

Metallit – Metallien jalostuksen opetus peruskoulussa

Timo Hietala, Nina Lehtinen ja Tiitus Kokkinen

Kemian opettajankoulutusyksikkö, Kemian osasto, Helsingin yliopisto

Tiivistelmä: Tässä projektissa kehitettiin tutkimuspohjaisesti perusopetuksen 7.–9.-luokille soveltuva metallien jalostuksen oppimateriaalia. Projekti toteutettiin osana Helsingin yliopiston kemian opetuksen Kemian käsitteet ja ilmiöt opetuksessa -kurssia. Kemian opetuksen tutkimuskirjallisuuden perusteella pedagogisiksi näkökulmiksi valittiin käsitteet ja kestävä kehitys, ja viitekehystenä opetushallituksen ja neljän koulun opetussuunnitelmat sekä saatavilla olevat opetusmateriaalit. Opetustapahtuma koostui neljästä ennakkotehtävästä: kolme videota metallien ominaisuuksista, jalostuksesta ja kestävästä kehityksestä sekä tutustuminen laadittuun käsittekarttaan, ennakkotehtävien purkamisesta keskustelemalla, laboratoriotyöstä (kuparioksidin pelkistäminen hiilellä) ja työn purkamisesta laatimalla ryhmätöinä aiheesta mind map, josta keskusteltiin käsitteiden yhtenäistämiseksi. Johtopäätöksinä harjoitustyön todettiin soveltuvan hyvin osaksi jalostusprosessin opetusta koska sillä oli suora yhteys teollisiin prosesseihin, ja edelleen kestävä kehityksen ongelmakenttä havainnollistuu hyvin metallien kaivostoiminnan, jalostuksen sekä käytön ja kierrätyksen haasteissa. Arvioitaessa opetusprosessia havaittiin videoiden toimivan hyvin ennakkotehtävinä, joskin tutustuminen koulukirjamateriaaliin olisi syventänyt oppimistapahtumaa, Käytetyssä käsittekartassa oli yhdistetty metallien kemian erilaiset näkökulmat, mutta metallien jalostus olisi kannattanut eriyttää omaksi prosessimaiseksi kuvaukseksi. Mind map toimi työn purkamiseen olettaen, että käsitteiden riippuvuudet käytiin läpi keskustelemalla. Todettiin myös, että ryhmämuistin (havainnot kirjoitetaan esim. seinälle ripustetulle paperille kaikkien näkyviin) käyttö olisi parantanut opetustapahtumaa.

Avainsanat: metallit, metallien jalostus, metallisidos

Metals – Teaching metal refining in basic education

Abstract: In this project, a research-based metal refining learning material was developed for basic education level. The project was a part of the University of Helsinki chemistry education course named Chemistry Concepts and Phenomena. Based on the research literature on chemistry education, concepts and sustainable development were chosen as pedagogical perspectives, and the curriculum for the National Board of Education and four schools, as well as the teaching materials available, were used as the reference framework. The training event consisted of four pre-assignments: three videos on the properties of metals, refining, and sustainable development, and an exploration of the concept map. The event started with debriefing of pre-assignments, followed by laboratory work (reduction of copper oxide by carbon to metallic copper), and finally debriefing session of the work based on preparation of mind-maps in groups and discussion of the concepts learned. In conclusion, the copper reduction exercise was shown to be well suited to teaching the refining process as it had a direct link to industrial processes. Furthermore, the themes of sustainable development are well reflected in environmental and socio-economical challenges related to mining, metal refining and use and circulation of metals. As a teaching process, the videos were found to work well as a pre-task, although familiarization with the textbook material would have deepened the learning event. The concept map used, combined all perspectives on the chemistry of metals, metal refining should have been differentiated as an own concept map. The mind map served to unload the work, assuming that the concepts' dependencies were discussed in group. It was also noted that the use of group memory (writing observations in a paper on the wall visible to all) would have improved the teaching event. **Keywords:** Metals, Metal Refining, Metalbond



1 Johdanto

Metallit ovat keskeinen osa jokapäiväistä arkea. Lähes kaikkiin arkipäivän askareisiin liittyy erilaiset metalliesineet tavalla tai toisella. Jopa historian kehitys jaetaan pronssi- ja rautakausiin aikakausien metalliteknologian perusteella. Nykyaikainen yhteiskunta perustuu sähkön käyttöön energialähteenä lähes kaikissa arjen laitteissa. Sähkön hyödyntäminen perustuu metallien ominaisuuksien ymmärtämiseen.

Metallien merkityksen, ominaisuuksien, käytön ja valmistuksen ymmärtäminen on erittäin tärkeää oppilaiden maailmankuvan kehittymisessä. Kemian opetuksessa metallien kemialla on merkittävä sija suomalaisessa ensimmäisen ja toisen asteen opetuksessa. Tässä tutkimuksessa on tavoitteena tutkia ja löytää keinoja metalleihin liittyvän opetuksen kehittämiseksi. Koska metallit ovat asiakokonaisuutena kovin laaja, fokuksena on metallien valmistuksen ja jalostamisen opetusmateriaalit. Tutkimuksessa pyritään luomaan yleiskuva kemian opetuksen tärkeimmistä tutkimustrendeistä, ja löytämään erityisesti näkökulmia metalleihin liittyvän opetuksen kehittämiseksi ottaen huomioon opetushallituksen opetussuunnitelmien, koulu kohtaisten suunnitelmien, tarjolla olevan koulutusmateriaalin ja koulutusmateriaalin ja kokeneen alueen opettajan näkökulmat. Työssä laaditaan perusasteelle soveltuva opetus kokonaisuus, jossa pyritään muodostamaan oppilaille mielekäs kokonaiskuva metallien valmistuksesta, ja kehittämään kykyä arvioida ja tulkita prosessien yhteiskunnallista merkitystä ja yhteyksiä.

2 Metallit kemian opetuksen tutkimuskirjallisuuden valossa

Kemian opetuksen tutkimuskirjallisuudessa metallit eivät ole kovinkaan vahvasti edustettuna. Tässä tutkitaan kirjallisuuden antia ensin yleisemmältä näkökannalta, pyrkien selvittämään laajemmin kemian opetuksen tutkimuksen painopisteitä (Teo, Goh & Yeo, 2014). Kirjallisuuskatsauksessa käsitellään tarkemmin kestävän kehityksen näkökulmaa (Burmeister, Rauch & Eiliks, 2012), oppimisen variaatioiden teoriaa (Bussey, Orgill & Crippen, 2013), ja metalleihin suoraan liittyvän opetuksen tutkimusta (Jong & Treagust, 2002, Sari, Apipah & Zubarkah, 2019).

2.1 Kemiällisen opetuksen tutkimustrendejä

Teo, Goh ja Yeo (2014) kokosivat artikkelissaan tutkimustrendejä kemian opetuksen alueesta vuosilta 2004–2013. Eniten julkaisut aihepiirit olivat käsitteet ja käsitteiden muutokset, ja pääosa tutkimuksesta kohdistui korkeampaan opetukseen USA:ssa. Artikkelissa tunnistettiin tärkeimmät tutkimustrendit, ja myös tärkeimmät vaikuttajat alalla. Tärkeimmät trendit tutkimuksessa ja tutkittuja strategioita kolmesta tärkeimmästä trendistä on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tärkeimmät kemian oppimisen tutkimustrendit Teo , Goh & Yeo (2014), muokattu

Kategoria	Artikkelit	Ehdotettuja strategioita
Oppiminen: käsitteet ja käsitteiden muutokset	170	"Dual Situated learning Model", analogiat, käsitteiden muokkaukseen orientoidut ohjeistukset, käsittekartat ja kasite tekstit.
Opettaminen	130	Vertaisopetus, yhdessäoppiminen, demonstraatiot, kyselyperustainen-, "hands-on"- , konteksti perustainen- ja ongelmaperustainen oppiminen.
Oppiminen-Luokan kontekstit ja oppijan ominaisuudet	126	Ulkoluku, tarkoituksenmukainen oppiminen, analogioiden käyttö ja opettaja- ja vertais vuorovaikutukset
Tavoitteet ja politiikka: lähteet, evaluaatio ja arvioinnit	106	
Opetuksellinen teknologia	71	
Opettajien koulutus	31	
Kulttuurilliset, sosiaaliset ja sukupuolitekijät	11	
Historia, filosofia ja kemian luonne	4	
Informaali oppiminen	1	

Kaiken kaikkiaan kokooma- artikkelissa olisi voitu tuoda esiin myös opetuksellisia teknologioita ja havaintoja erilaisista johtopäätöksistä mihin tutkitussa materiaalissa oli päästy. Selkeänä havaintona kirjoittajat kuitenkin toteavat, että suurin osa tutkimuksesta oli suunnattu korkea asteen opetukseen. Lisäksi vain vähän tutkimusta oli kohdistettu keinoihin, joilla virheellisten käsitteiden ja konseptien syntymistä voitaisiin estää.

Tässä työssä on tavoitteena kehittää metallien valmistuksen opetusta helpottavaa oppimateriaalia. Teon, Gohin ja Yeon (2014) tutkimus osoittaa erityisesti käsitteiden ja käsitteiden muutosten merkityksen painoarvon opetuksen tutkimuksessa. Myös tässä työssä käsitteet otetaan yhdeksi painopistealueeksi oppimateriaalia kehitettäessä.

2.2 Kestävä kehitys

Kestävä kehitys on tunnustettu yhdeksi vuosikymmenen tärkeimmistä opetuksellisista tavoitteista maailmanlaajuisesti (Burmeister, Rauch & Eiliks, 2012). Kestävän kehityksen tavoitteet on nivottava myös kemian opetukseen. Perinteisesti näkökulmina on käytetty taloudellisia, ympäristöllisiä ja sosiaalisia vaikutuksia. Kemianteollisuuden vaikutus on perinteisesti ollut merkittävä ja kirjoittajat esittävät neljää mallia, joissa kestävän kehityksen ajatusta voi ajaa kemianopetuksessa:

1. ”Vihreän kemian” periaatteiden soveltaminen laboratoriotöissä: pyritään korvaamaan haitalliset kemikaalit vähemmän haitallisilla, ja pitämään määrät pieninä.
2. Kestävän kehityksen strategioiden lisääminen kemian opetukseen.
3. Liittämällä ajankohtaisia yhteiskuntatieteellisiä aiheita kemian opetukseen.
4. Kestävän kehityksen ajattelumallien liittämisen koko opetuksen toimintatapoihin.

Metallien jalostuksen ja käytön yhteiskunnallinen ja ympäristövaikutus on merkittävä. Kestävän kehitykseen liittyviä teemoja voisi olla esimerkiksi kaivosteollisuuden ympäristövaikutus ja yhteiskunnallinen merkitys esimerkiksi kehitysmaissa.

2.3 Oppimisen variaatioiden teoria

Oppimisen variaation näkyy ilmiönä, jossa kaksi samalla tunnilla istunutta oppilasta ymmärtää asiat eri tavalla. Bussey, Orgill & Crippen (2013). Mallissa erotetaan opettajan oletamat oppimisen tavoitteet, oppilaan kokemat oppimiskokemukset ja tuloksena syntyneet oppimistapahtumat. Oppilaat kiinnittävät opetuksessa huomionsa eri asioihin, riippuen aikaisemmasta osaamisesta ja omista mielenkiinnoista. Käytännössä tämä johtaa siihen, että tavoiteltaessa tiettyä oppimistulosta, on syytä kiinnittää huomiota myös oppilaiden taustoihin ja kiinnostuksiin, ja opetustapahtumassa sekä materiaalissa hyödyntää tätä tietoa.

2.4 Metalleihin liittyvä opetuksen tutkimuskirjallisuus

Kirjallisuutta tutkiessa metalleihin liittyvä tutkimuskirjallisuus on hyvin vahvasti painottunut sähkökemiallisten ilmiöiden opetukseen. Taustalla on sähkökemiallisten ilmiöiden haastavuus, ja sähkökemiallisen pidetäänkin yhtenä kaikista haastavimmista

kemian osa-alueista toisen asteen opetuksessa (Jong & Treagust, 2002). Lähtökohtana aihepiirin opetukseen pidetäänkin jakoa kahteen keskeiseen osa-alueeseen: hapetus - pelkistys reaktioihin ja sähkökemialliseen pareihin-galvaaniseen pariin ja elektrolyysiin. Yhtenä oppimisvaikeuksien taustalla olevana keskeisenä syynä kirjoittajat näkevät sen, että lähes kaikilla aihepiirin konsepteilla on erilainen merkitys eri kontekstissa, ja näiden opettajat usein olettavat virheellisesti oppilaan kykenevän tulkitsemaan nämä merkityksien muutokset.

Metallin jalostus prosessien oppimisen haasteina Sari, Apipah ja Zubarkah (2019) mainitsevat konseptin abstraktisuuden, opiskelijakohtaiset tekijät, käytetty media, luennointiprosessi ja käytetyt oppikirjat. Artikkelissaan he tutkivat ABSI (Argument Based Science Inquiry) prosessia metallin jalostusprosessien opiskeluun, jossa tieteellinen oppiminen tapahtuu seitsemän vaiheen kautta:

1. tiedon ja ymmärryksen arviointi ennen varsinaista oppimista
2. osallistuminen harjoitteluun
3. havaintojen ja ajatusten kirjottaminen ylös
4. ajatusten vaihtaminen ja havaintojen vertailu pienryhmissä
5. ajatusten vertaaminen lähdemateriaaliin
6. yksilöllinen reflektointi kirjallisesti
7. tiedon ja ymmärryksen arviointi oppimistapahtuman jälkeen.

Menetelmän avulla metallien jalostusprosessin testitulokset paranivat, mutta myös prosessin syvempi konseptuaalinen ymmärtäminen parani. Vaikka tutkimuksessa keskityttiinkin korkeakouluopiskelijoihin, havainnot soveltunevat myös peruskoulu- ja lukio-opiskelijoihin.

3 Metallit opetussuunnitelmien ja oppikirjamateriaalin valossa

Suomalainen koulujärjestelmä perustuu opetushallituksen (OPH) määrittelemiin opetussuunnitelmiin. Tällä hetkellä perusopetussuunnitelma (POPS) on vuodelta 2014, ja lukion opetussuunnitelmat (LOPS) vuodelta 2016. OPH:n opetussuunnitelmien perusteella koulut laativat omat OPS:t, joissa opetuksen rakenne on kuvattu tarkemmin. Gabel (1999) mukaan käytettävällä oppikirjamateriaalilla ja niiden luomalla rakenteella on myös suuri merkitys oppilaiden käsitemaailman muokkaamisessa. Tässä luvussa tutkitaan metallien

kemian liittyvien opetussuunnitelmien sisältöä ja saatavilla olevan oppikirjamateriaalin vastaavuutta sekä paneudutaan vielä tarkemmin metallien jalostukseen liittyvään materiaaliin.

3.1 Perusopetuksen opetustavoitteet ja materiaali

Opetustavoitteet: Seuraavassa arvioimme perusopetuksen metalleihin liittyvän aihepiirin opetustavoitteita valtakunnallisesti ja koulukohtaisesti, ja tarkastelemme tarjolla olevan oppimateriaalin sisältöjä.

Peruskoulun OPS:ssa kemian opetukselle annetaan tehtäväksi tukea luonnontieteellisen ajattelun ja maailmankuvan kehittämistä. Tavoitteena on kehittää ymmärrystä siitä, miten kemia ja jokapäiväinen elämä, ympäristö ja teknologia liittyvät toisiinsa. Kokonaisuudessaan OPH:n OPS ei juuri anna sisältöjä opetukseen, vaan OPS on laadittu lähinnä pedagogisesta näkökulmasta. Opetussuunnitelman perusteissa ei varsinaisesti ole huomioitu metalleja suoranaisesti, vaikkakin sisältöalueilta löytyy yhteydet metalleihin liittyviin ilmiöihin.

Koska OPH:n perusopetuksen opetussuunnitelma jää sisällöltään köyhäksi, päätimme tutkia koulutason opetussuunnitelmia. Koulujen omat OPS:t rakentavat koulun omien ratkaisujen mukaan tarkempia tai vähemmän tarkkoja sisällöllisiä kokonaisuuksia. OPH:n opetussuunnitelmaa voimakkaammin koulujen omiin opetussuunnitelmiin vaikuttaakin oppikirjojen rakenne. Valitsimme helpon löydettävyyden perusteella tarkemmin tutkittavaksi neljän koulun opetussuunnitelmat.

Helsingin normaalilyseon kemian opetussuunnitelmassa (sivut 607-617) metalleja ja metalleihin liittyviä ilmiöitä ei ollut mitenkään nostettu opetussuunnitelmaan. Muutakin varsinaisia kemian aihepiirin sisällöllisiä opetustavoitteita ei ollut juurikaan yksilöity.

Kulosaaren yhteiskoulun OPS 2016 (Kemia s. 119-122) nosti metallit 8. luokan opetussuunnitelmaan, jolloin aihekokonaisuus painottuu ionisidoksellisiin yhdisteisiin. Kurssin sisältökokonaisuuteen kuuluvat perusasiat hapoista ja emäksistä, metallien ominaisuudet ja reaktion ja kemialliset sovellukset kuten korroosio, sähköpari ja elektrolyysi.

Munkkiniemen yhteiskoulun OPS 2016 (Kemia s. 142-146) metallit löytyvät omana kokonaisuutenaan 9 vuosiluokalta. Oppilas syventää aineiden rakenteen ymmärrystä opiskelemalla metallien ja hiilen yhdisteiden rakennetta ja

ominaisuuksia ja syventää ymmärrystä kemian ilmiöistä ja sovelluksista yhteiskunnan ja teknologian näkökulmista. Matematiikkaluokalla perehdytään tarkemmin metallien merkitykseen teollisuudessa, mm energian tuotannossa.

Olarin yhteiskoulun OPS:ssa on ehkä selkeimmin tuotu metalleihin liittyviä sisältöjä vuosiluokalle 8. OPS:ssa nostetaan esiin mm metallien ja sähkökemiallisten sovellusten, esimerkiksi paristo, akku, elektrolyysi, yhteydet teollisuuteen, käyttöön ja kierrätykseen, ja metallien ominaisuudet.

Oppikirjamateriaali: Sanoma-Pron Kemia, Vihreä Kemia 7-9 on rakentanut metallien kemiaan keskittyvän aineistokokonaisuuden luvussa V. Metallit, joka koostuu kuudesta asiakokonaisuudesta. Ensimmäisessä käsitellään metallien käyttöä materiaaleina, toisessa jännitesarjaa ja metallien jaloutta. Kolmannessa keskitytään pariston ja akun ominaisuuksiin. Neljännessä valmistetaan terästä, viidennessä käsitellään korroosiota ja kuudennessa syvennetään sähkökemian ymmärrystä.

Otavan Titaani 7-9 sarjassa aihepiiri on kokonaisuutena suolat ja metallit. Aihepiirissä tutustutaan happoihin ja emäksiin, suolojen ja neutraloitumisen suhteeseen, valmistetaan malmeista metalleja, tutustutaan metallien ominaisuuksiin, metallien jännitesarjaan ja sähkökemiaan.

Avain, Kemia 2. Toisen vuoden kokonaisuus käsittelee pääasiassa metalleihin liittyviä käsitteitä. Vuosiluokan kokonaisuus alkaa atomilla ja aineen rakenteella, metallien rooli nousee neljännessä luvussa ”ionisidos”. Luku 5 käsittelee kovalenttista sidosta ja metallisidosta, luvussa 7 käsitellään happoja ja emäksiä, 8 neutraloituminen ja suolat, 9 metalli ja niiden käyttö, 10 jalot ja epäjalot metallit, 11 sähkökemian ja 12 korrosio.

Oppikirjojen näkökulma aihepiiriin on pääsääntöisesti sama. Keskeisiksi käsitteiksi nousevat jännitesarja, sähkökemian, korrosio, rakenne, ionisidos ja suolat sekä metallien valmistus ja käyttö. Pääsääntöisesti saatavilla oleva oppimateriaali vastaa hyvin koulukohtaisia OPS:n tavoitteita, jotka oli paljon tarkemmin määriteltyjä kuin OPH:n opetussuunnitelmassa. Vaikuttaakin siltä, että saatavilla olevalla oppimateriaalilla on suurempi merkitys opetuksen ohjaamisessa kuin OPH:n opetussuunnitelmalla.

3.2 Lukio-opetuksen opetustavoitteet ja materiaali

Opetustavoitteet: Lukion Opetussuunnitelma nostaa Metallit esiin KE4-kurssissa materiaalit ja teknologia. Keskeisinä metalleihin liittyvin sisältöinä on kemian merkitys teknologiassa ja yhteiskunnassa, metallien ja polymeerien ominaisuudet, käyttö ja elinkaari, jaksollinen järjestelmä, hapetusluvut – ja hapetus pelkistysreaktiot, sekä sähkökemian keskeiset periaatteet. Sama painotus näkyy myös lukion oppikirjoissa.

Oppikirjamateriaali: Orbitaali sarjan ensimmäinen vuosi keskittyy perusopetuksen kertaamiseen. Omat lukunsa saavat Orbitaali 1:ssä 3.3. Ionisidos, 3.4. metallisidos ja luvussa 4.6. metallit ja epämetallit jaksollisen järjestelmän ja ominaisuuksien kannalta. Sarjan neljännessä osassa, Orbitaali 4, metallit saavan oman lukunsa 1. Metallit, jossa on käyty läpi metallien esiintyminen luonnossa, metallien valmistus ja elinkaari, metallien yleiset ominaisuudet ja metalliseokset, eri jaksollisten ryhmien metallien ominaisuudet.

Moolin ensimmäisessä osassa metalleja käsitellään yksityiskohtaisemmin luvussa 4, jossa käydään läpi alumiinin ominaisuuksia, metallien sulamista, ionisia yhdisteitä. Moolin kolmannessa osassa luvussa 2 käsitellään hapetus - pelkistys reaktioita ja saostumisreaktioita. Neljännessä osassa hapetus ja pelkistysreaktioita ja sähkökemialla käsitellään omana lukunaan. Luvussa neljä käsitellään metalleja materiaaleina syvällisemmin. Muun muassa metallien ominaisuuksia ja prosessointia, sekä siirtymämetallien erityisominaisuuksia, sekä komposiitteja.

3.3 Metallien jalostus

Tässä on tarkoituksena tunnistaa keskeisimmät ilmiöt, jota oppikirjamateriaalissa on käsitelty nimenomaan metallien jalostuksen osalta tavoitteena löytää opetustapahtumaan tuotavat keskeisimmät elementit.

Peruskoulun oppimateriaalissa Kemia-Vihreä Kemia 7-9 (2017) metallit on käsitelty omana lukunaan. Jaksossa V metallien löytyminen luonnossa on käsitelty omana lukunaan. Luvussa käydään läpi metallien historiaa- kaudet, metallien esiintyminen maankuoressa, malmien merkitys sekä metallien ympäristömerkityksiä. Metallien ominaisuudet luvussa käydään läpi kovuus, muokattavuus, läpinäkymättömyys, korkea tiheys, korkea sulamispiste ja hyvä lämmön ja

sähkönjohtavuus. Lisäksi esitellään metallisidos ja korroosio. Metallin jalostus luvussa esitellään malmin louhinta, rikastaminen, rikastusmenetelminä sedimentointi, vaahdotus ja magneettiset menetelmät. Lisäksi esitellään raudan ja kuparin valmistus ja jalostus. raudan jatkojalostamisesta esitellään teräksen karkaisu ja raudan päästäminen. Lopuksi esitellään metalliseosten merkitys ja muutamia metalliseoksia.

Lukion opetusmateriaali, Orbitaali 4 ja Mooli 4 käsittelee metallien valmistusta ja elinkaarta melkoisen seikkaperäisesti. Luvussa käsitellään myös metallien louhintaa ja rikastamista. Kirjassa esitellään metallurgian historiaa ja valmistusmenetelmien valintaa. Metallien esiintymistä käydään läpi melko seikkaperäisesti, malmien rikastusmenetelmiä kuvataan, mm vaahdotus, sedimentointi, magneettinen ja sähkökemiallinen erottaminen ja sentrifugointi. Kirjassa kuvataan pasuttaminen, sulfiittien hapettaminen oksideiksi. Puhdistus menetelminä mainitaan kuumentamista ilmassa, kuumentamista hiilen kanssa (rauta, koboltti ja nikkeli), vedyllä pelkistämällä, pelkistämällä epäjalommalla metallilla (kromi) ja elektrolyyttisellä pelkistyksellä (Alumiini, magnesium).

Kaikkiaan sekä perusasteen, että lukioasteen oppikirjoissa esitellään metallien esiintyminen, ominaisuudet ja jalostus melko perinpohjaisesti ja kattavasti. Lukion oppikirjoissa mennään ehkä hieman syvemmälle ja esitellään useampien metallien valmistusmenetelmät, mutta tasoero perus- ja lukiomateriaalin välillä ei ole kovin suuri. Materiaali on havainnollistava ja kattavaa, joskin on todettava, että kemialliset konseptit jäävät melko vähälle. Esimerkiksi eri vaiheisiin liittyvien kemiallisten ilmiöiden esittely tietoisuina tosi syvempää konseptuaalista ymmärrystä.

4 Metallien jalostus -opettajan näkökulma

Näkökulman antaa helsinkiläisen yhteiskoulun Kemian, Fysiikan ja Matematiikan opettaja jolla on noin 10 vuoden kokemus aihepiirin opetuksesta peruskoulun yläasteella. Alun perin aiheena oli tarkoitus olla metallit yleisemmin. Opettajan neuvo oli kuitenkin supistaa aihetta. Perusopetuksessa Metallit ovat koko jakson mittainen kokonaisuus ja yhteen vertaisopetustapahtumaan on syytä supistaa aihepiiriä. Metallien jalostus aiheena antaa mahdollisuuden tuoda yhteiskunnallinen näkökulma ja kuparin pelkistäminen havainnollista erinomaisesti metallien jalostusprosessia todellisuudessa.

Aiheen käsittelyssä kannattaa seurata oppikirjojen käsittelyprosessia. Käsittelyn aloitus metallien esiintymisestä, louhiminen ja rikastus, sekä metallien valmistus prosessit.

Metallien jalostus tarjoaa mahdollisuuden tarkastella yhteiskunnallista vaikutusta. Pohdintaan kannattaa ottaa jalostusprosessien kustannusvaikutus, metallien esiintymät eri puolilla maailmaa ja millaisia yhteiskunnallisia ja taloudellisia merkityksiä näillä on. Pohdinnassa voidaan tuoda esiin elinkaariajattelu, kestävä kehitys ja kierrätys.

Kuparioksidin pelkistäminen työnä on pedagogisesti toimiva, koska se kuvaa todellista teollista metallien jalostusprosessia, ja sen pohtiminen työn yhteydessä linkittää laboratoriotyön teollisuuden teknologioihin.

Opetuksessa on hyvä kiinnittää huomiota oikeiden käsitteiden käyttöön. Tyypillisiä käsitevirheitä on esimerkiksi raudan rinnastaminen rautamalmiin, mineraalin ja malmin sekoittaminen, teräksen, raakaraudan ja ruostumattoman teräksen erojen ymmärtäminen, rikastamisen ja pelkistämisen ero, metalliseoksen ja metalliyhdisteiden sekoittaminen, hapetus ja pelkistys käsitteiden sekoittaminen.

5 Opetustapahtuma

Tässä toteutetaan opetustapahtuma Helsingin Yliopiston Kemian käsitteet 2019 kurssin vertaisopetustapahtumana. Suunnittelemamme opetustapahtuman tavoitteena on perehdyttää metallien valmistukseen ja jalostukseen kokeellisen työn kautta. Kohderyhmänä on perusopetuksen 8 tai 9 luokka. Toteutettava opetustapahtuma kuitenkin poikkeaa varsinaisesti perusopetustapahtumasta siinä, että tässä käytiin lopussa tarkemman aiheen reflektoinnin sijasta opetustapahtuman pedagogisia perusteluita ja taustalla olevaa tutkimusmateriaalia.

Erityisinä pedagogisina haasteina työn suunnittelussa nostimme esiin käsitteiden oikeellisuuden, jalostus ja käyttöprosessien yhteiskunnallisen merkityksen nostamisen ja käsitteiden variaation minimoimisen.

Pedagogisina sisällöllisinä tavoitteina nostimme metallien jalostusprosessin vaiheiden tunnistamisen, ja metallien jalostuksen yhteiskunnallisen merkityksen tunnistamisen. Tavoitteena on myös nostaa kiinnostusta kemiaan yleisestikin kemiallisten tapahtumien yhteiskunnallisten viitekehysten kautta.

Tavoiteltava tiedon taso (Pernaa, 2011) on tunnistaa metallien valmistukseen liittyviä käsitteitä ja ymmärtää jalostusprosessia. Kognitiivisella tasolla tavoitteena on kyetä ymmärtämään vaiheiden liittymistä toisiinsa, ja analysoida yhteiskunnallista merkitystä.

Opetustapahtumassa pyritään karkeasti hyödyntämään Sari, Apipah ja Zubarkah (2019) esittelemää ABSI kehystä. Arvioidaan keskustelemalla ennakkotehtävien tuomaa tiedon tasoa, toteutetaan suunniteltu harjoitustyö, tavoitteena että oppilaat kirjaavat havainnot työn aikana, työn jälkeen ryhmässä kerätään havaintoja, verrataan ennakkotehtävien informaatiota. Tässä työssä jätetään kuitenkin yksilöllinen kirjallinen reflektointi ja arviointi tekemättä, sen sijaan tutkitaan pedagogista taustamateriaalia.

5.1 Metallien valmistus ja jalostus

Metallien valmistusprosessit alkavat malmien louhinnalla. Malmit ovat sekoitus erilaisia kiviaineksia, joista osa sisältää merkittäviä määriä haluttua metallia yleensä erilaisina mineraaleina (metallien ionisidoksellisina yhdisteinä). Ensimmäisessä vaiheessa haluttua metallia sisältävät malmit erotetaan muusta kiviaineksesta esimerkiksi vaahdottamalla, gravimetrisesti, magneeteilla tai seulonnalla. Tätä kutsutaan malmien rikastamiseksi.

Rikastettu sulfidi muodossa oleva metalli hapetetaan oksidiksi pasuttamalla, jonka jälkeen muodostunut oksidi pelkistetään puhtaaksi metalliksi. Pelkistys menetelmiä on esimerkiksi kuumentaminen sellaisenaan tai hiilen kanssa, elektrolyysi, ja pelkistäminen epäjalommalla metallilla.

Pelkistetty metalli vaatii yleensä jatkojalostusta. Esimerkiksi raudan valmistuksessa poistetaan jäämähiili polttamalla, jolloin saadaan terästä (0,5-1,5% hiiltä), ominaisuuksia muokataan karkaisemalla ja päästämällä, ja sekoittamalla muita metalleja. Esimerkiksi kromia rautaan, jolloin saadaan ruostumatonta terästä.

5.2 Ennakkotehtävät

Opetustapahtuma alustetaan antamalla oppilaille ennakkotehtäviä, joiden tavoitteena on pohjustaa opetettava aihe, antaa valmiiksi keskeinen informaatio.

1. Katso video metallien ominaisuuksista ja metallisidoksista:

https://www.youtube.com/watch?v=YYpWKYM3zU8&feature=emb_logo.

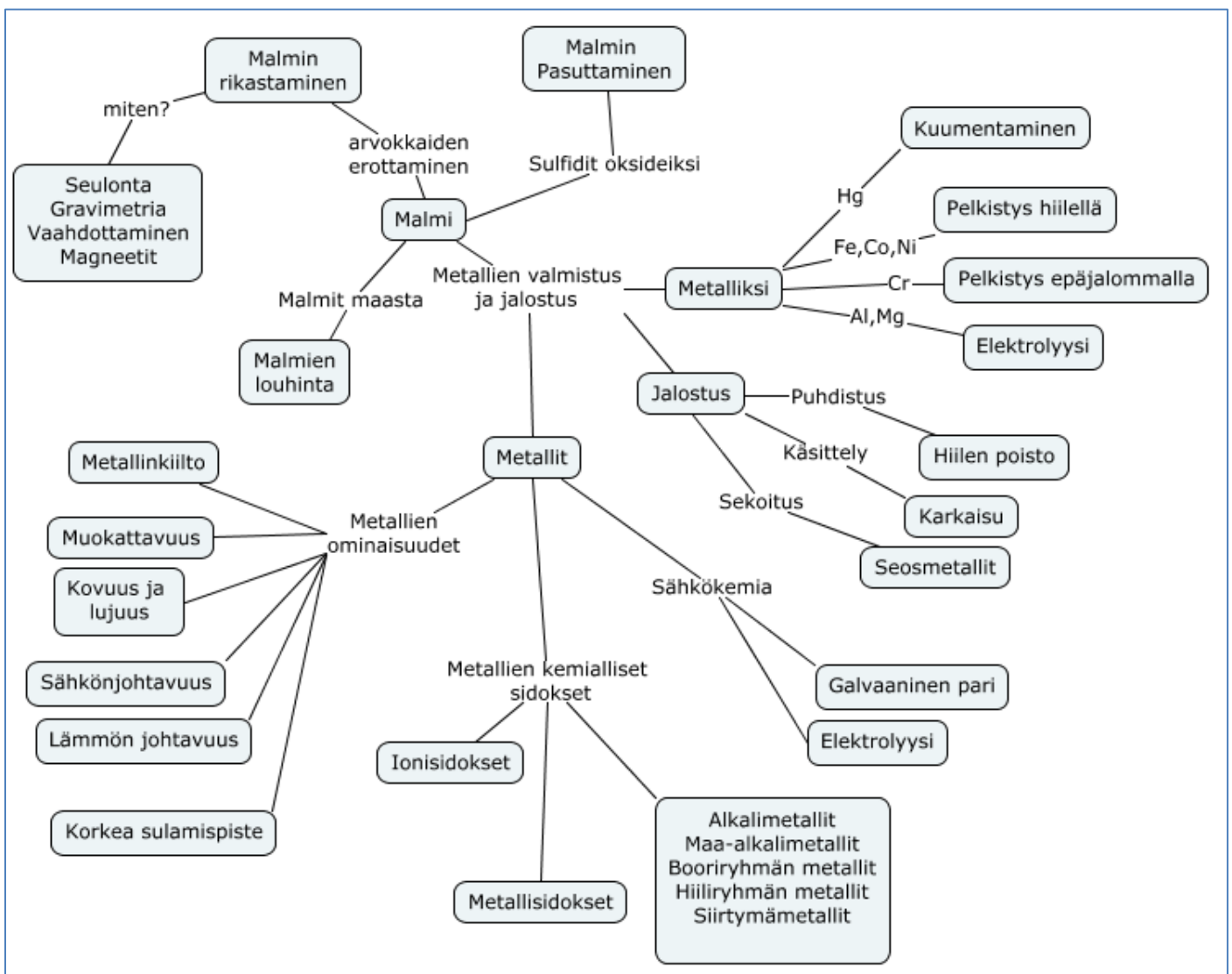
2. Katso video metallien puhdistamisesta:

<https://www.youtube.com/watch?v=MunCyxEORMQ>.

3. Metallinjalostajat rakentavat puhtaampaa tulevaisuutta:

https://www.youtube.com/watch?time_continue=12&v=XsAy-pU-JtI&feature=emb_logo.

Ennakkotehtäväksi annettiin myös tutustua metallien kemian kuvan 1 mukaiseen käsitekarttaan.



Kuva 1. Käsitekartta metallien kemia

Tunnin aluksi keskustellaan ennakkotehtävissä saaduista havainnoista ja pohditaan yhdessä prosesseja. Tähän käytetään noin 10-15 min. Keskustelun pohjaksi esitetään kysymykset

- Mikä on metallien jalostamisen merkitys ympäristön ja yhteiskunnan kannalta?
- Mitä vaiheita metallien jalostamisessa on
- Millaisia ominaisuuksia metalleilla on ja miksi

5.3 Työturvallisuus

Ennen työn esittelyä käydään läpi työturvallisuus. Toteutettavan harjoituksen suurimmat työturvallisuus riskit liittyvät näytteiden kuumentamiseen ja kuumien työvälineiden käsittelyyn. Erityishuomiota on kiinnitettävä käsien ja silmien suojaamiseen. Välttämätön suojavaatetus on suojalasit, suojakäsineet ja suojatakki. Työskentelyn tulee tapahtua vetokaapissa, sillä työssä syntyy kuumia palokaasuja. Koeputki on työssä suunnattava aina pois ihmisistä ja syttyvistä materiaaleista.

5.4 Työn toteutus

Työn aluksi esitellään työn tarvitsemat materiaalit ja työn toteutus. Työn toteutus haomioitavat haasteet on esitelty kuvin.

Itse työssä pelkistetään kupari (II)oksidin hiilen avulla kuparimetalliksi ja hiilidioksidiksi kuumentamalla seos bunsenlampulla. Kun materiaalit on jaettu valmiiksi, itse työn tekemiseen menee noin 10 minuuttia.

Materiaalit

Kokoa materiaalit valmiiksi vetokaappiin. Tarvitset

- Bunsenlamppu ja sytytin
- Huhmare ja survin
- Kellolasi tai upokas
- Kaksi teelusikkaa
- Keitinlasi (=Dekka)
- Koeputkiteline
- Koeputkipihdit
- Suppilo
- Kuumennusta kestävä koeputki (Pyrex, Durex)

- Hiiltä
- Kupari (II) oksidia



Kuva 2. Työhän tarvittavat välineet

Työn toteutus

- Jauha tarvittaessa hiili huhmaressa



Kuva 3. Hiilen jauhaminen

- Mittaa teelusikka kuparioksidia ja puoli teelusikkaa hiiltä ja sekoita hyvin



Kuva 4. Reagenssien sekoittaminen

- Kaada suppilon avulla koeputkeen (käytä vain osa, älä laita liikaa)



Kuva 5. Putken täyttö

- Sytytä bunsen-lamppu. Säädä riittävän kuumaksi



Kuva 6. Bunsenlampun liekki

- Kuumenna koe putkea kunnes hiili-metallioksidi reagoi



Kuva 7. Reaktio

- Anna jäähtyä. Esim. koeputkitelineessä



Kuva 8. Putken jäädyttäminen

- Kaada kellolasille tai upokkaaseen



Kuva 9. Kuparin kerääminen

Tärkeitä huomioita:

- Huomioi työturvallisuus
- Katso, että kaikki tarvikkeet ovat valmiina ennen kuin aloitat
- Sekoita huolellisesti hiili ja kuparioksidi
- **KATSO ETTÄ LIEKKI PALAA KUNNOLLA**
- **ÄLÄ LAITA LIIKAA SEOSTA KOEPUTKEEN**
- Älä hätäile kuparin jäähdytyksessä
- Työn ajaksi voi videolle heijastaa käsitekartan.

5.5 Työn reflektointi

Työn jälkeen oppilaita pyydetään tekemään reaktioyhtälö tapahtumasta. Tähän käytetään vain hetki. Työn jälkeen oppilaita pyydetään tekemään reaktioyhtälö tapahtumasta. Tähän käytetään vain hetki.

Oppilaat kootaan pienryhmiksi ja annetaan tehtäväksi laatia mind map metallien jalostusprosessista. Ryhmätyöskentelyn aikana voi taustalla pyörittää ennakkotehtäviksi annettuja videoita. Mind mapin laatimiseen annetaan 5 minuuttia aikaa, jonka jälkeen aletaan purkaa keskustelemalla. Keskustelun tueksi taustalle heijastetaan ennakkotehtävänä ollut käsitekartta.

5.6 Havainnot opetustapahtumasta

Taulukkoon 2 on koottu havainnot ja kommentteja opetustapahtuman aikana: ennakkotehtävästä, itse harjoitustyöstä, ja työn purusta.

Ennakkotehtäviä oli tehty melko epäsäännöllisesti, ja keskustelu alun viritysvaiheessa oli melko vähäistä. Jos materiaalia käytetään opetuksessa, on syytä painottaa ennakkotehtävien välttämättömyyttä. Jos aikaa riittää, oppimistapahtumaa voisi tehostaa esittämällä videot vielä tunnin aluksi ja käydä vasta sen jälkeen havainnot ja ajatuksia ryhmässä läpi.

Itse työn toteutus sujui hyvin ja syntyvä kirkas metallinen kupari oli erittäin havainnollinen lopputuote ja ryhmät kokivat erittäin positiivisia kokemuksia onnistuneesta työstä.

Lopun reflektiovaiheessa mind map toimi, mutta edellytyksenä oli purkaminen keskustelun kautta, ja käsitekartan käyttö purkamiseen. Kemiallisen reaktion purkaminen jäi vähäiseksi.

Käsitekartta soveltuu metalleihin liittyvien ilmiöiden havainnollistamiseen, mutta metallin jalostusprosessi olisi toiminut paremmin esimerkiksi prosessikaaviona.

Joitain osaprosesseja kuten vaahdotusta olisi voinut kuvata tarkemmin. Samoin toteutetun laboratoriotyön sijaintia metallien jalostusprosessissa olisi voinut avata paremmin. Työ itsessään toimi erittäin hyvin, erityisesti koska menetelmää käytetään sellaisenaan teollisuudessa.

Opetustapahtuman kokonaiskesto oli noin 40 minuuttia.

Itse työn toteutus sujui hyvin ja syntyvä kirkas metallinen kupari oli erittäin havainnollinen lopputuote, ja ryhmät kokivat erittäin positiivisia kokemuksia onnistuneesta työstä.

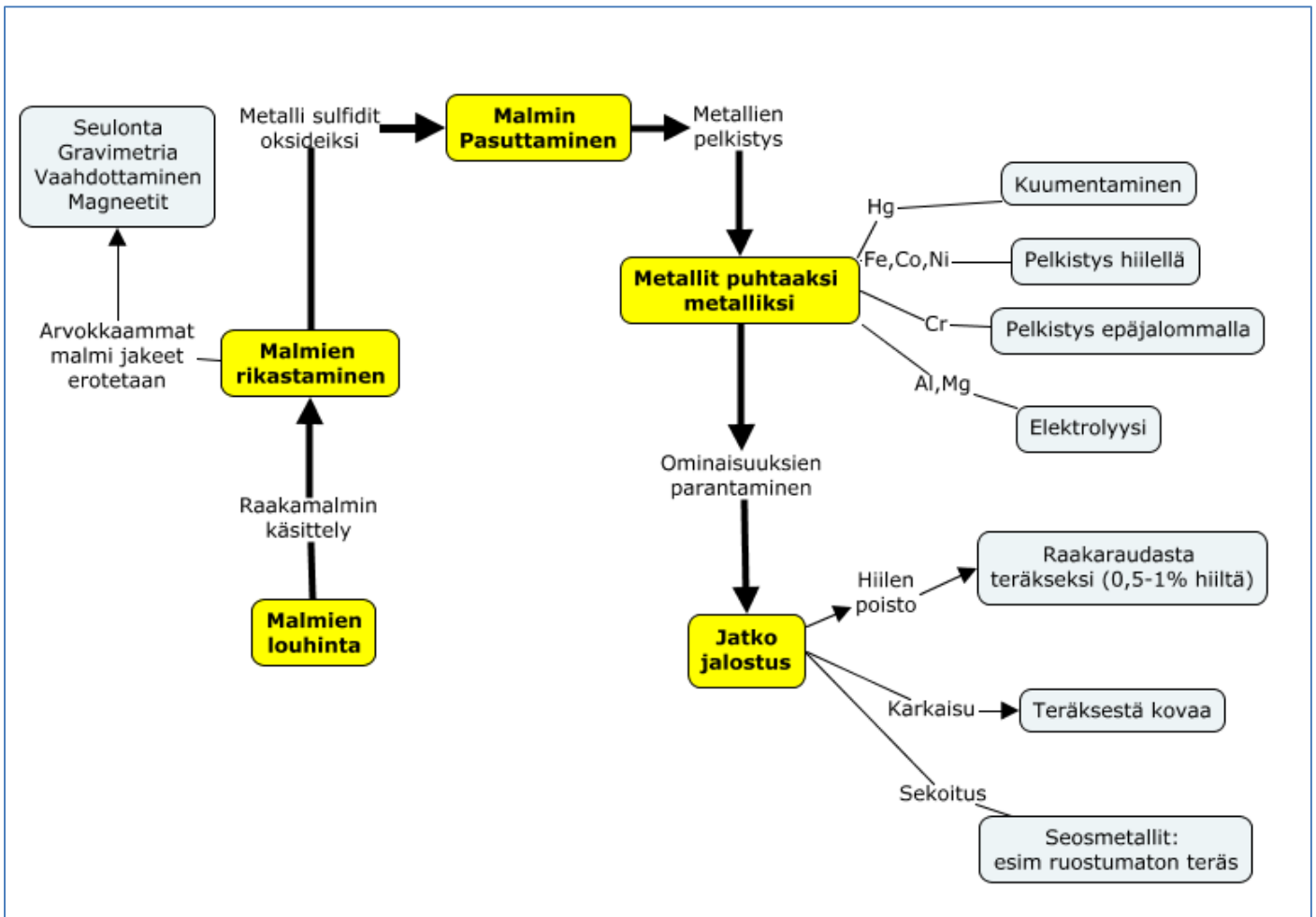
Taulukko 2. Opetus tapahtumasta tehtyjä havaintoja, kommentteja

Vaihe	Havaintoja, kommentteja
Ennakkotehtävän purku	<p>"Monia jalostustapoja, bisnes"</p> <p>"Jaloimpia metalleja saadaan suoraakin (kulta, hopea jne)"</p> <p>"Metallisidoksissa elektroneja jaettu (vain uloimmat), vapaata liikettä atomien välissä. Sidokset vahvoja"</p> <p>"Sähkönjohtavuus, muokattavuus, lämmönjohtavuus, valon heijastus johtuvat elektronien sijoittumisista"</p> <p>Tarkkaa minkä tyyppisillä jalostusmenetelmillä parhaisiin tuloksiin (ympäristö vaikutukset huomioituna)</p> <p>Metalliteollisuus työllistää enemmän miehiä</p> <p>Metalliteollisuus työllistää enemmän miehiä</p> <p>Louhinta ja metallin kerääminen maaperässä ei herättänyt ajatuksia</p> <p>Louhinta, rikastus (halutun aineen prosentuaalisen osuuden maksimointi) ja jalostus (halutun aineen valmistaminen puhtaana) saatiin irti, ei syvällisemmin</p>
Työn toteutus	<p>Konkreettinen työ, yhdistettävissä arkielämään, mieleenpainuva esimerkki, demonakin toimii</p> <p>Työ oli kiva, helppo toistaa opiskelijoiden kanssa, juuri sopivan pituinen (hiilen määrän kanssa täytyy olla tarkka)</p> <p>TyöPohtivat että työmme olisi toiminut myös rautaoksidilla, kupari kuitenkin näyttävämpi</p> <p>Koeputken mietittiin olevan ehkä parempi statiivissa kuin kädessä oppilaiden työturvallisuutta ajatellen</p> <p>Käden polttaminen koeputken pohjassa myös todennäköinen</p>
Työn purku	<p>Rikastus ja jalostus menee sekaisin, huomattiin konkreettisesti, kun ryhmästä sanottiin keskeisen aiheemme olevan rikastus, vaikka todellisuudessa käsitelimme jalostusta</p> <p>Käsitekartta oli ryhmän mielestä hankalasti luettava. Yläosa erityisesti työläs tulkita. Voisi selkiyttää, nuoli tiellä.</p> <p>"Mieluummin kaksi erillistä mind mappii"</p> <p>Itse tehtävä käsitekartta toimivampi, vaiheiden miettiminen ja reaktioyhtälö myös hyviä</p> <p>Ryhmä oli aika vaisu, eivät sanoneet ääneen ajatuksia vaikka, työskentely vaiheessa oli havaittavissa keskustelua</p> <p>Kyseltiin lähintä kaivoksiasta, lohjalla ainakin louhitaan metallia</p>

6 Pohdinta

Tutkimuksen tavoitteiksi oli asetettu kehittää metallien jalostuksen opetusmateriaalia. Taustatutkimuksen perusteella näkökulmiksi valikoituivat käsitteiden ymmärtäminen, oppimisen variaatioiden vähentäminen, kestävän kehityksen nostaminen opetuksessa ja ABSI prosessin soveltaminen opetustapahtumaan.

Käsitteiden oikeanlaista muodostumista ja variaatioiden karsimista pyrittiin tässä työssä edesauttamaan käsitekarttojen avulla. Vaikka ennakkotehtäväksi suunniteltu käsitekartta osoittautui vaikeaselkoiseksi, antoi se kuitenkin alustuksen metallien valmistukseen liittyvästä problematiikasta. Ehkä suurin kehityskohde käytetyssä käsitekartassa oli liian paljon asiaa sullottu samaan. Kehitysehdotuksena saatiinkin metallien valmistuksen ja jalostuksen erottamista omaksi prosessikaaviokseen esimerkiksi kuvan 10 mukaisesti. Työn jälkeisen mind-mapin laatiminen kuitenkin toimi hyvin. Ryhmät joutuivat pohtimaan liittyviä kokonaisuuksia, ja ennakkotehtävän käsitekartasta saatiin tukea mind mappien tekemiseen. Lopputyön purkamiseen olisi ehkä voitu käyttää enemmän aikaa ja laatia ”ryhmämuisti”, eli yhdessä keskustellen rakentaa visuaalisesti esim. seinälle kiinnitetylle A2 paperiarkille yhteinen käsitekartta (esim liimaamalla käsitteet post-it lapuilla sopiviin kohtiin), jolloin yhteinen käsitteistö löytyy. Erityisen selviä varottavia käsitte sekaannuksia ovat metallien rikastamisen ja jalostamisen sekoittaminen, malmien, raakametallien ja metallien sekoittaminen.



Kuva 10. Metallien valmistusprosessi

Kestävän kehityksen nostaminen ennakkotehtävän ja sen purkamisen kautta toimi hyvin. Keskustelemalla ryhmä osallistui paremmin, kyseli ja otti kantaa metallien jalostukseen ja yhteiskuntaan liittyviin asioihin. Esitetty opetusvideo oli kuitenkin enemmän Suomen oman metalliteollisuuden tavoitteita esittävä, joku ehkä provosoivampi olisi voinut toimia paremmin ajatusten herättäjänä. Myös loppukeskusteluun olisi voinut tuoda kestävän kehityksen näkökulman.

ABSI prosessi oli tutkimus artikkelissa (Sari, Apipah & Zubarkah, 2019) suunnattu korkeakouluasteen opiskelijoille metallien jalostusprosessin kouluttamiseksi ja siinä oli tavoitteena selkeästi korkeampitasoinen osaaminen prosessista. Soveltuvien osien prosessia voitiin käyttää myös peruskouluasteen opetuksen suunnittelussa. Erityisesti ennakkotason arviointi, muistiinpanot työn kuluessa, reflektointi ryhmässä ja oman osaamisen kokoaminen kirjoitustehtävällä toimivat myös alemman asteen koulutuksessa.

Tiedon ja kognitiivisen ymmärryksen tasojen saavuttaminen Bloomin taksonomian mukaan (Pernaa, 2011) tässä työssä riippuu hyvin paljon reflektoinnin ohjaamisesta ja käytettyjen materiaalien yksityiskohtaisuudesta. Käsitekartta ei sellaisenaan riitä esimerkiksi muodostamaan metakognitiivista tietoa jalostusprosessissa tapahtuvista reaktioista. Tässä työssä päästiin tiedon tasoilla ehkä prosessitiedon asteelle, mutta ottamalla ennakkomateriaaliin mukaan esimerkiksi kirjasta Kemia-Vihreä Kemia 7-9 (2017) jaksosta V Metallit kappaleet 1 Metallien esiintyminen luonnossa ja 3 Metallien jalostus, voitaisiin käydä läpi vielä laajemmin kemiallisia reaktioita. Opetus tapahtuman lopuksi voisi kertoa tai keskustella vielä liittymäkohdat lukuihin 2. Metallien ominaisuudet, 4. Metallien kierrätys, 5 Metallien reaktioita ja 6 Metallien jalousjärjestys, jolloin myös metakognitiivista tietoa muodostuisi.

Bloomin taksonomian (Pernaa 2011) kognitiivisen prosessin tasolla päästiin tällä opetusmateriaalilla ainakin ymmärryksen tasolle metallien jalostusprosessista. Keskustelu reaktioyhtälöstä ja kokeellisen työn sijoittumisesta nostaa kognitiivista tasoa soveltamisen ja analyysin tasolle. Riippuen tunnin sijoittumisesta opetussuunnitelmassa, eli onko opetustapahtumaa ennen käsitelty ominaisuuksia, reaktioita ja metallien esiintymistä, analyysiä voisi täydentää erilaisten reaktioiden tunnistamiseen eri vaiheissa (sulfidien hapettaminen oksideiksi hapettamisessa, pelkistysreaktiot jne.), ominaisuuksiin liittyviä tekijöitä prosessissa, ja jopa miettiä, miten eri reaktioita voisi hyödyntää jalostusprosessissa, jolloin voitaisiin saavuttaa jopa arvioinnin ja luomisen tasoa.

Kestävän kehityksen näkökulmaa on tässä syytä käsitellä erikseen. Tässä työssä näkökulma saatiin yhdestä videosta. Keskustelussa aihepiiri sai jonkin verran kiinnostusta, mutta tiedon tasolla jäätin käsitetasolle, ja kognitiivisessa prosessissa laajempi erilaisten näkökulmien pohtiminen olisi voinut olla hedelmällistä. Tässä olisi voinut taas toimia seinälle ennakko tehtävän purkamisen yhteydessä piirrettävä ryhmämuisti, johon olisi kerätty erilaisia näkökulmia, joiden yhteiskunnallista merkitystä olisi voitu yhdessä pohtia, jolloin olisi helposti päästy arvioinnin tasolle.

Yleisesti voi todeta, että tehty työ ja sen yhdistäminen metallien valmistus ja jalostusprosesseihin toimii hyvin. Prosessimaisempi eriytetty käsittely jalostusprosessien kuvauksessa toimisi paremmin kuin yleinen käsitekartta, ja ryhmämuistin ja keskustelun käyttö opetustapahtumassa motivoi ja luo parempaa ymmärrystä niin käsitteistä kuin prosessistakin.

Kiitokset

Kiitokset opettajakontaktillemme arvokkaista kokeneen opettajan näkemyksistä.
Kiitokset oppilaskollegoillemme rakentavista näkemyksistä ja parannusehdotuksista.
Kiitokset kurssin vetäjälle aktiivisesta valmennuksesta työn edetessä.

Lähteet

- Teo T., Goh M. & Yeo L. (2014) Chemistry education research trends 2004-2013. *Chemistry Education Research and Practice* 15, 470-487
- Burmeister M, Rauch F & Eilks I (2012). Education for Sustainable Development (ESD) and chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 13, 59-68.
- Bussey T, Orgill M. & Crippen K (2013) Variation theory: A theory of learning and a useful theoretical framework for chemical education research. *Chemistry Education Research and Practice*, 14, 9-22.
- Jong O. & Treagust D. (2002) The Teaching and Learning of Electrochemistry. In J. Gilbert, O. de Jong, R. Justi, D. F. Treagust, & J. H. Driels (Eds.), *Chemical Education: Towards Research-based Practice* (pp. 317-337). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Sari S, Apipah R. & Zubarkah (2019). The learning of metal refinery based on argument-based science inquiry. *Journal of Physics: Conference Series* 1175, 012182, IOP Publishing
- Gabel, D. (1999). Improving Teaching and Learning through Chemistry Education Research: A Look to the Future. *Journal of Chemical Education*, 76(4), 548-554
- Peruskoulun Opetussuunnitelman Perusteet (2014) Opetushallitus
- Lukion Opetussuunnitelman Perusteet (2016) Opetushallitus
- Munkkiniemen Yhteiskoulu (2016) Opetussuunnitelma.
- Kulosaaren yhteiskoulu (2016) Opetussuunnitelma
- Olarin koulu (2016) Opetussuunnitelma
- Helsingin Normaalilyseo (2016) Opetussuunnitelma
- Lampiselkä J., Pernaa J., & Roinine I (2017) Vihreä Kemia 7-9, e-Oppi Oy, ISBN: 978-952-6649-97-9 , <https://peda.net/id/e95d5a8adf8>
- Ikonen, M., Muilu, H. & Virtanen, T. (2018). Titaani 7 - 9.: Otava
- Lampiselkä, Myllyviita & Pernaa (2019) Orbitaali 1: Kemiaa Kaikkialla, e-Oppi Oy
<https://peda.net/id/acab35a8df8>
- Lampiselkä, Myllyviita & Pernaa (2019) Orbitaali 4: Materiaalit ja teknologia, e-Oppi Oy
<https://peda.net/id/cc99fcfodf8>
- Lehtiniemi K. & Turpeenoja L. Mooli 1, Kemiaa Kaikkialla (LOPS 2019) Otava, ISBN 9789511290230
- Pernaa J. (2019) Tieto- ja viestintäteknikkaa kemian opetukseen. Helsingin Yliopisto, Akateeminen väitöskirja (21-25), ISBN 978-952-10-7291-8.