

Kohti entalpiamuutoksiin liittyviä laskuja

Ilona Linnavuori

Kemian opettajankoulutusyksikkö, Helsingin yliopisto • ilona.linnavuori@helsinki.fi

Tiivistelmä Lukion kemian KE3-kurssin (Reaktiot ja energia) keskeisiin sisältöihin kuuluu energian muutokset kemiallisissa reaktioissa (Opetushallitus, 2003). Tässä yhteydessä tavallisesti suoritetaan kalorimetrisia mittauksia ja lasketaan mittauksiin perustuvia entalpiamuutoslaskuja. Ennen siirtymistä mittauksista laskuihin on opetuksessa hyvä huomioida muutamia asioita, joita tämä artikkeli esittelee. Molekyylitason potentiaalienergian ja hiukkasten liike-energian oppimisen tueksi olen luonut kaksi lyhyttä animaatiota, joita voidaan hyödyntää opetuksessa aiheen yhteydessä.

1 Johdanto

Tutkimusten mukaan kemian laskemista vaativien ongelmatehtävien onnistuneessa ratkaisussa laskuihin liittyvien käsitteiden ymmärtäminen on keskeisessä osassa (esim. Bodner & Herron, 2002; BouJaoude & Barakat, 2000). Vaikka kalorimetrisen mittaukseen perustuvat entalpiamuutoslaskut ovat suhteellisen suoraviivaisia, on opiskelijoilla niissä vaikeuksia jopa yliopistotasolla (Greenbowe & Meltzer, 2003). Kemiallisten reaktioiden energiamuutoksiin liittyvään käsitteelliseen ymmärrykseen tulee siis opetuksessa selkeästi panostaa.

Tämän artikkelin luku 2 käsittelee lyhyesti kemiallisten reaktioiden energiamuutoksiin ja kalorimetrisiin mittauksiin liittyvää kemiaa – jossakin määrin hieman yli yleisimpien lukion oppikirjojen tason. Tutkimusten mukaan energia on opiskelijoille hyvin vaikea aihealue (esim. Lundell & Aksela, 2004). Luvussa 3 esitelläänkin liikkuvia animaatioita molekyylitason energiakäsitteiden oppimisen tukena. Luku 4 puolestaan keskittyy tarkemmin kalorimetrisiin mittauksiin perustuvien laskutehtävien kannalta oleellisiin asioihin ja käsitteisiin. Jos ei näihin tietoisesti kiinnitetä huomiota, jäävät ne opetuksessa helposti taka-alalle.

2 Energian muutokset kemiallisissa reaktioissa

Kun puhutaan kemiallisten reaktioiden energian muutoksista, jaetaan universumi kahteen osaan: kemialliseen systeemiin ja ympäristöön. Systemillä tarkoitetaan tässä tapauksessa reaktion lähtöaineita ja tuotteita. Ympäristö puolestaan sisältää kaiken muun ympärillä olevan: reaktioastian, huoneen ja niin edelleen. (Zumdahl & Zumdahl, 2007)

Mikäli systeemi luovuttaa lämpöenergiaa ympäristöönsä, kutsutaan reaktiota eksotermiseksi. Mikäli systeemi taas sitoo lämpöenergiaa ympäristöstään, on reaktio endotermisen. Molekyylitasolla reaktiossa vapautuvan tai sitoutuvan energian taustalla on

ero reaktion lähtöaineiden ja tuotteiden potentiaalienergioissa. (Tro, 2008; Zumdahl & Zumdahl, 2007)

Pohjimmiltaan potentiaalienergia on ns. varastoitunutta energiaa, joka aiheutuu jonkin objektin kokemista vetovoimista ja repulsioista suhteessa muihin objekteihin (Brown, LeMay, Bursten, Murphy & Woodward, 2012). Molekyyli-tason kemiallinen potentiaalienergia aiheutuu varautuneiden hiukkasten välisistä sähköstaattisista vuorovaikutuksista – tarkemmin sanoen vuorovaikutuksista systeemin atomien ja molekyylien sisältämien protonien ja elektronien välillä (Brown, LeMay, Bursten, Murphy & Woodward, 2012; Tro, 2008).

Kemiallisissa reaktioissa sidoksia katkeaa ja uusia muodostuu. Eksotermisissä reaktioissa protonit ja elektronit uudelleenjärjestäytyvät korkeamman potentiaalienergian tasolta matalammalle potentiaalienergian tasolle, mikä havaitaan lämpöenergian vapautumisena. Endotermisissä reaktioissa puolestaan protonit ja elektronit järjestäytyvät matalamman potentiaalienergian tasolta korkeammalle potentiaalienergian tasolle, jolloin lämpöenergiaa sitoutuu. (Tro, 2008)

2.1 Reaktion entalpiamuutoksen määrittäminen kalorimetrissä

Kun kemiallinen reaktio tapahtuu vakio-paineessa, on reaktion entalpiamuutos ΔH yhtä suuri kuin reaktiossa vapautuvan tai sitoutuvan lämpöenergian määrä. Vesiliuoksessa tapahtuvan kemiallisen reaktion entalpiamuutos voidaan siis määrittää kokeellisesti ympäristön kautta käyttämällä vakio-paine-kalorimetriä. Tähän tarkoitukseen käy esimerkiksi yksinkertainen, kahdesta styroksisesta kertakäyttömukista rakennettu kahvikuppi-kalorimetri. (Tro, 2008; Zumdahl & Zumdahl, 2007)

Vesiliuoksessa tapahtuvan eksotermisen reaktion vapauttama lämpöenergia kasvattaa liuotinpartikkeleiden satunnaista liikettä, mikä havaitaan reaktioseoksen lämpötilan kohoamisena (Zumdahl & Zumdahl, 2007). Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan universumin energia on vakio. Kun siis oletetaan kalorimetrin eristyksen olevan täydellinen, voidaan reaktion entalpiamuutos määrittää ympäristön kautta lämpötilan kasvun, liuoksen massan ja liuoksen ominaislämpökapasiteetin perusteella. Tällöin entalpiamuutos ΔH on itseisarvoltaan yhtä suuri kuin vesiliuoksen sitoma lämpömäärä $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$. Tavallisesti laskuissa liuos ajatellaan puhtaana vetenä, jolloin kaavan suureet c ja m viittaavat veden ominaislämpökapasiteettiin ja massaan. (Tro, 2008; Zumdahl & Zumdahl, 2007) Endotermisen reaktion tapauksessa reaktion entalpiamuutos voidaan määrittää vastaavasti vesiliuoksen vapauttaman lämpömäärän perusteella.

2.2 Entalpiamuutoksen etumerkki

Määritelmän mukaan kemiallisen reaktion entalpiamuutos saadaan yhtälöstä: $\Delta H_{reaktio} = H_{tuotteet} - H_{lähtöaineet}$. Eksotermisen reaktion tapauksessa lämpöenergiaa vapautuu ympäristöön, jolloin reaktiotuotteiden entalpia on pienempi kuin lähtöaineiden. Reaktion entalpiamuutos ΔH on siis negatiivinen. Endotermisen reaktion tapauksessa systeemi

puolestaan sitoo lämpöenergiaa, jolloin reaktiotuotteiden entalpia on suurempi kuin lähtöaineiden. Entalpiamuutos ΔH on positiivinen. (Zumdahl & Zumdahl, 2007)

3 Syvyyttä molekyylitason energiakäsitteiden oppimiseen

Energiaan ja energian muutokseen liittyvien käsitteiden ja aiheiden on todettu olevan vaikeita lukio-opiskelijoille (esim. Chang, 2009; Cooper & Klymkowsky, 2013). Etenkin energian ymmärtäminen ja potentiaalienergian käsite molekyylitason ilmiöinä tuottavat opiskelijoille hankaluuksia (Cooper & Klymkowsky, 2013). Syitä vaikeuksiin on monia. Esimerkkeinä mainittakoon: 1) fysiikasta tuttu makroskooppinen lähestymistapa energiakäsitteisiin, 2) oppimista hankaloittavat vaihtoehtoiset käsitykset, 3) energiamuutokseen liittyvien määritelmien perustuminen oletuksiin, joihin ei kiinnitetä riittävästi huomiota opetuksessa ja 4) kemian kurssien epäonnistuminen molekyylitason energiailmiöiden linkittämisessä makroskooppiselle tasolle (Chang, 2009; Cooper & Klymkowsky, 2013).

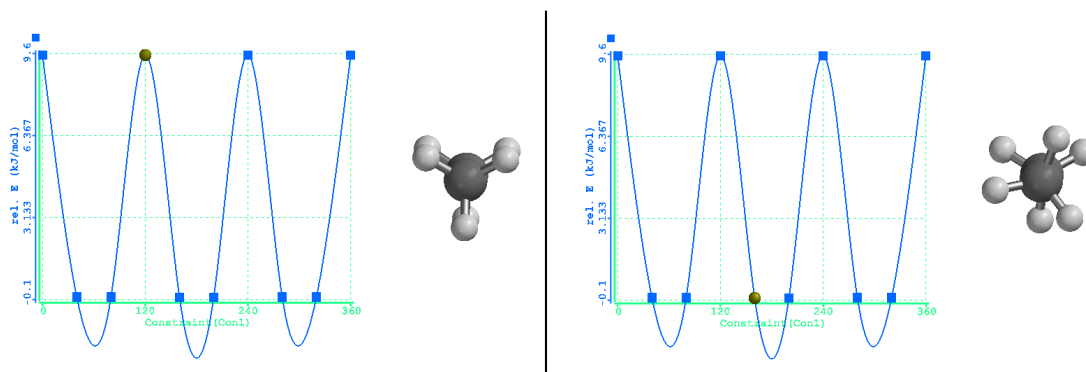
Energia-aiheen oppimisen tueksi tarvitaan uusia lähestymistapoja. Yhden hyvän välineen energian havainnollistamiseen kemian opetuksessa antaa molekyyylimallinnus. (Lundell & Aksela, 2004)

3.1 Liikkuvat visualisoinnit oppimisen tukena

Tutkimusten mukaan liikkuvat visualisoinnit voivat tehokkaammin kehittää opiskelijoiden ymmärrystä abstrakteista käsitteistä staattisiin kuviin verrattuna (Ryoo & Linn, 2012). Reaktioiden energiamuutokseen ja entalpiaan liittyviä käsitteitä voidaan selventää esimerkiksi tietokoneanimaatioiden kautta. Molekyylitason potentiaalienergian ja liikeenergian käsitteiden ymmärrystä tukemaan olen luonut Spartan Student -molekyyylimallinnusohjelman avulla kaksi animaatiota, joita voidaan hyödyntää oppitunneilla ennen entalpiamuutoslaskuihin siirtymistä.

Oppitunneilla käytettävät animaatiot toimivat parhaiten sanallisen selityksen kanssa: opiskelijat saavat samanaikaisesti sekä visuaalista että sanallista informaatiota (esim. Mayer & Anderson, 1991). Kuvan 1 animaatio havainnollistaa etaanimolekyylin potentiaalienergian muuttumista hiili-hiilidoksen kiertyessä. Animaation tarkastelun aikana opettajan kannattaa selostaa, mistä kemiallinen potentiaalienergia aiheutuu ja miksi etaanimolekyylin potentiaalienergia animaatioissa vaihtelee.

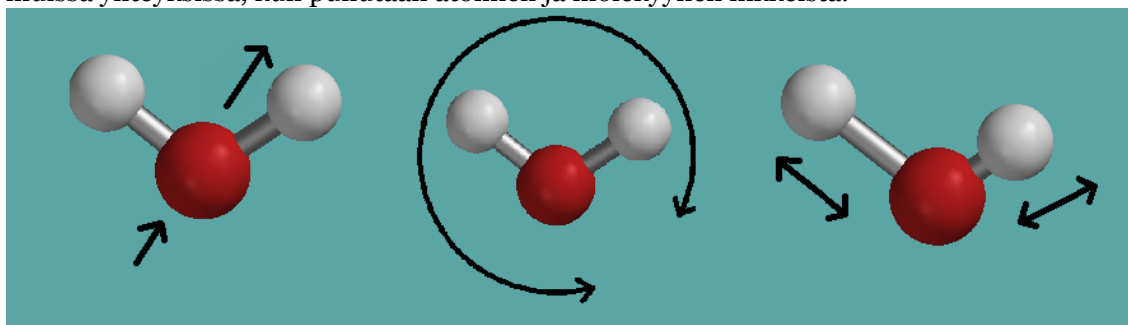
Jos tietokoneanimaatioita käytetään oppitunneilla yhdessä kokeellisten demonstraatioiden rinnalla, opiskelijat pystyvät paremmin linkittämään kemian sub-mikroskooppisen, makroskooppisen ja symbolisen tason toisiinsa (Russell, Kozma, Jones, Wykoff, Marx & Davis, 1997, viitattu teoksessa Burke, Greenbowe & Windschitl, 1998). Siksi potentiaalienergia-animaation yhteydessä oppitunneilla on hyödyllistä tarkastella myös jotakin konkreettista eksotermistä tai endotermistä reaktiota. Samalla voidaan opiskelijoiden kanssa keskustella, mistä kyseisessä



Kuva 1 Kemiallinen potentiaalienergia aiheutuu sähköisesti varautuneiden protonien ja elektronien välisistä vuorovaikutuksista. Etaanimolekyylin potentiaalienergia muuttuu hiili-hiilisisidoksen kiertyessä, kun molekyylin sisältämien protonien ja elektronien asemat toisiinsa nähden muuttuvat. Animaatio on käyttökelpoinen myös KE2-kurssilla (Kemian mikromaailma) konformaatioisomerian yhteydessä.

reaktiossa vapautuva tai sitoutuva energia on peräisin. Animaation, opettajan selostuksen ja demonstraation kautta opiskelijan on todennäköisesti helpompi linkittää makrotasolla havaittava lämpötilanmuutos sub-mikrotason ilmiöihin ja edelleen helpompi ymmärtää reaktion energiamuutoksen taustalla olevan ero reaktion lähtöaineiden ja reaktiotuotteiden potentiaalienergioissa.

Entalpiaan liittyy myös laajempi sisäenergian käsite: systeemin sisäenergia on sen kaikkien partikkelien kineettisten ja potentiaalienergioiden summa (Tro, 2008). Tämän ymmärtämistä tukee potentiaalienergia-animaation rinnalla tarkasteltava animaatio hiukkasten liike-energian ilmentymisestä (Kuva 2). Animaatiota voidaan hyödyntää myös muissa yhteyksissä, kun puhutaan atomien ja molekyylien liikkeistä.



Kuva 2 Hiukkasten liike-energia ilmenee aineen rakenneosien lämpöliikkeenä, hiukkasten pyörimisenä sekä sidosten taipumisena ja venymisenä.

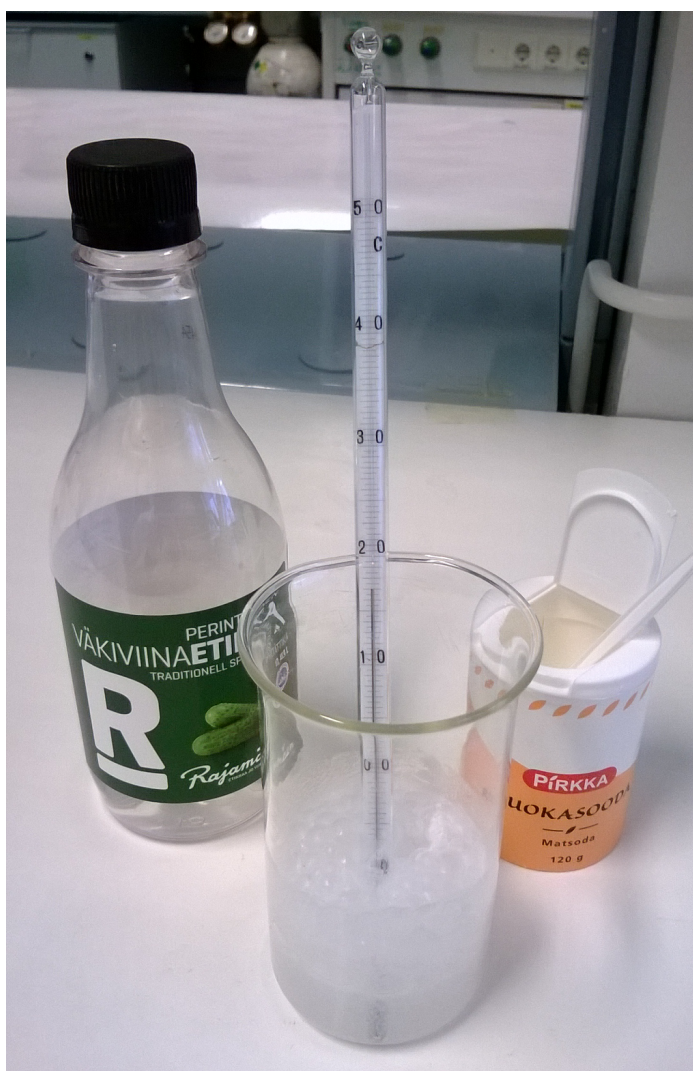
4 Tarkkana eksotermisten ja endotermisten reaktioiden kanssa!

Opiskelijan näkökulmasta ekso- ja endotermisten reaktioiden määritelmät voivat olla hämmentäviä ja herättää kysymyksiä: ”Jos reaktio on endoterminen ja se sitoo lämpöenergiaa, miten reaktioseoksen lämpötila voi laskea?”; ”Toisaalta, jos reaktio on eksotermisen ja se vapauttaa lämpöenergiaa ympäristöön, miten reaktioseos voi kuumentua?” (Chang, 2009)

Mahdollinen syy hämmennykseen on siinä, että ekso- ja endotermisten reaktioiden määritelmät perustuvat oletuksiin, joiden tarkempi käsittely opetuksessa jää helposti taka-

alalle. Jotta opiskelijat voisivat ymmärtää ja käyttää näitä käsitteitä oikein, on heidän ymmärrettävä reaktioiden energian muutokset kemiallisen systeemin ja ympäristön kautta. (Chang, 2009) Vaikka kemistille on ilmeistä, että reaktion lähtöaineet ja tuotteet muodostavat systeemin ja reaktioastia, vesiliuos, käsi tai lämpömittari ympäristön, ei tämä ole selvää aloittelijalle (Chang, 2009; Greenbowe & Meltzer, 2003).

Kemiallisen systeemin ja ympäristön väliset erot on siis syytä ottaa erillisen tarkastelun kohteeksi, jotta mahdolliselta sekaannukselta välttyttäisiin. Tämä onnistuu esimerkkireaktioiden avulla. Niissä opiskelijat itse määrittävät kemiallisen systeemin ja ympäristön (Kuva 3).



Kuva 3 Kemiallisen systeemin ja ympäristön eroja voidaan pohtia esimerkiksi yksinkertaisen ja turvallisen, ruokasoodan ja etikan välisen endotermisen reaktion avulla.

Vaikka kalorimetrisen mittauksen perustuva entalpiamuutoksen määrittäminen onkin melko suoraviivaista, tekevät opiskelijat virheitä kalorimetrilaskuissa jopa yliopistotasolla. Juuri laskujen näennäisen yksinkertaisuuden vuoksi sekä opettajat että

opiskelijat helposti unohtavat kiinnittää tarkempaa huomiota laskujen kannalta oleellisiin asioihin. (Greenbowe & Meltzer, 2003)

Tutkimusten mukaan yleinen opiskelijoiden tekemä virhe vesiliuoksessa tapahtuvan reaktion entalpiamuutosta määritettäessä on se, että veden massan sijaan kaavassa $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ käytetään kokonaismassana m reagenssien massoja (Greenbowe & Meltzer, 2003). Tämä todennäköisesti viittaa juuri ymmärryksen puutteeseen kemiallisen systeemin ja ympäristön käsitteissä (Chang, 2009).

Kemiallisen systeemin ja ympäristön välisen eron sekä ekso- ja endotermisten reaktioiden käsitteiden ymmärtäminen on siis oleellista myös kalorimettilaskujen kannalta. Vasta käsitteellisen ymmärryksen pohjalta reaktion entalpiamuutoksen määrittäminen ja laskeminen ympäristön kautta selkiytyvät. Opiskelijoita on autettava ymmärtämään, että kaavassa $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ lämpötilanmuutos ΔT viittaa koko kalorimetrin sisältöön, jolloin myös massan m , ominaislämpökapasiteetin c ja vesiliuoksen sitoman tai vapauttaman lämpömäärän Q on viitattava koko kalorimetrin sisältöön (Greenbowe & Meltzer, 2003).

Toisaalta opiskelijat eivät kiinnitä tarpeeksi huomiota reaktion entalpiamuutoksen ΔH etumerkkiin. Siksi merkkisääntöjen johdonmukainen huomioiminen on tärkeää. Opiskelijoita voidaan esimerkiksi ohjeistaa pohtimaan määritettävän suureen etumerkki heti kalorimettilaskujen ensimmäisenä vaiheena. (Greenbowe & Meltzer, 2003)

Lähteet

- Bodner, G. M. & Herron, J. D. (2002). Problem-solving in Chemistry. Teoksessa J. K. Gilbert, O. Jong, R. Justi, D. F. Treagust & J. H. Driel (Toim.), *Chemical Education: Towards Research-based Practice* (luku 11, s. 235-266). Alankomaat: Kluwer Academic Publishers.
- BouJaoude, S. & Barakat, H. (2000). Secondary school students' difficulties with stoichiometry. *School Science Review*, 81(296), 91-98.
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C. J. & Woodward, P.M. (2012). *Chemistry, The Central Science (12. painos)*. Lontoo: Pearson Prentice Hall.
- Burke, K. A., Greenbowe, T. J. & Windschitl, M. A. (1998). Developing and Using Conceptual Computer Animations for Chemistry Instruction. *Journal of Chemical Education*, 75(12), 1658-1661.
- Chang, K. (2009). *Learning thermochemistry: Understanding the challenges and promoting its success*. Väitöskirja. University of California, Berkeley.
- Cooper, M. M. & Klymkowsky, M. W. (2013). The Trouble with Chemical Energy: Why Understanding Bond Energies Requires an Interdisciplinary Systems Approach. *CBE – Life Sciences Education*, 12, 306-312.
- Greenbowe, T. J. & Meltzer, D. E. (2003). Student learning of thermochemical concepts in the context of solution calorimetry. *International Journal of Science Education*, 25, 779-800.
- Lundell, J. & Aksela, M. (2004). Molekyylimallinnus kemian opetuksessa, osa 2: Molekyylimallinnus ja energia. *Dimensio*, 1, 53-54.
- Mayer, R. E. & Anderson, R. B. (1991). Animations Need Narrations: An Experimental Test of a Dual-Coding Hypothesis. *Journal of Educational Psychology*, 83(4), 484-490.
- Opetushallitus. (2003). *Lukion opetussuunnitelman perusteet*. Helsinki: Opetushallitus.

- Ryoo, K. & Linn, M. C. (2012). Can Dynamic Visualizations Improve Middle School Students' Understanding of Energy in Photosynthesis? *Journal of Research in Science Teaching*, 49, 218–243
- Tro, N. J. (2008). *Chemistry, A Molecular Approach*. Lontoo: Pearson Prentice Hall.
- Zumdahl, S. S. & Zumdahl, S. A. (2007). *Chemistry (7. painos)*. New York, NY: Houghton Mifflin Company.