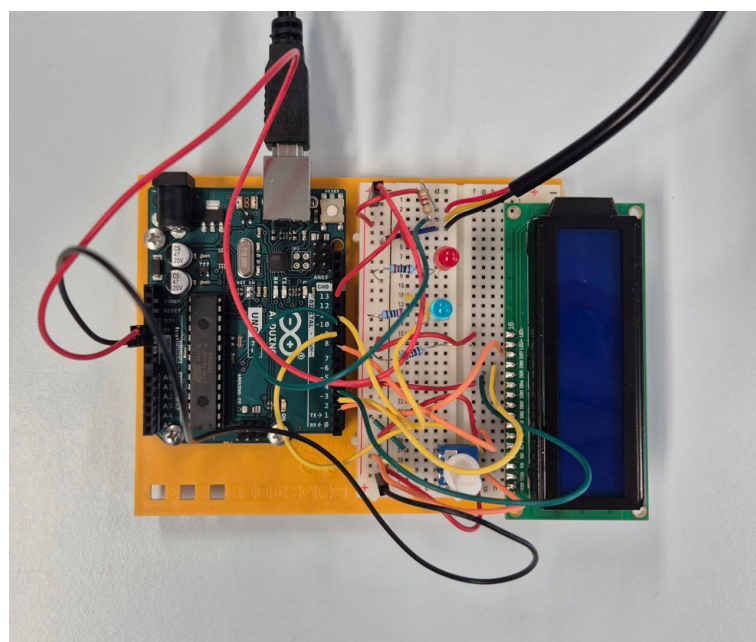
3.2 Mittauslaitteiston kokoaminen

Mittauslaitteisto kasattiin Arduino Uno -piirilevyllä. Laitteiston tärkeimmät komponentit olivat Ds18B20 lämpötila-anturi, LCD-näyttö sekä punainen ja sininen ledi. Lisäksi käytettiin potentiometriä, 220 Ω ja 4,7 k Ω vastuksia sekä hyppylankoja. Mittauslaitteiston kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Mittauslaitteiston kytkentäkaavio

Kuvassa 2 on esitetty valmiin mittauslaitteiston kytkentä käytännössä.



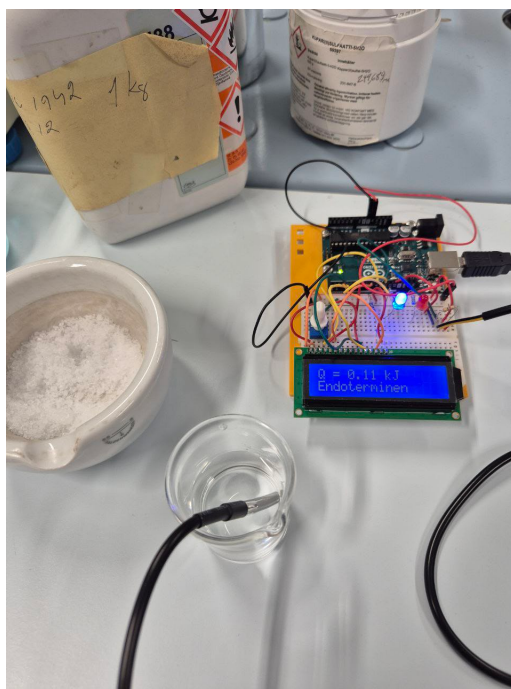
Kuva 2. Rakennettu mittauslaitteisto

Mittauslaitteiston kokoamisen jälkeen lämpömäärämittarille laadittiin ohjelmointikoodi Arduino IDE -sovellusta varten. Ohjelmointikoodissa käytettiin LiquidCrystal, OneWire ja DallasTemperature -ohjelmointikirjastoja. Ohjelmointikoodissa mittauslaitteisto ohjelmoitiin toimimaan niin, että ohjelman käynnistyessä ohjelma kysyy ensin tutkittavan liuoksen massan, jonka käyttäjä syöttää Arduino IDE -ohjelmistoon. Tämän jälkeen ohjelma mittaa liuoksen alkulämpötilan, odottaa 30 sekuntia reaktion tapahtumiseksi ja mittaa liuoksen loppulämpötilan. Lopuksi ohjelma laskee sitoutuvan tai vapautuvan energian määrän käyttäen laskukaavaa $Q = cm\Delta T$. Ohjelmointikoodiin on syötetty oletuksena veden ominaislämpökapasiteetin arvo 4,19 kJ/kgK. Ohjelmointikoodi löytyy liitteestä 1.

3.3 Mittauslaitteiston testaus

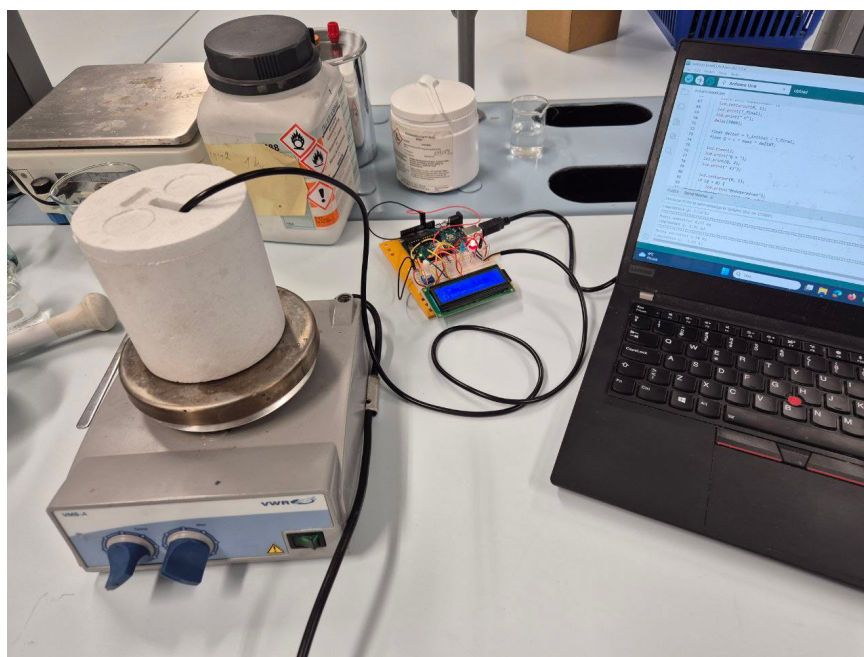
Mittauslaitteiston toimivuutta testattiin kalorimetrisellä mittauksella. Laboratoriossa toteutettiin sekä endoterminen että eksoterminen reaktio. Lisäksi testaus tehtiin kahdenlaisissa olosuhteissa: ensin avoimessa systeemissä keitinlasissa ja sitten styroksikalorimetrissä (kahvikupikalorimetri), joka mukaili eristettyä systeemiä.

Esimerkkinä endotermisestä reaktiosta oli ammoniumnitraatin liukeneminen veteen, joka on endoterminen tapahtuma. Jotta mittauslaite toimisi oikein, tulisi LCD-näytöllä lukea positiivinen energian arvo ja teksti ”Endoterminen”. Lisäksi sinisen ledin tulisi syttyä kuvaamaan ympäristön viilenemistä eli energian siirtymistä ympäristöstä systeemiin. Varsinainen testaus toteutettiin kuvan 3 mukaisesti niin, että mittauslaitteiston lämpömittari upotettiin ensin keitinlasissa olevaan veteen, jonka jälkeen mittaus aloitettiin. Mittauksen aloittamisen jälkeen veteen lisättiin välittömästi puoli teelusikallista ammoniumnitraattia ja näin saatua seosta sekoitettiin liukenemisen avustamiseksi. Lämpömittari mittasi lämpötilaa liukenemisen aikana 30 sekuntia. Tämän jälkeen lämpömittari mittasi liuoksen uuden lämpötilan ja laski energiamuutoksen. Energiamuutos oli positiivinen ja sininen ledi syttyi. Laitteisto toimi siis juuri niin kuin pitikin.



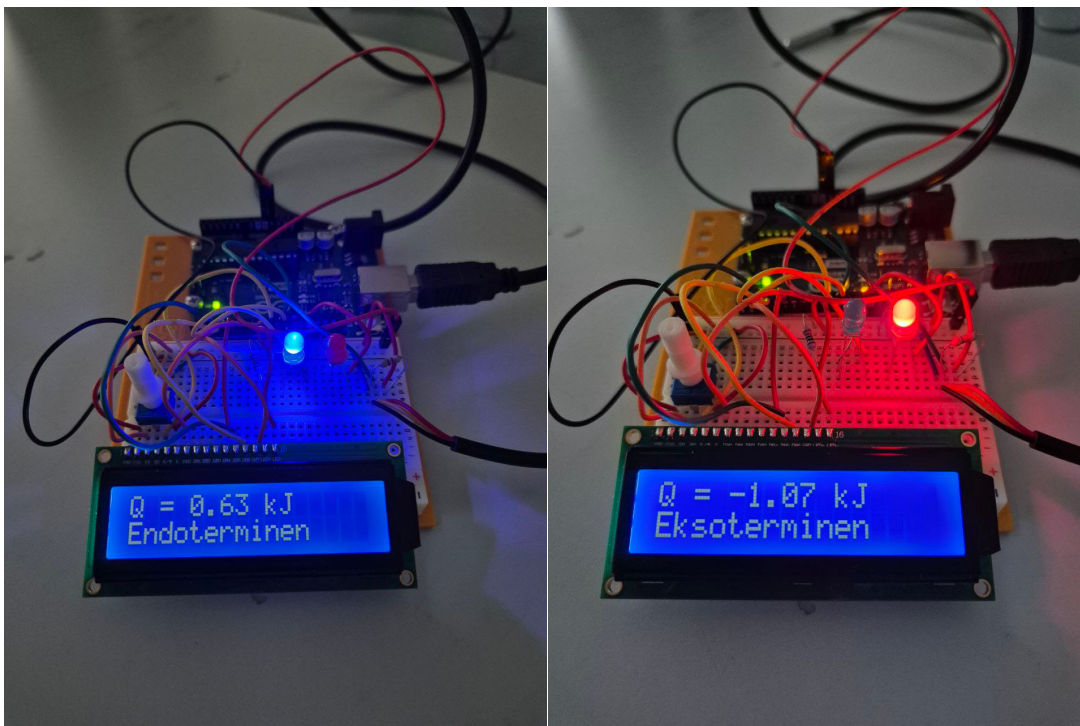
Kuva 3. Testimittaus keitinlasissa

Mittaus kuitenkin toistettiin vielä styroksikalorimetrissä kuvan 4 mukaisesti, jotta voitiin selvittää, onko reaktioastialla merkitystä laitteen mittaustarkkuuteen. Tässä mittauksessa vettä punnittiin kalorimetriin täsmälleen yhtä paljon kuin keitinlasimittauksessa. Testauksessa kävi ilmi, että keitinlasissa tehdyssä mittauksessa sitoutuvan energian arvoksi saatiin 0,10 kJ, kun taas kalorimetrissä arvo oli 0,18 kJ. Näin ollen mittausastialla oli merkitystä laitteen näyttämään energian arvoon.



Kuva 4. Testimittaus styroksikalorimetrissä

Esimerkkinä eksotermisestä reaktiosta oli sinkkijauheen reaktio kuparisulfaattiliuoksen kanssa. Tämä testaus tehtiin vastaavalla tavalla kuin endotermisen reaktion testaus. Testauksen myötä LCD-näytölle ilmestyi negatiivinen energian arvo ja punainen ledi syttyi. Näin ollen laite toimi oikein myös eksotermisen reaktion tapauksessa. Kuvassa 5 on esitetty rinnakkain esimerkkitilanteen mittauslaitteen lopputilanteesta sekä endotermisen että eksotermisen reaktion tapauksessa.



Kuva 5. Endotermisen ja eksotermisen reaktion indikointi mittauslaitteessa

4 Esimerkkiprojekti: Suolatutkimus

Lämpömäärämittaria voidaan hyödyntää koulukontekstissa projektioppimisen opintojaksolla. Kemiallisiin reaktioihin liittyviä energiamuutoksia tarkastellaan kvantitatiivisella tasolla kuitenkin vasta lukiossa. Yhtenä lukion opetussuunnitelman perusteiden (Opetushallitus, 2019) tavoitteena moduulissa KE5 Kemiallinen energia ja kiertotalous on ”opiskelija ymmärtää kemiallisen energian varastoinnin ja hyödyntämisen periaatteita ja osaa perustella mielipiteitään keskustelussa energiaratkaisuista”. Näin ollen lämpömäärämittari soveltuisi sellaisenaan lukion KE5-moduuliin. Projektioppimisen kannalta lämpömäärämittari saattaa kuitenkin olla liian yksinkertainen lukioon, joten se ei välttämättä ole mielekäs projektioppimisen kontekstissa lukiossa.

Yläkoulussa puolestaan tutustutaan myös kemialliseen energiaan, mutta vain kvalitatiivisella tasolla. Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteiden (Opetushallitus, 2014) sisältöalueessa S6 Aineiden ominaisuudet ja muutokset on maininta ”Tutustutaan energian ja aineiden muuttumiseen kemiallisissa reaktioissa”. Näin ollen lämpömittaria voidaan hyödyntää myös perusopetuksessa. Projektioppimisen näkökulma saadaan kemiallisen energian muutoksen opetukseen mukaan, kun yhdistetään energiamuutosten tutkiminen aineiden ominaisuuksien tutkimiseen, joka puolestaan on osa sisältöaluetta S5 Aineiden ominaisuudet ja rakenne (Opetushallitus, 2014).

Lämpömittarin avulla pystytään rakentamaan projektioppimisen kokonaisuus esimerkiksi suolatutkimuksen muodossa yläkouluun. Tässä tutkimuksessa oppilaille annetaan useita eri suoloja ja tehtävänä on tutkia suolojen liukenemista pahtumaan liittyviä energiamuutoksia. Projektioppiskokonaisuuden ohjaavana kysymyksenä voisi olla esimerkiksi: ”Miten energiamuutokset liittyvät suolojen vesiliukoisuuteen?”

Oppimiskokonaisuuden aloituksessa opettaja ohjeistaa, mitä tutkimuksessa tehdään tekemään, esittelee ohjaavan kysymyksen sekä kertoo lopputuotoksen ohjeistuksen. Tässä projektissa lopputuotoksena voi toimia esimerkiksi posterit, johon on koottu tietoa erilaiset suolojen ominaisuuksista, taulukoitu kokeellisessa mittauksessa saatuja tutkimustuloksia sekä laitettu kuvia mittauksesta. Koska yläkoulussa kemiallisen reaktion energiamuutoksia käsitellään hyvin yleisellä tasolla, tulee aihealueeseen ensin syventyä. Oppilaita voidaan pyytää oppimiskokonaisuuden aluksi selvittämään esimerkiksi internetin tai tekoälyn avulla, liukenevatko kaikki suolat veteen samalla tavalla. Oppilaat kirjoittavat ylös muistiinpanoja posteria varten.

Aihealueeseen syventymisen jälkeen oppilaat tutustutetaan Arduino ohjelmistoalustaan. Tässä voidaan käyttää apuna esimerkiksi LUMA-keskus Suomen Arduino-harjoituspakettia. Kun Arduino-ympäristö on tullut oppilaille tutuksi, pyydetään heitä rakentamaan lämpömittari tässä artikkelissa esiteltyjen ohjeiden mukaisesti. Lämpömittarin valmistuttua oppilaille annetaan useita eri suoloja ja heitä pyydetään tutkimaan eri suolojen liukenemista lämpömittarin avulla. Tässä vaiheessa ohjeistus on melko avoin ja oppilaiden tulee itse laatia tutkimussuunnitelma ennen työskentelyn aloitusta. Opettaja kuitenkin ohjaa ja auttaa työskentelyssä aktiivisesti.

Kun suolatutkimus lämpömittarin avulla on saatu päätökseen, tuottavat oppilaat posterin. Posterin on esimerkiksi taulukoitu endotermisesti ja

eksotermisesti liukenevia suoloja sekä lämpömääräarvoja kullekin suolalle. Valmiit posterit esitellään muulle ryhmälle.

5 Pohdinta

Arduino-ohjelmistoalustalla rakennettu lämpömäärämittari soveltuu projektioppimisen toteuttamiseen koulukemiassa. Mielekkään ja sopivan haastavan projektin teettämistä varten lämpömäärämittari vaikuttaisi kuitenkin soveltuvan ensisijaisesti yläkouluun. Toteutettaessa projektioppimista Arduino-alustan avulla pystytään kehittämään oppilaiden insinöörimäistä lähestymistapaa (Ambrož ym., 2023) sekä vastaamaan useisiin opetussuunnitelmien asettamiin kemian opetuksen kriteereihin (Opetushallitus, 2014, 2019). Esimerkiksi erityisesti perusopetuksen opetussuunnitelman perusteissa (Opetushallitus, 2014) mainittavat tutkimisen taidot, kuten kemian soveltaminen teknologiassa ja kokeellisten tutkimusten tekeminen, kehittyvät Arduino-projektin myötä. Lisäksi projektioppimisen tyypilliset piirteet, kuten yhteistyötaitojen ja tieteellisten käytäntöjen harjaantuminen (Lavonen & Juuti, 2022) kehittyvät Arduino-työskentelyn avulla.

Tässä artikkelissa kehitetty lämpömäärämittari on sellaisenaan kouluopetuksen näkökulmasta saavutettava. Laitteiston osat ovat edullisia ja helposti hankittavissa kouluille. Mittauslaitteiston rakentaminen on myös kohtuu helppoa ja se on nopeasti toteutettavissa. Lämpömäärämittarilla on sellaisenaan sovelluskohteita erilaisiin kokeellisiin töihin perinteisestä kalorimetrisestä mittauksesta yksinkertaiseen aineiden liukoisuusominaisuuksien kuvaamiseen. Lämpömäärämittarin tarkoituksena on ollut automatisoida lämpömäärän mekaanista, laskennallista määrittämistä sekä edistää endo- ja eksotermisyyden visuaalista hahmottamista.

Lämpömäärämittarin toimintaa voisi kehittää muokkaamalla ohjelmointikoodia. Koodia voisi muokata esimerkiksi niin, että 30 sekunnin reaktioajan sijaan loppulämpötila mitattaisiin vasta sitten, kun reaktioseoksen lämpötila pysyy takuuvarmasti muuttumattomana. Itse laitetta voisi kehittää luvussa 3 esitetyn morfologisen matriisin pohjalta muun muassa niin, että lämpömittarina olisi laajaa pH-skaalaa kestävä mittari ja että liuoksen massan mittaus olisi jollain tavalla osana laitteistoa.

Lähteet

- Ambrož, M., Perna, J., Haatainen, O., & Aksela, M. (2023). Promoting STEM Education of Future Chemistry Teachers with an Engineering Approach Involving Single-Board Computers. *Applied Sciences*, 13(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/app13053278>
- Barker, V., & Millar, R. (2000). Students' reasoning about basic chemical thermodynamics and chemical bonding: What changes occur during a context-based post-16 chemistry course? *International Journal of Science Education*, 22(11), 1171–1200. <https://doi.org/10.1080/09500690050166742>
- Boo, H. K. (1998). Students' understandings of chemical bonds and the energetics of chemical reactions. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(5), 569–581. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199805\)35:5<569::AID-TEA6>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199805)35:5<569::AID-TEA6>3.0.CO;2-N)
- Bopegedera, A. M. R. P. (2023). Evaluating the Heats of Combustion of Coals Using Bomb Calorimetry in the General Chemistry Laboratory. *Journal of Chemical Education*, 100(1), 298–305. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00296>
- Galadima, A. A. (2014). Arduino as a learning tool. *2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICECCO.2014.6997577>
- Gislason, E. A., & Craig, N. C. (2005). Cementing the foundations of thermodynamics: Comparison of system-based and surroundings-based definitions of work and heat. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 37(9), 954–966. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2004.12.012>
- Gomes, V. V., Cavaco, S. C. F., Morgado, C. P., Aires-de-Sousa, J., & Fernandes, J. C. B. (2020). An Arduino-Based Talking Calorimeter for Inclusive Lab Activities. *Journal of Chemical Education*, 97(6), 1677–1681. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00148>
- Gulsoy, Z., Dorokhov, I., Ohlig, D., Gödde, M., Kuok Hii, K., & Hellgardt, K. (2024). Determining kinetics of fast exothermic reactions using a flow calorimeter. *Chemical Engineering Journal*, 494, 153184. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153184>
- Knurr, B. J., & Hauri, J. F. (2020). An Alternative to Recycling: Measurement of Combustion Enthalpies of Plastics via Bomb Calorimetry. *Journal of Chemical Education*, 97(5), 1465–1469. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00076>
- Lavonen, J., & Juuti, K. (2022). Mitä on projektioppiminen? Teoksessa *Projektioppiminen luonnontieteissä*. Gaudeamus.
- Opetushallitus. (2014). *Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2014*. Opetushallitus.
- Opetushallitus. (2019). *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019*. Opetushallitus.
- Papadimitropoulos, N., Dalacosta, K., & Pavlatou, E. A. (2021). Teaching Chemistry with Arduino Experiments in a Mixed Virtual-Physical Learning Environment. *Journal of Science Education and Technology*, 30(4), 550–566. <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09899-5>
- Pöllöth, B., Diekemper, D., & Schwarzer, S. (2023). What resources do high school students activate to link energetic and structural changes in chemical reactions? – A qualitative study. *Chemistry Education Research and Practice*, 24(4), 1153–1173. <https://doi.org/10.1039/D3RP00068K>
- Reardon, F. D., Leppik, K. E., Wegmann, R., Webb, P., Ducharme, M. B., & Kenny, G. P. (2006). The Snellen human calorimeter revisited, re-engineered and upgraded: Design and performance characteristics. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 44(8), 721–728. <https://doi.org/10.1007/s11517-006-0086-5>
- Reichmann, F., Millhoff, S., Jirmann, Y., & Kockmann, N. (2017). Reaction Calorimetry for Exothermic Reactions in Plate-Type Microreactors Using Seebeck Elements. *Chemical Engineering & Technology*, 40(11), 2144–2154. <https://doi.org/10.1002/ceat.201700419>

- Rodríguez-Becerra, J., Cáceres-Jensen, L., Díaz, T., Druker, S., Padilla, V. B., Perna, J., & Aksela, M. (2020). Developing technological pedagogical science knowledge through educational computational chemistry: A case study of pre-service chemistry teachers' perceptions. *Chemistry Education Research and Practice*, 21(2), 638–654. <https://doi.org/10.1039/C9RP00273A>
- Sarıca, H., Ay, S., Çemek, A., Çansız, G., & Uç, M. (2016). Determining Students' Conceptual Understanding Level of Thermodynamics. *Journal of Education and Training Studies*, 4(6), 69–79. <https://doi.org/10.11114/jets.v4i6.1421>
- Schick, C. (2012). Calorimetry. Teoksessa K. Matyjaszewski & M. Möller (Toim.), *Polymer Science: A Comprehensive Reference* (ss. 793–823). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00056-X>

Liite 1. Arduino ohjelmointikoodi

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS 10 // DS18B20 anturi kytketty pinniin 10
#define RED_LED 13      // Punainen LED
#define BLUE_LED 11     // Sininen LED

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
LiquidCrystal lcd(9, 8, 5, 4, 3, 2);

float mass = 0.0; // Liuoksen massa (kg)
const float c = 4.19; // Veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg*K)

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(16, 2);
  sensors.begin();

  pinMode(RED_LED, OUTPUT);
  pinMode(BLUE_LED, OUTPUT);

  lcd.print("Anna massa (kg):");
  Serial.println("Syötä liuoksen massa kilogrammoina ja paina Enter:");

  while (Serial.available() == 0) {
    // Odotetaan käyttäjän syötettä
  }

  mass = Serial.parseFloat();
  Serial.print("Massa asetettu: ");
  Serial.print(mass);
  Serial.println(" kg");

  lcd.clear();
  lcd.print("Odotetaan...");
  delay(2000);

  lcd.clear();
  lcd.print("Mittaa alkulampo");
  delay(2000);

  sensors.requestTemperatures();
  float T_initial = sensors.getTempCByIndex(0);

  lcd.clear();
  lcd.print("Alkulampo:");
```

```

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(T_initial);
lcd.print(" C");
delay(3000);

lcd.clear();
lcd.print("Odotetaan...");
delay(25000); // Odotusaika, jotta lämpötila muuttuu

lcd.clear();
lcd.print("Mittaa loppulampo");
delay(2000);

sensors.requestTemperatures();
float T_final = sensors.getTempCByIndex(0);

lcd.clear();
lcd.print("Loppulampo:");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(T_final);
lcd.print(" C");
delay(3000);

float deltaT = T_initial - T_final;
float Q = c * mass * deltaT;

lcd.clear();
lcd.print("Q = ");
lcd.print(Q, 2);
lcd.print(" kJ");

lcd.setCursor(0, 1);
if (Q > 0) {
    lcd.print("Endotermien");
    digitalWrite(RED_LED, LOW);
    digitalWrite(BLUE_LED, HIGH);
} else {
    lcd.print("Eksotermien");
    digitalWrite(RED_LED, HIGH);
    digitalWrite(BLUE_LED, LOW);
}

Serial.print("Lämpömäärä Q: ");
Serial.print(Q);
Serial.println(" kJ");
delay(5000);
}
void loop() {
    // Ei tarvitse toistaa, ohjelma ajetaan kerran
}

```