

Tutkimuksellinen lähestymistapa polttokennojen kemian opetukseen

Matleena Ojapalo
Pro gradu -tutkielma
Ohjaaja: Maija Aksela
Kemian opettajankoulutusyksikkö
Kemian laitos
Helsingin yliopisto
29.10.2010

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Laitos Institution – Department Kemian laitos	
Tekijä Författare – Author Matleena Ojapalo			
Työn nimi Arbetets titel – Title Tutkimuksellinen lähestymistapa polttokennojen kemian opetukseen			
Oppiaine Läroämne – Subject Kemia (kemian opetus)			
Työn laji Arbetets art – Level Pro gradu –tutkielma	Aika Datum – Month and year 22.9.2010	Sivumäärä Sidoantal – Number of pages 108 + 47	
Tiivistelmä Referat – Abstract Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli herättää ja tukea nuorten kiinnostusta kemian opiskelua kohtaan. Tutkimuksen teoreettiseen viitekehykseen kuuluu polttokennojen kemiaa, valtakunnallisten opetussuunnitelmien sisällöt ja tavoitteet, tutkimuksellinen kemian opiskelu sekä kiinnostuksen teoria. Polttokennot on ajankohtainen aihe kemian tutkimuksessa. Polttokennojen kehittämiseen kannustavat fossiilisten polttoaineiden ehtyminen, tiukat päästörajoitukset ja energiatehokkuuden parantamisen tavoitteet. Polttokennot liittyvät myös Helsingin yliopiston painopistealueeseen ”vihreään kemiaan”. Polttokennojen kemian opetuksesta ei ole Suomessa aiemmin olemassa oppimateriaalia tai tutkimustietoa. Polttokennoteknologiaa voidaan hyvin opettaa osana valtakunnallisten opetussuunnitelmien perusteita sekä yläkoulussa että lukiossa. Aiheen merkitys on yhdistettävissä arkielämään, yhteiskuntaan ja luontoon sekä sen kautta voidaan innostaa ja saada oppilaat kiinnostumaan kemian opiskelusta. Oppilaiden kiinnostuksen herättäminen ja tukeminen on yksi kemian opetuksen suurimmista haasteista kuten myös opetussuunnitelmien tavoitteiden keskeinen painopistealue. Kemian opetukseen tarvitaan kiinnostusta herättäviä opetusmenetelmiä ja oppimateriaalia. Tässä tutkimuksessa selvitettiin kehittämistutkimuksen kautta, kuinka kehitetty uusi oppimateriaali polttokennojen kemiasta tukee nuorten kiinnostusta. Tutkimusta ohjasi kolme tutkimuskysymystä: 1.) Miten polttokennoja opetetaan yläkoulussa ja lukiossa? 2.) Miten polttokennojen oppimista voidaan mielekkäästi tukea? ja 3.) Minkälainen oppimateriaali polttokennoista kiinnostaa nuoria? Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa suoritettiin tarveanalyysi yläkoulun ja lukion oppikirjoista (31 oppikirjaa) laadullisena sisällönanalyysinä. Tällä haettiin vastaus ensimmäiseen tutkimuskysymykseen. Tutkimuksen toisessa vaiheessa kehitettiin tarveanalyysin pohjalta ja teoriajohtoisesti uusi oppimateriaali polttokennojen kemian opetukseen yläkoululaisille. Oppimateriaalin kehittämistä ohjasi toinen tutkimuskysymys. Kehittämistyössä huomioitiin tutkimuksellisen opiskelun ja kiinnostuksen teorial. Oppimateriaali sisältää kokeellisia oppilastöitä, jotka tehdään pienoismallipolttokennoautoa käyttäen. Töihin on kehitetty kuvallinen ohjekirja sekä tuloskaavake tutkimusten hypoteesien, tulosten ja johtopäätösten kirjaamista varten. Tutkimuksen kolmannessa vaiheessa kehitettyä oppimateriaalia arvioitiin 8-luokkalaisilla oppilailla kyselylomaketta apuna käyttäen ja samalla haettiin vastausta kolmanteen tutkimuskysymykseen. Tutkimus toteutettiin kahtena tutkimuspäivänä keväällä 2010 Mäntsälän Ehnroosin koulun teknologiaviikon kemiapajan yhteydessä. Tutkimuksen otos on 159 oppilasta. Kehittämistutkimuksen tulokset osoittavat kehitetyn oppimateriaalin tukevan nuorten kiinnostusta. Oppilaat kokivat kokeelliset laboratorioaktiviteetit enemmän kiinnostusta tukevaksi kuin päinvastoin. Materiaalin aihekokonaisuuksien kiinnostavuus jakautui sukupuolen mukaan. Polttokennojen sovelluskohteet kiinnostavat enemmän poikia kuin tyttöjä. Sen sijaan tytöt kiinnostuivat poikia enemmän vetyenergiataloudesta ja aiheen ajankohtaisuudesta. Tukemalla tyttöjen kiinnostusta saadaan tutkimuksen mukaan (Osborne & Collins, 2001) myös pojat kiinnostumaan aiheesta. Täten kehitetyn oppimateriaalin mukaisesti opiskeltaessa tulisi korostaa vetyenergiataloutta ja aiheen ajankohtaisuutta. Kehitetty materiaali on sisällöltään ja ulkoasultaan toimiva. Materiaalia pidettiin laajuudeltaan ja kemian vaatimustasoltaan sopivina ja ohjekirjaa sekä työohjeita selkeydeltä ja ulkoasulta keskimäärin hyvänä tai kiitettävänä. Oppimateriaali on sellaisenaan käyttökelpoinen yläkoulun kemian opetuksen tueksi.			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Kemian opetus, polttokennojen kemia, tutkimuksellinen opiskelu, kiinnostus			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsingin yliopisto, Kemian laitos			

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	1
2. POLTTOKENNOJEN KEMIAA	4
2.1 Polttokennojen rakenne	4
2.2. Polttokennojen toimintaperiaate.....	6
2.2.1 Termodynamiikka	8
2.2.2 Kinetiikka	10
2.2.5 Kosteudenhallinta.....	11
2.3 Polttokennotyypit	12
2.3.1 Polymeeripolttokenno (PEMFC)	15
2.3.2 Alkalipolttokenno (AFC)	16
2.3.3 Fosforihappopolttokenno (PAFC).....	18
2.3.4 Sulakarbonaattipolttokenno (MCFC).....	19
2.3.5 Kiinteäoksidipolttokenno (SOFC)	21
2.3.6 Metanolipolttokenno (DMFC)	23
2.3.8 Regeneroitavat polttokennot	24
2.4 Polttokennojen polttoaineet.....	24
2.4.1 Vedyn valmistaminen elektrolyysillä.....	25
2.5 Polttokennojen ympäristövaikutukset	27
2.6 Polttokennojen käyttökohteet.....	30
2.6.1 Kiinteät polttokennosovellukset.....	31
2.6.2 Liikkuvat polttokennosovellukset	32
2.6.3 Kannettavat ja pienitehoiset polttokennosovellukset	35
2.7 Polttokennotutkimus Suomessa	36

3. POLTTOKENNOT OSANA YLÄKOULUN JA LUKION KEMIAN OPETUSTA.....	38
3.1 Kemian opetuksen haasteet	38
3.2 Opetussuunnitelman tavoitteet ja sisällöt.....	41
3.2.1 Yläkoulun opetussuunnitelman perusteet.....	41
3.2.2 Lukion opetussuunnitelman perusteet.....	44
4. TUTKIMUKSELLINEN KEMIAN OPISKELU.....	48
4.1 Kemian tiedon luonne ja rakentuminen	48
4.2 Tutkimuksellinen opiskelu	51
4.2.1 Tutkimuksellisen kokeellisen opiskelun perusperiaatteet	53
4.3 Tutkimuksellisen opiskelun tukeminen, haasteet ja rajoitteet.....	55
5. KIINNOSTUS	58
5.1 Kiinnostuksen merkitys oppimisessa	60
5.2 Kiinnostusta tukeva opetus	61
6. TUTKIMUS	63
6.1 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset.....	63
6.2 Kehittämistutkimus	64
6.2.1 Tutkimuksen toteutus	64
6.2.2 Tarveanalyysi	65
6.2.3 Oppimateriaalin kehittäminen.....	66
6.2.4 Tutkimuksen kohderyhmä.....	70
6.2.5 Tutkimuksen kulku.....	71
6.2.6 Kyselylomake.....	72
6.2.7 Tutkimusaineiston analysointi ja arviointi	73
6.2.8 Oppimateriaalin jatkokehittäminen	74

7. TULOKSET	75
7.1 Polttokennojen kemiaa yläkoulun ja lukion opetuksessa	75
7.1.1 Kemian sisällöt polttokennojen kemiasta	76
7.1.1.1 Kuvat	83
7.1.1.2 Tehtävät	83
7.1.2 Yhteenveto tarveanalyysistä	83
7.2 Kiinnostusta tukevan oppimateriaalin toteutus	84
7.3 Oppimateriaalin arvioinnin tulokset	86
8. TUTKIMUKSEN LUOTETTAVUUDEN TARKASTELU	93
9. JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	95
9.1 Tarve polttokennojen kemian oppimateriaalille	95
9.2 Kehitetty oppimateriaali kiinnostuksen tukena	96
9.3 Tutkimuksen merkitys	99
LÄHTEET	101
LIITTEET	109

1. JOHDANTO

Polttokennotekniikka voi tarjota ratkaisun kasvavaan energiantarpeeseen ja energiatehokkuuden lisäämiseen. Polttokennojen kehittämistyöhön kannustavat myös fossiilisten polttoaineiden ehtyminen sekä tulevaisuuden tiukat päästörajoitukset. Polttokennojen etuna on niiden korkea hyötysuhde ja ympäristöystävällisyys. Niiden käyttämistä polttoaineista saadaan tuotettua paljon energiaa ja reaktion lopputuotteena muodostuu vain vesihöyryä ja lämpöä. Suomi on vahvasti mukana polttokennotutkimuksessa ja meillä tehtävä tutkimus on maailman kärkiluokkaa.

Kouluopetuksessa polttokennot ovat suhteellisen uusi aihe. Sitä ei mainita käsitteenä perusopetuksen tai lukion opetussuunnitelmien perusteiden keskeisissä sisällöissä (Opetushallitus, 2003; Opetushallitus 2004). Polttokennojen kemian opettaminen sopii kuitenkin hyvin opetussuunnitelmien perusteiden asettamien aihealueiden yhteydessä opetettavaksi. Perusopetuksessa näitä aihealueita ovat esimerkiksi *vastuu ympäristöstä, hyvinvoinnista ja kestävästä tulevaisuudesta sekä ihminen ja teknologia* (Opetushallitus 2004).

Kemiaa ei koeta oppiaineena kovinkaan kiinnostavaksi (Aksela & Juvonen, 1999) ja oppilaat kokevat sen opiskelun usein vaikeaksi sen abstraktisuuden vuoksi (Gabel, 1999). Kemian opiskeluun tarvitaan uusia kiinnostusta herättäviä lähestymistapoja. Tutkimuksellisen opiskelun on osoitettu olevan tehokas opetustapa lisätä oppilaiden mielenkiintoa luonnontieteitä kohtaan. Työtavan on todettu myös lisäävän erityisesti tyttöjen kiinnostusta luonnontieteisiin. (Rocard & al., 2007) Kemian käsitteiden oppiminen ja ymmärtäminen tutkimuksellisen kokeellisen opiskelun avulla on myös tehokkaampaa kuin perinteistä kokeellista opetusmenetelmää käytettäessä (Minner & al., 2010).

Tutkimuksellinen opiskelu on työtapa, jossa mallinnetaan tieteelliselle tutkimukselle ominaisia piirteitä. Oppilas omistautuu työlleen kuten oikea tutkija. Opiskelussa yhdistyvät omakohtainen tutkiminen, oppilaskeskeinen opiskelu ja tieteen käsitteiden havaitseminen käytännössä (Minner & al., 2010; Gordon, 1990).

Oppilaiden vähäinen kiinnostus kemiaa kohtaan koetaan huolestuttavana. Kemian kiinnostavuuteen voidaan vaikuttaa muun muassa valitsemalla kiinnostavia työtapoja, käyttämällä mielekkäitä oppimateriaaleja ja valitsemalla opiskelun lähtökohdaksi oppilaita kiinnostavia aiheita (Lavonen & al., 2005). Tähän mennessä Suomessa ei ole saatavilla oppimateriaalia, jossa yhdistäytyisivät tutkimuksellinen opetus ja polttokennojen kemia sekä jossa olisi otettu huomioon oppilaan kiinnostusta herättävät elementit.

Tässä tutkimuksessa kehitettiin oppimateriaalia tutkimukselliseen polttokennojen kemian opetukseen yläkoululaisille. Kehitetyssä oppimateriaalissa tehdään pienimuotoisia tutkimuksia pienoismallivetyautoja hyödyntäen. Oppimateriaalin teemaksi valittiin ympäristönäkökulma. Oppimateriaalille kehitetty kehystarina liittyy ilmastonmuutokseen ja liikenteen päästöjen vähentämiseen. Tutkimuskirjallisuuden mukaan aiheina ilmastonmuutos ja vaihtoehtoiset energianlähteet tukevat varsinkin poikien kiinnostusta (Christidou, 2006). Lisäksi oppimateriaalille luotu konteksti nostaa Gilbertin mukaan (2006) sen mielekkyyttä ja opiskelijoiden motivaatiota. Töiden tavoitteena on oppia polttokennojen kemiaa ja vetyenergiataloutta sekä tukea oppilaiden kiinnostusta innostamalla heitä kemian opiskeluun.

Tutkimus suoritettiin nelivaiheisena kehittämistutkimuksena (Edelson, 2000). Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin, kuinka polttokennojen kemia näkyy yläkoulun ja lukion opetuksessa. Tarveanalyysi tehtiin kouluopetuksessa käytössä olevista 31 oppikirjasta. Kehittämistutkimuksen toisessa vaiheessa kehitettiin kiinnostusta tukeva tutkimuksellisen opiskelun periaatteiden mukainen oppimateriaali yläkoulun polttokennojen kemianopetukseen. Kehittämistyö tukeutui tutkimuskirjallisuuteen ja tarveanalyysistä esiin nousseisiin asioihin.

Kolmannessa tutkimuksen vaiheessa toteutettiin kyselytutkimus 8-luokkalaisilla nuorilla ja selvitettiin sen tuloksista, miten kehitetty oppimateriaali tukee nuorten kiinnostusta ja kuinka onnistuneena he pitivät oppimateriaalin ulkoasua ja sisältöjä. Tutkimuksen viimeisessä, neljännessä, vaiheessa kehitettiin oppimateriaalia edelleen paremmaksi.

Luvut 2-5 muodostavat tämän tutkimuksen teoreettisen viitekehyksen. Luvussa kaksi käsitellään polttokennojen kemiaa siltä osin kuin tarveanalyysin perusteella asioita polttokennojen kemiasta esitetään kouluopetuksen oppikirjoissa. Luvussa kolme esitellään kemian opetuksen haasteita ja tarkastellaan, miten polttokennojen kemia yhdistyy yläkoulun ja lukion opetussuunnitelmien perusteiden mainitsemiin kemian opetuksen aihekokonaisuuksiin, tavoitteisiin ja sisältöihin. Luku neljä käsittelee tutkimuksellista kemian opetusta ja siinä tarkastellaan kemian tiedon luonnetta ja rakentumista. Lisäksi luvussa neljä esitellään tutkimuksellisen kokeellisen opiskelun näkymistä kehitetyssä oppimateriaalissa sekä työtavan haasteita ja rajoitteita. Luvussa viisi käsitellään kiinnostusta, sen syntymistä ja merkitystä oppimisessa sekä, miten kiinnostuksen tukeminen näkyy kehitetyssä polttokennojen kemiaa käsittelevässä oppimateriaalissa.

Luvussa kuusi esitellään tutkimuksen tutkimuskysymykset, selostetaan kehittämistutkimuksen eteneminen. Luvussa seitsemän esitellään kehittämistutkimuksen tulokset. Luvussa kahdeksan tarkastellaan tutkimuksen luotettavuutta ja pätevyyttä. Luku yhdeksän käsittelee tulosten pohjalta tehtyjä johtopäätöksiä ja pohdintoja teoreettisen viitekehyksen rajoissa. Luvussa esitetään lisäksi joitakin tämän tutkimuksen pohjalta nousseita jatkotutkimusaiheita. Tutkielman liitteenä ovat tutkitut oppikirjat, tarveanalyysin taulukoidut tulokset, kehitetty oppimateriaali ja tulostenkirjaamiskaavake, kyselytutkimuksessa käytetty kyselylomake sekä tuloksista tehdyt tilastolliset analyysit ja avointen kysymysten vastaukset.

2. POLTTOKENNOJEN KEMIAA

Polttokennoteknologia tarjoaa energiatehokkaan, ympäristöystävällisen ja useita eri energianlähteitä hyödyntävän ratkaisun jatkuvasti kasvavaan energiantarpeeseen. Polttokennoihin liittyy monien tieteenalojen osaamista. Kemialla on keskeinen merkitys polttokennoteknologian ymmärtämisen kannalta. Tässä luvussa kerrotaan polttokennoista ja siihen liittyvästä kemiasta. Luvun sisältö on rajattu teoriaan, jota tullaan myöhemmin käyttämään tutkimuksen tarveanalyysin teoriapohjana.

2.1 Polttokennojen rakenne

Polttokennon tärkeimmät komponentit ovat anodi, katodi ja niiden väliin sijoittuva elektrolyytti. Anodilla (kennon negatiivinen napa) tapahtuu polttoaineen hapettuminen eli polttoaine, joka toimii pelkistimenä, luovuttaa elektroneja ulkoiseen virtapiiriin. Katodilla (kennon positiivinen napa) tapahtuu hapettimen pelkistyminen eli hapetin vastaanottaa elektroneja. Sähkökemialliset reaktiot tapahtuvat elektrodien kolmifaasirajapinnassa kaasufaasin, elektronijohteen ja ionijohteen välillä. Katalyyttejä käytetään kennossa nopeuttamaan elektrodeilla tapahtuvia reaktioita. Katalyyttinä käytetään usein kallista platinaa. Katalyytin rakenne on usein huokoinen, jotta elektrodeille saavutettaisiin maksimaalinen reaktiopinta-ala. (U.S. Department of Energy, 2000)

Elektrolyytti on sijoittunut polttokennossa elektrodien väliin. Se estää polttoaineen ja hapettimen suoran sekoittumisen ja palamisen, mutta sitä pitkin ionit pääsevät siirtymään elektrodilta toiselle. Ionit liikkuvat elektrolyytin läpi kohti vastakkaismerkkisesti varautunutta elektrodia. Elektrolyytin ioneja johtava materiaali vaihtelee eri polttokennotyyppien välillä. Siirtyvä ioni määräytyy elektrolyytin mukaan. Elektrolyytti voi olla joko positiivisia tai negatiivisia ioneja johtavaa materiaalia. Tämä määrää syntyvätkö reaktiotuotteet anodilla vai katodilla. (Anon., 2001)

Elektrolyytti määrittää ja erottaa eri polttokennotyypit toisistaan. Elektrolyytit voivat olla rakenteeltaan joko nestemäisiä tai kiinteitä. Osa elektrolyyteistä toimii korkeissa lämpötiloissa ja toiset matalissa. Matalalämpöiset polttokennot tarvitsevat usein jalometallikatalyytin nopeuttamaan elektrodireaktioita. Yleisesti katalyyttinä käytetään platinaa. Korkealämpöpolttokennot eivät sen sijaan vaadi platinakatalyyttiä. (Anon., 2001)

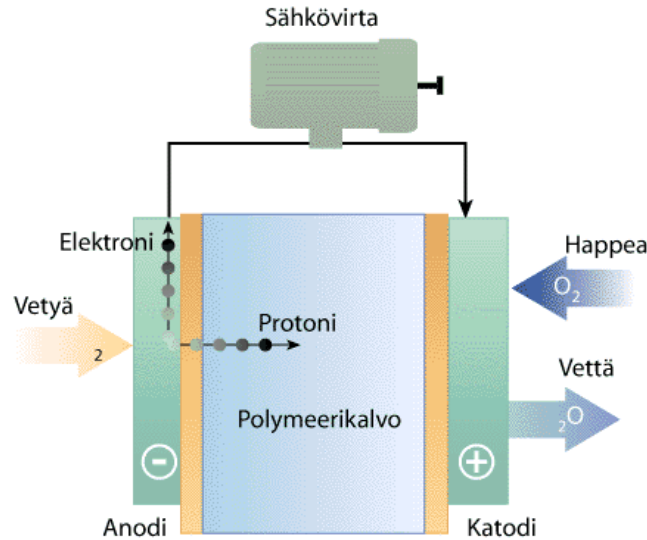
Yhden polttokennon antama jännite on rajallinen, joten yksikkökennoja kytketään sarjaan kennostoiksi antamaan suuremman jännitteen. Kennosto koostuu polttokennosta (elektrodit ja elektrolyytti) ja bipolaarisista levyistä. Elektrodien materiaalien on oltava tarpeeksi huokoisia, jotta lähtöaineet ja reaktiotuotteet pääsevät liikkumaan vapaasti kennossa. Elektrolyyttiltä vaaditaan myös erityisiä ominaisuuksia. Sen on oltava hyvä ionijohde, hyvä sähköneriste, kaasutiivis ja kemiallisesti stabiili. Biopolaariset levyt kytkevät kennot sähköisesti yhteen. Ne ovat valmistettu kevyestä grafiittikomposiittimateriaalista. Niiden tehtävänä on jakaa kaasuvirtaukset tasaisesti kennon pinnalle ja kuljettaa reaktiotuotteet pois kennosta. Levyt toimivat myös esteenä estäen polttoaineen ja hapettimen sekoittumisen keskenään. (U.S. Department of Energy, 2000)

2.2. Polttokennojen toimintaperiaate

Polttokennot ovat sähkökemiallisia laitteita, jotka muuntavat polttoaineen kemiallisen energian sähkökemiallisesti hapettumis-pelkistysreaktiolla suoraan sähköksi ja lämmöksi. Polttokennon anodille syötetty polttoaine hapettuu ja katodille syötetty hapetin pelkistyy. (U.S. Department of Energy, 2000)

Polttokennot muistuttavat laitteena paristoja, mutta ne eroavat niistä muun muassa materiaalien ja toimintaeräteen osalta. Paristoissa anodina ja katodina käytetään metalleja kuten sinkkiä ja litiumia. Paristoiden toimiessa anodi- ja katodimateriaalit kuluvat käytön aikana. Paristojen käyttöaika rajoittuu siihen, kunnes elektrodimateriaalit ovat täydellisesti kulutettu. Polttokennoissa sen sijaan hapetus-pelkistysreaktiot tapahtuvat niin kauan, kun polttoainetta syötetään kennoon. Teoriassa polttokennon käyttöaikaa rajoittaakin ainoastaan kennoon tuotavan polttoaineen saatavuus. (U.S. Department of Energy, 2000)

Polttokennoissa voidaan teoriassa käyttää polttoaineena mitä tahansa nestemäistä tai kaasumaista ainetta, joka pystyy hapettumaan. Käytännössä polttoaineena käytetään yleensä vetyä ja hapettimena suoraan ilmasta saatavaa happea, koska näillä aineilla on korkeat reaktionopeudet. (Corre & Irvine, 2010)



Kuva 2.1. Polttokennon toimintaperiaate (Ojanperä, 2008).

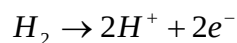
Polttokennon toimintaperiaatteeseen kuuluvat seuraavat vaiheet: (esim. Corre & Irvine, 2010)

- Polttokennon polttoainetta, vetyä, syötetään paineella negatiiviselle elektrodille (anodille) ja hapetinta, happea, syötetään paineella positiiviselle elektrodille (katodille).
- Kun vetyatomit paineen pakottamana kohtaavat anodin pinnalla olevan katalyytin, hajoavat vetymolekyylit kahdeksi vetyioniksi (positiivisesti varautuneiksi ioneiksi) ja kahdeksi negatiivisesti varautuneeksi elektroniksi. Positiivisesti varautuneet protonit kulkeutuvat elektrolyyttikalvon läpi ja yhtyvät katodilla happeen. Negatiivisesti varautuneet elektronit eivät pääse kulkeutumaan positiivisia ioneja johtavan elektrolyyttikalvon läpi, vaan ne pakotetaan kulkemaan ulkoisen virtapiirin ja kuorman läpi katodille. Elektronien kulkeminen virtapiirissä tuottaa sähkövirtaa.
- Kun elektronit ovat kulkeneet läpi virtapiirin, yhtyvät ne katodilla protoneihin sekä happeen muodostaen polttokennon lopputuotteita eli vettä ja lämpöä. Polttokennon reaktiotuotteena syntyy käytettävän polttoaineen palamistuotteita. Jokainen polttokenno tuottaa yksinään vain pienen jännitteen (0,7 Voltia). Kun polttokennoja yhdistetään toisiinsa kennostoiksi, saadaan aikaiseksi suurempia jännitteitä.

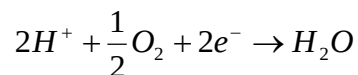
Polttokennojen kemialliset kennoreaktiot riippuvat käytettävästä polttoaineesta ja kennon elektrolyytistä.

2.2.1 Termodynamiikka

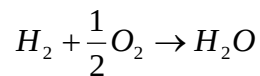
Vety-happityypin polttokennoilla polttokennon anodilla tapahtuu vedyn katalyyttinen hajoamisreaktio, jonka yhteydessä vapautuu elektroneja:



Polttokennon katodilla happi hajoaa katalyyttisesti happiatomeiksi. Happiatomien negatiivinen varaus vetää puoleensa vetyioneja. Ionien yhtyessä syntyy reaktiotuotteena vettä. Reaktioon tarvittavat elektronit saadaan katodille tulevasta ulkoisen virtapiirin tuomasta sähkövirrasta:



Kokonaisreaktiossa vapautuva kemiallinen energia voidaan määrittää teoreettisesti reaktion entalpian muutoksena:



$$\Delta H^o = -285,8 \text{ kJ/mol}; \Delta G^o = -237,2 \text{ kJ/mol}$$

Gibbsin energianmuutos on ilmoitettu standardiolosuhteissa ($T = 25^\circ\text{C}$, $P_{H_2} = 1 \text{ atm}$, $P_{O_2} = 1 \text{ atm}$, H_2O on nestemäisessä olomuodossa).

Polttokennon tehokkuus määritetään jakamalla maksimityö entalpialla:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

Kun käytetään aiemmin annettuja standardiolosuhteiden arvoja ($\Delta H^\circ = -285,8 \text{ kJ/mol}$; $\Delta G^\circ = -237,2 \text{ kJ/mol}$), saadaan termodynaamiseksi maksimaaliseksi hyötysuhteeksi standardiolosuhteissa 83 %. Todellinen hyötysuhde vaihtelee polttokennoilla kuitenkin 45–60 %:n välillä. Standardisen Gibbsin energianmuutoksen arvon avulla voidaan laskea kennon maksimipotentiaali:

$$\Delta G^\circ = -nFE_r^\circ$$

Yhtälössä n on elektronien määrä reaktiossa, F on Faradayn vakio ($96,487 \text{ C/mol}$) ja E_r° on standardi reversiibeli potentiaali. Vety-happi-polttokennolla n on kaksi. Kennon maksimipotentiaaliksi saadaan tällöin $E_r^\circ = 1,229 \text{ V}$. (esim. Blomen ja Mugerwa, 1993)

Reversiibelin potentiaalin arvon (E_r°) muutoksia muuttamalla lämpötilaa ja painetta kuvataan seuraavien yhtälöiden avulla:

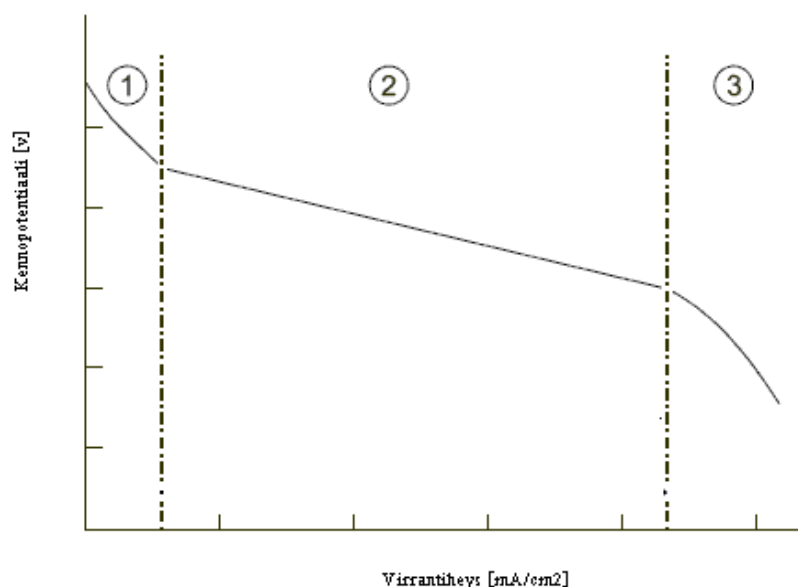
$$E_r = E_r^\circ + \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_p (T - 298) + E_r^\circ + \frac{\Delta S}{nF} (T - 298),$$

$$E_r = E_r^\circ - \frac{(\Delta n)RT}{nF} \ln P$$

Yhtälössä Δn on kaasumolekyylien määrän muutos reaktiossa. Koska entropian arvo on negatiivien ja Δn on $-\frac{3}{2}$, yhtälöiden mukaan reversiibeli potentiaali (E_r°) pienenee lämpötilan noustessa, mutta kasvaa paineen kasvaessa. Näin ollen polttokenno on teoreettisesti tehokkaampi alhaisemmissa lämpötiloissa ja korkeammissa paineissa. (esim. Blomen ja Mugerwa, 1993)

2.2.2 Kinetiikka

Todellinen polttokennon jännite jää teoreettista jännitettä pienemmäksi erilaisten häviömekanismien takia. Polttokennon todellista jännitteen käyttäytymistä kuvataan polarisaatiokäyrällä (kuva 2.2.) eli virrantiheyden funktiona. Kuvaaja on jaettu kolmeen alueeseen, joissa jokaisessa vaikuttaa eri häviömekanismi. (U.S. Department of Energy, 2000)



Kuva 2.2. Polttokennon polarisaatiokäyrä.

Pienillä virrantiheyksillä (alue 1) hallitseva häviömekanismi on aktivaatiopotentiaali. Aktivaatiopotentiaali aiheutuu elektrodien hitaista elektroninsiirtoreaktioista ja häviöitä aiheutuu sekä katodilla että anodilla. Sen suuruus määräytyy elektrodireaktioiden aktivaatioenergioista. Anodilla aiheutuvat häviöt ovat kuitenkin vähäisiä verrattuna katodilla aiheutuviin häviöihin, koska hapen pelkistysreaktio on yli sata kertaa vedyn hapetusreaktiota hitaampi. (U.S. Department of Energy, 2000)

Keskisuurilla virrantiheyksillä (alue 2) polarisaatiokäyrä on lähes lineaarinen. Hallitsevan häviömekanismina ovat Ohmin IR -häviöt, joiden oletetaan noudattavan Ohmin lakia. Häviön suuruuteen vaikuttavat useiden eri komponenttien resistanssit (esimerkiksi elektrodien ja elektrolyyttikalvon) sekä komponenttien väliset kontaktiresistanssit. (Corre & Irvine, 2010)

Polarisaatiokäyrän alueella 3 vaikuttavaa jännitehäviötä kutsutaan diffuusiolympotentiaaliksi. Kun elektrodireaktiot tapahtuvat riittävän nopeasti, ei diffuusio ehdi tasoittaa reaktanttien konsentraatioeroja. Syntyvät konsentraatiogradientit pienentävät katodin ja anodin potentiaaleja. Diffuusiolympotentiaalın suuruuteen vaikuttaa pääasiallisesti reaktanttien ja reaktiotuotteiden hidas kulkeutuminen elektrodille ja sieltä pois. Diffuusiolympotentiaalia voidaan pienentää sopivilla materiaaleilla ja huokoisilla rakenteilla, mitkä vaikuttavat oleellisesti reaktanttien ja reaktiotuotteiden kulkeutumiseen elektrodeille ja sieltä pois. (U.S. Department of Energy, 2000)

2.2.5 Kosteudenhallinta

Vesi on hyvin tärkeä elementti polttokennoille. Elektrodit ja elektrolyytti on pidettävä kosteina, jotta protonien siirtyminen elektrolyyttikalvon läpi tapahtuisi ja polttokenno toimisi ongelmitta (Wannek, 2010). Vesi syötetään kennoon ulkoisesti kostean vetyhöyryn ja/tai ilmavirran mukana. Vetysidosten takia, keskimäärin 1-2.5 vesimolekyyliä syötetään kennoon jokaista protonia kohden. Vesimolekyyli siirtyvät anodilta katodille ”elektro-osmoottisella vedolla”. Vettä virtaa myös takaisin takaisindiffuusion vuoksi, koska veden konsentraatio on katodilla paljon korkeampi kuin anodilla. (Mennola & al., 2004)

Vety-happi-polttokennoissa syntyy sen toiminnan aikana katodilla vettä sähkökemiallisen reaktion lopputuotteena. Tämä ylimääräinen vesi on poistettava kennosta. Vesi poistetaan kennosta katodin kautta joko nesteinä tai vesihöyrynä. Veden poistamiseen on olemassa useita tekniikoita. Jos lämpötila ja virtausnopeus ovat tarpeeksi korkeat, lämmitetty hapetin voi höyrystää reaktiotuotteena syntyneen veden ja kuljettaa sen ulos vesihöyrynä. Jos hapettimen paine ja virtausnopeus ovat tarpeeksi korkeat, nestemäinen vesi voidaan fyysisesti työntää ulos kennosta. Yhtenä ratkaisuna on myös kuljettaa ylimääräistä vettä pois katodilta erillisen hydrofiilisen polymeerin avulla. Kapillaari-ilmion avulla vesi saadaan kulkeutumaan anodille, joka yleensä kuivuu kennossa nopeammin.

Jos kennossa ei ole tarpeeksi vettä, johtaa se elektrodien ja elektrolyyttikalvon kuivumiseen. Tämä voi johtaa edelleen ylikuumenemiseen, virran laskuun ja elektrolyyttikalvon vahingoittumiseen. Toisaalta liiallinen veden määrä voi estää polttoainekaasujen diffundoitumisen elektrodille, joka johtaa heikentyvään sähkönjohtokykyyn.

2.3 Polttokennotyypit

Polttokennoja luokitellaan yleisesti kennoissa käytettävien elektrolyyttien mukaan. Elektrolyytti määrittää, mitkä ovat kalvon läpi kuljetettavat ionit ja niiden kulkusuunnat. Ionien kulkusuunnan perusteella määrytyy edelleen, kummalla elektrodilla reaktion lopputuote eli useimmiten vesi muodostuu. (Corre & Irvine, 2010) Tällä hetkellä tärkeimpiä polttokennotyyppejä on viisi: 1.) polymeeripolttokennot (PEFC) 2.) alkalipolttokennot (AFC) 3.) fosforihappopolttokennot (PAFC) 4.) sulakarbonaattipolttokennot (MCFC) ja 5.) kiinteäoksidipolttokennot (SOFC). (U.S. Department of Energy, 2000) Taulukkoon 2.1 on koottu eri polttokennotyyppien ominaisuuksia.

TAULUKKO 2.1

Polttokennotyyppien ominaisuuksia. (U.S. Department of Energy, 2000)

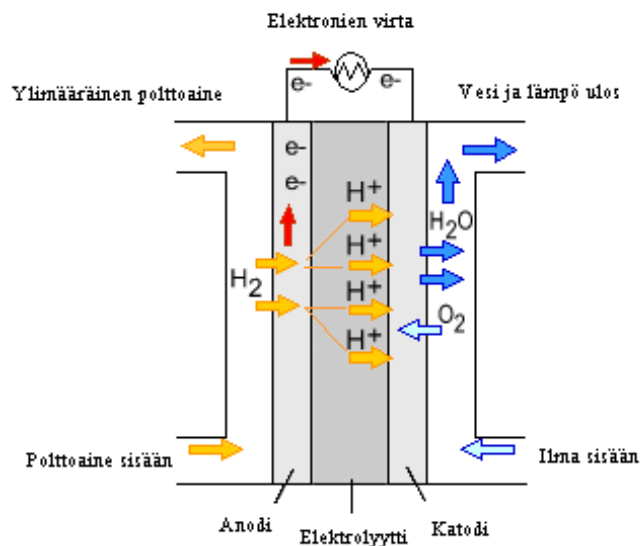
Polttokennotyyppi	PEMFC	AFC	PAFS	MCFC	SOFC
Elektrolyytti	Polymeeri	Kaliumhyd- -roksidi (KOH)	Fosforihappo	Sulakarbo- naatti	Keraaminen materiaali
Polttoaine	H ₂	H ₂	H ₂	H ₂ , CO, CH ₄	H ₂ , CO
Katalyytti	Platina	Platina	Platina	Nikkeli	Nikkeli
Hapetin	O ₂	O ₂	O ₂	O ₂ + CO ₂	O ₂
Käyttölämpötila	40–80 °C	65–220 °C	205 °C	650 °C	600–1000 °C
Varauksen kuljettaja	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Hyötysuhde	40–50 %	89 %	40–50 %	50–60 %	50 %
Käyttökohde	Sähkönjakelu	Avaruus- tekniikka	Sähkönjakelu ja kuljetus	Sähkönjakelu	Sähkönjakelu
Edut	Matala lämpötila, nopea käynnistys, kiinteä elektrolyytti	Nopea reaktio	Jopa 85 % hyötysuhde sähkön ja lämmön yhteistuo- tannossa, epäpuhdaskin H ₂ kelpaa	Korkea lämpötila: voidaan käyttää monenlaisia polttoaineita ja halpaa katalyyttiä	Korkea lämpötila: voidaan käyttää monenlaisia polttoaineita ja halpaa katalyyttiä
Haasteet	Matala lämpötila vaatii kalliin katalyytin, puhdas polttoaine	Ilman CO ₂ vanhentaa elektrolyy- tin	Iso kokoinen, platina katalyytti, pieni teho ja virta.	Korkea lämpötila haasteellinen komponen- teille	Korkea lämpötila haasteellinen komponen- teille

Polttokennoja luokitellaan toisinaan niiden toimintalämpötilan mukaan joko korkealämpöisiin tai matalalämpöisiin polttokennoin. Käyttölämpötila määräytyy polttokennotyyppissä käytettävän elektrolyytin mukaan. Korkealämpöiset polttokennot toimivat yli 600 °C lämpötiloissa. Näissä polttokennotyypeissä sisäinen reformointi on mahdollista keveillä hiilivetypolttoaineilla kuten metaanilla. Sisäisen reformoinnin ansioista ei ole tarvetta erilliselle polttoaineprosessorille ja se mahdollistaa muidenkin kun vain puhtaan vedyn käytön polttoaineena. Tästä syystä myös polttokennon kokonaishyötysuhde kasvaa jopa 15 %. Hyötysuhde nousee entisestään, jos korkealämpöiset polttokennojen toiminnan yhteydessä syntyvä hukkalämpö hyödynnetään muissa tuotantotarkoituksissa. Korkealämpöpolttokennojen reaktiot tapahtuvat nopeasti ja tehokkaasti ilman kallista jalometallikatalyyttiä (esimerkiksi platinaa). Toisaalta myös korkean käyttölämpötilan takia kennosta saatavan energian määrä vähenee. Korkealämpöpolttokennot tuottavat haasteita myös materiaalin valintaan. Vain muutama materiaali kykenee pitkäkestoisesti hajoamatta toimimaan korkealämpöisessä kemiallisessa ympäristössä. Korkealämpöiset polttokennot ovat myös hitaita käynnistymään. Niiden sovelluskohteet ovatkin pääosin paikallaan pysyvissä voimalaitoksissa. Korkealämpöpolttokennotyyppisiin kuuluvat sulakarbonaattipolttokennot (MCFC) sekä kiinteäoksidipolttokennot (SOFC). (Corre & Irvine, 2010)

Matalalämpöiset polttokennot toimivat alle 250 °C lämpötilassa. Näissä polttokennotyypeissä sisäinen reformointi ei ole mahdollinen ja siitä syystä ulkoinen vedynlähde on pakollinen. Matalapolttokennojen kennoreaktiota tarvitsee nopeuttaa katalyytillä. Katalyyttinä käytetään platinaa, joka on kallista ja vaikeasti saatavilla. Toisaalta matalalämpöiset polttokennot käynnistyvät nopeasti, materiaaliongelmaa on vähemmän ja ne ovat helpommin sovellettavissa ajoneuvosovelluksiin. Matalalämpöisiä polttokennotyyppisiä ovat alkalipolttokennot (AFC), fosforihappopolttokennot (PAFC) ja polymeeripolttokennot (PEFC). (Anon., 2001)

2.3.1 Polymeeripolttkenno (PEMFC)

Polymeeripolttkenno (PEMFC, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) on yksi lupaavimmista polttokennoteknologioista. Se on myös eräs yksinkertaisimmista kennotyypeistä. Kennossa käytetään elektrolyyttinä kiinteää sulfonoitua polymeerikalvoa. Elektrolyytti kuljettaa vetyioneja (H^+) anodilta katodille (kuva 2.3).



Kuva 2.3. Kaavakuva vety-happi-polymeeripolttokennosta (US Department of Energy, 2009).

PEM polttokennojen tehokkuus on 40–60% ja ne toimivat matalassa noin 80 °C lämpötilassa. Matalan lämpötilan ansiosta kenno on nopea käynnistymään. Etuina ovat myös hyvä suorituskyky ja nopea reagointi kuorman muutoksiin, vähäinen korroosio sekä kiinteän elektrolyytin käytön helppous. Matalan toimintalämpötilan takia PEM polttokennoissa joudutaan käyttämään katalyyttinä kallista platinaa kemiallisten reaktioiden nopeuttamiseen. PEM polttokennossa tapahtuvat kemialliset reaktiot: (Anon., 2001)

Anodireaktio: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

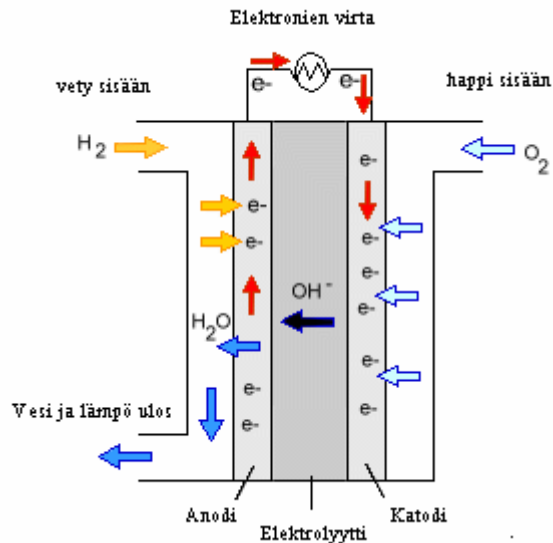
Katodireaktio: $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O$

Kokonaisreaktio: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

PEM polttokennot kestävät hyvin CO₂ pitoisuuksia ja näin ollen hapettimena voidaan käyttää suoraan ilmasta saatavaa happea. Kennon heikkoutena on se, että se ei siedä korkeita hiilimonoksidipitoisuuksia tai rikkipitoisuuksia (1-3ppm). (Garche, 1998) Huonon hiilimonoksidin sietokyvyn takia etanolin tai hiilivetyjen käyttö polttoaineena ei ole mahdollista. Kehitteillä on uusia paremmin hiilimonoksidia kestäviä katalyyttejä (Fuel Cell Europe, 2009).

2.3.2 Alkalipolttokenno (AFC)

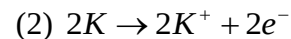
Alkalipolttokenno käyttää elektrolyytinä alkaleita kuten natriumhydroksidia (NaOH) tai kaliumhydroksidia (KOH). Hydroksidi ionit (OH⁻) kulkeutuvat elektrolyyttikalvon läpi katodilta anodille (Kuva 2.4). Kennon elektrodeilla katalyyttinä käytetään hopeaa tai nikkeliä. Kenno toimii noin 70 °C lämpötilassa ja pystyy tuottamaan 1,1–1,2 VDC jännitteen. (Anon., 2001) Alkalipolttokennojen hyötysuhde on 45–60 %. (FCTec, 2010)



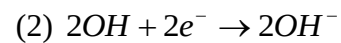
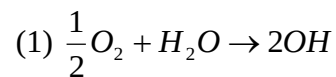
Kuva 2.4. Kaavakuva alkalipolttokennosta (AFC) (US Department of Energy, 2009).

Alkalipolttokennon heikkoutena on, että ne eivät kestä juuri lainkaan hiilidioksidia (CO_2). Kennoon sitä voi joutua polttoaineen tai ilmasta tulevan hapen mukana. Kennoon pääsevä hiilidioksidi reagoi elektrolyytin kanssa ja muodostaa karbonaattisuolaa, joka vaikuttaa elektrolyytin toimintaan ja heikentää kennon toimintaa. (FCTec, 2010) Kennossa on tästä syystä käytettävä puhdasta happea hapettimena tai ilmasta otettava happi on puhdistettava CO_2 kaasuista ennen polttokennoon syöttöä. Vastaavasti polttoaineena voidaan käyttää vain puhdasta vetyä. (Anon., 2001)

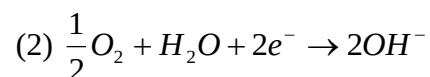
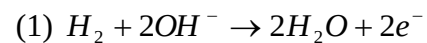
Alkalipolttokennossa tapahtuvat anodireaktiot: (1) $\text{H}_2 + 2\text{K}^+ + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{K} + 2\text{H}_2\text{O}$



Katodireaktiot:

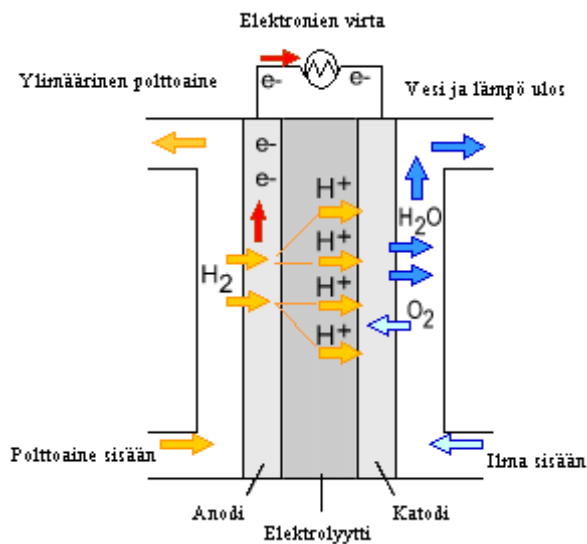


Kennon kokonaisreaktiot:



2.3.3 Fosforihappopolttokenno (PAFC)

Fosforihappopolttokennot käyttävät nimensä mukaan elektrolyyttinä fosforihappoa, joka voi olla konsentraatioltaan jopa 100 % (FCTec, 2010). Elektrolyytti kuljettaa vetyioneja (H^+) anodilta katodille (Kuva 2.5.). Kennoissa käytetään platinaa katalyyttinä molemmilla elektrodeilla. Fosforihappopolttokennot toimivat 150–220 °C lämpötilassa, koska alemmissa lämpötiloissa fosforihappo johtaa huonosti ioneja. Suhteellisen korkea toimintalämpötila mahdollistaa sähkön ja lämmön yhteistuotannossa erittäin korkean, 85 %, hyötysuhteen. (FCTec, 2010)



Kuva 2.5. Kaavakuva fosforipolttokennosta (PAFC) (US Department of Energy, 2009).

Fosforihappopolttokennossa käytettävät platinaelektrodit ovat herkkiä hiilidioksidille, mutta siitä ei ole kuitenkaan haittaa kennolle. (FCTec, 2010) Hiilimonoksidi (CO) on sen sijaan myrkyä katalyytille ja sen pitoisuuden on oltava alle 3-5 tilavuusprosenttia. (Hirschenhofer & al., 1994)

Fosforihappopolttokennossa tapahtuvat kennoreaktiot, kun polttoaineena käytetään vetyä ja hapettimena happea. (Anon., 2001)

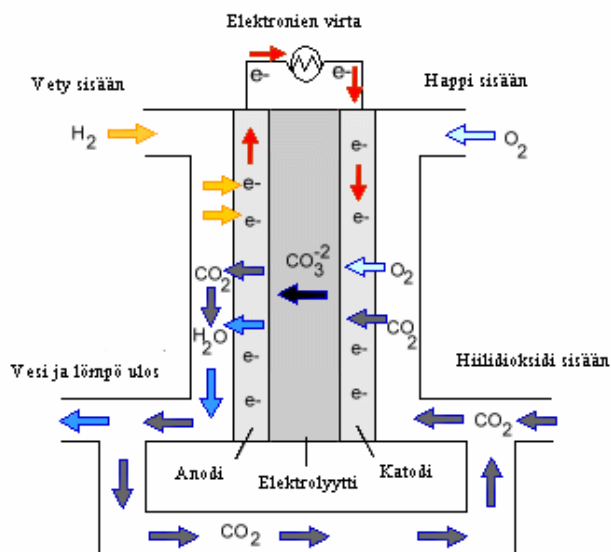
Anodireaktio: $(1) H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Katodireaktio: $(1) \frac{1}{2} O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O$

Kokonaisreaktio: $(1) H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$

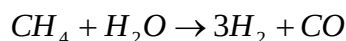
2.3.4 Sulakarbonaattipolttokenno (MCFC)

Sulakarbonaattipolttokennossa elektrolyytinä toimii keraamisessa matriisissa oleva alkalikarbonaattiseos (litium- (Li_2CO_3) ja kaliumkarbonaatin (K_2CO_3) seos), joka kuljettaa karbonaatti-ioneita (CO_3^{2-}) katodilta anodille (Kuva 2.6.). Katalyytteinä käytössä ovat edullinen nikkeli (anodilla) ja nikkelioksidi (katodilla). (Anon., 2001)

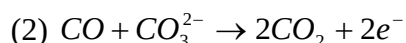
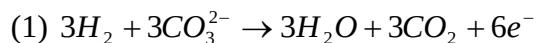


Kuva 2.6. Kaavakuva sulakarbonaattipolttokennosta (MCFC) (US Department of Energy, 2009).

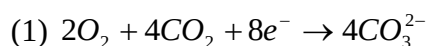
MCFC toimii puhtaalla vedyllä sekä kevyillä hiilivetypolttoaineilla, kuten metaanilla. Kun metaanipolttoainetta syötetään anodille veden läsnä ollessa, se absorboi lämpöä ja läpikäy höyryreformointireaktion: (Anon., 2001)



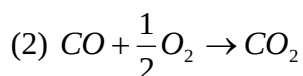
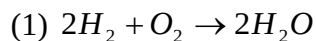
Anodilla tapahtuvat reaktiot:



Katodilla tapahtuva reaktio:



Kennon kokonaisreaktio:



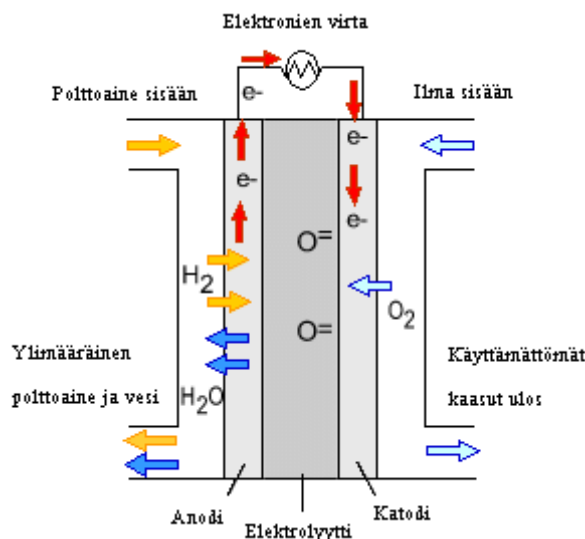
Polttokenno tuottaa reaktiotuotteena hiilidioksidia silloin, kun käytetään hiilivetypohjaista polttoainetta. (Anon., 2001)

DMFC toimivat korkeassa 650–700° C lämpötilassa. Korkean käyttölämpötilan ansiosta kennon polttoaineena voidaan käyttää suoraan maakaasua ilman sen esikäsittelyä. Sisäinen reformointi on mahdollinen katalyytin läsnä ollessa. Näin säästytään erilliseltä polttoaineen valmistukselta. Hiilimonoksidi (CO) tai hiilidioksidi (CO₂) eivät ole myrkyllistä systeemille, mutta rikki (H₂S ja COS) on haitaksi anodille jos sen pitoisuudet ylittävät 1-5 ppm (Hirschenhofer et al., 1994). Rikkiyhdisteitä muodostuu esimerkiksi polttoaineen sisäisessä reformoinnissa. (FCTec, 2010)

Sulakarbonaattipolttokennon korkeasta käyttölämpötilasta on sekä hyötyä että haittaa. Sen ansiosta kennon hyötysuhde on 45–60 % ja toiminnassa syntyvän hukkalämmön käyttäminen edelleen lämmön tai sähkön tuotannossa nousee hyötysuhde 85 %:iin (Fuel Cell Europe, 2009). Lisäksi kennossa voidaan käyttää katalyyttinä edullisempaa nikkeliä platinan sijaan (FCTec, 2010). Toisaalta korkea käyttölämpötila vaikuttaa kennon kestävyys. Korkea lämpötila ja korroosiota aiheuttava elektrolyytti nopeuttavat kennon komponenttien hajoamista, mikä lyhentää kennon käyttöikää. (Fuel Cell Europe, 2009)

2.3.5 Kiinteäoksidipolttokenno (SOFC)

Kiinteäoksidipolttokennosysteemit toimivat eri polttokennotyypeistä kaikkein korkeimmissa lämpötiloissa (700–1000 °C), jolloin kennoreaktioita nopeuttavaa katalyyttiä ei tarvita. Elektrolyyttinä käytetään keraamista materiaalia, joka on yrittiumilla stabiloitua zirkoniumia. Elektrolyytti kuljettaa oksidi-ioneja (O^{2-}) katodilta anodille (Kuva 2.7.). Elektrodien materiaaleina käytetään metalleja kuten nikkeliä ja kobolttia. (Anon., 2001)

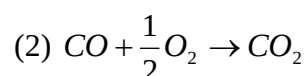
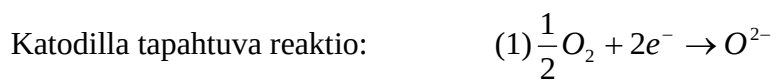


Kuva 2.7. Kaavakuva kiinteäoksidipolttokennosta (SOFC) (US Department of Energy, 2009).

SOFC systeemit eroavat muista polttokennosysteemeistä olemalla kaksifaasi systeemejä (kiinteä ja kaasu), kun muut ovat usein kolmifaasisysteemejä. SOFC voidaan pitää näin ollen yksinkertaisempaan polttokennomallina. (Anon., 2001)

Korkean käyttölämpötilan ansiosta, SOFC voi reformoida hiilivetypolttoaineen sisäisesti ilman katalyyttiä. Tästä syystä systeemi toimii mieluummin hiilivetypolttoaineella kuin puhtaalla vedyllä. (Garche, 1998) Kiinteäoksidipolttokenno käyttää polttoaineena siis joko puhdasta vetyä tai hiilivetypolttoaineita, kuten MCFC tyyppin polttokennosysteemit. (Anon., 2001)

Anodilla tapahtuvat reaktiot:

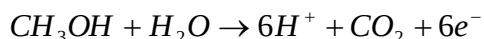


SOFC tyyppin polttokennot ovat sähköntuotannon hyötysuhteessa (60 %) yksi parhaimmista. Kennon tuottama hukkalämpö hyödynnetään esimerkiksi höyrygeneraattorien käyttöön. Järjestelmissä, joissa kennon tuottama hukkalämpö hyödynnetään, päästään jopa 80–85 % hyötysuhteeseen. (Fuel Cell Europe, 2009)

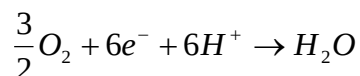
2.3.6 Metanolipolttokenno (DMFC)

Metanolipolttokennot ovat muunnoksia PEM polttokennoista. Kennon rakenne, elektrolyytti ja katodireaktio ovat näissä polttokennotyypeissä samoja. Metanolipolttokennot käyttävät polttoaineenaan metanolia vedyn sijasta ja tästä syystä kennon anodireaktio on erilainen. (Anon., 2001) Metanolipolttokenno muuttaa nestemäisen metanolipolttoaineen suoraan sähkövirraksi ja se on toiminnaltaan helppokäyttöinen, koska erillistä polttoaineen reformointia ei tarvita (Mergel & al., 2010). Vaikka metanolipolttokennoilla saadaankin tuotettu vähemmän energiaa kuin vetyä polttoaineenaan käyttävällä kennolla, on sen etuna polttoaineen yksinkertaisempi varastointi ja tuotantoprosessi.

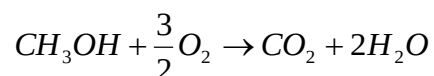
Metanolipolttokennossa anodille syötetään nestemäistä metanolin ja veden seosta ja katodille ilmaa suoraan ulkoilmasta. Kenno toimii 130 °C lämpötilassa ja tarvitsee platinakatalyytin, joka hajottaa metanolin anodilla muodostaen hiilidioksidia: (Anon., 2001)



Ilman happi ionisoituu ja reagoi vedestä saatavan vedyn kanssa katodilla:



Kennon kokonaisreaktiossa syntyy vettä ja hiilidioksidia:



Metanolipolttokennon suurin ongelma on se, että metanolin hapettuminen tuottaa välituotteena vetykarbonaattihiukkasia, jotka ovat myrkyä elektrodille. Toinen ongelmakohta on, että metanolimolekyylit diffundoituvat helposti elektrolyytin läpi, jolloin jopa 30 % metanolista menetetään. Metanolipolttokennot saadaan tällä hetkellä tuottamaan 50 °C lämpötilassa 0,4 V jännitteen tehoalueen ollessa 50 mWcm⁻², jos lämpötilaa nostetaan korkeammaksi (70–80 °C), silloin saavutetaan 80–100 mWcm⁻² teho (Kim & al., 2009).

2.3.8 Regeneroitavat polttokennot

Regeneroitavissa vety-happipolttokennoissa sama kenno toimii polttokennona ja käänteisessä reaktiossa vetyä tuottavana elektrolysaattorina. Järjestelmä voidaan muodostaa myös kahdesta rinnakkaisesta kennosta, joista toinen toimii polttokennona ja toinen elektrolyysikennona. (Alanen *ym.*, 2003)

2.4 Polttokennojen polttoaineet

Polttokennojen polttoaineena voidaan käyttää puhdasta vetyä tai hiilivety pohjaisia kaasuja sekä nesteitä kuten metaania, hiilidioksidia, hiilimonoksidia, etanolia ja metanolia. Korkealämpötilapolttokennot voivat käyttää polttoaineena vedyn ja hiilivetyjen seoksia, mutta esimerkiksi PEM -polttokenno tarvitsee polttoaineeksi puhdasta vetyä. Hiilivety pohjaisia polttoaineita käytettäessä polttoaine on tällöin muutettava polttokennolle sopivaan muotoon reformerissa. Reformoinnissa polttoaine muutetaan vetyrikkaiksi reformaateiksi.

Metanolia käytetään polttokennojen polttoaineena syystä, että sitä on helpompi käsitellä nestemäiseen vetyyn verrattuna ja toisaalta se vie vähemmän tilaa kaasumaiseen vetyyn verrattuna. Metanolia voidaan käyttää sellaisenaan polttoaineena metanolipolttokennoissa ilman erillistä polttoaineen reformointia (Mergel & al., 2010). Metanolin heikkoutena on sen alhainen energiasisältö.

Polttokennojen polttoaineista puhuttaessa puhutaan usein myös vetyenergiataloudesta. Vetyenergiataloudella tarkoitetaan energijärjestelmää, jossa vety toimii sähkön ohella energiankantajana. Vedyn kuljetuksen ja varastoinnin yhteydessä puhutaan jakeluorganisaatioista. Vedyn käytön yleistymisen esteenä ovat jakeluorganisaatioiden puuttuminen. Lisäksi vedynkäytön turvallisuutta, hintatehokkuutta ja energiatehokkuusratkaisuja tulee edelleen kehittää. (Barbier, 2010)

Vety ei ole primäärienergianlähde eli sitä ei esiinny maapallolla sellaisenaan. Vety pitää ensiksi valmistaa, jotta sitä voidaan käyttää polttoaineena. Se on aina erotettava yhdisteistä ja erottaminen vaatii energiaa. Suurin osa maapallon vedystä on sitoutuneena vedessä. Sitä voidaan erottaa myös erilaisista hiilivedyistä kuten öljystä ja maakaasusta.

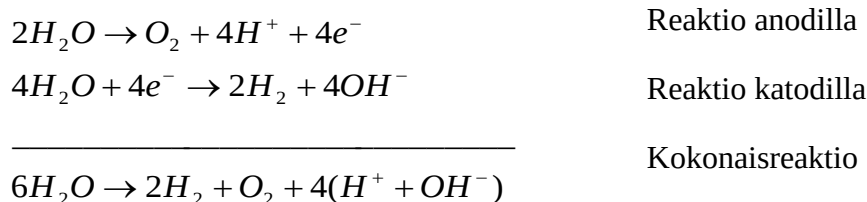
Vety kiinnostaa tulevaisuuden polttoaineena, koska sen käytöstä ei aiheudu lainkaan kasvihuonepäästöjä, ainoastaan vesihöyryä. Vedyn etuna on myös sen suuri energiasisältö massayksikköä kohti, 119 MJ/kg, verrattuna muihin käytössä oleviin polttoaineisiin (maakaasu 50 MJ/kg; bensiini 43 MJ/kg). Vedyn haasteena on kaasumaisen vedyn tiheys, joka aiheuttaa ongelmia sen varastoinnissa ja kuljetuksessa.

Tällä hetkellä suurin osa vedystä tuotetaan hiilivetyjen höyryreformoinnilla. Puhtaimmin vetyä voidaan erottaa veden elektrolyysillä, kun siihen tarvittava sähkö tuotetaan uusiutuvilla energiamuodoilla kuten auringon säteilyenergialla, tuulienergialla tai vesivoimalla (Alanen *ym.*, 2003).

2.4.1 Vedyn valmistaminen elektrolyysillä

Veden elektrolyysi on saasteeton tapa valmistaa vetyä sähkön avulla. Oletuksena on, että prosessiin tarvittava sähkö on tuotettu saasteettomasti, esimerkiksi aurinko- tai tuulienergialla. Edullisin tapa tuottaa vetyä on metaanin höyryreformointi, minkä kanssa elektrolyysi ei kykene kilpailemaan hinnassa. Elektrolyysi on kuitenkin käytössä oleva vedyntuotantotapa silloin, kun halutaan valmistaa erittäin puhdasta vetyä. (Smolinka & al., 2010)

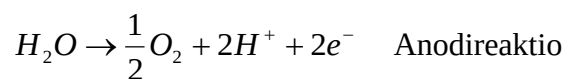
Perinteisessä veden elektrolyysissä veteen (tehty alkaliseksi) johdetaan sähkövirtaa elektrodien kautta. Tämän seurauksena vesimolekyylien vety pelkistyy negatiivisella elektrodilla eli katodilla ja happi hapettuu positiivisella elektrodilla eli anodilla. (esim. Zumdahl & Zumdahl, 2003)



Normaalin elektrolyysin hyötysuhde on noin 80–85%. Hyötysuhdetta voidaan parantaa nostamalla elektrolyysin lämpötilaa, jolloin prosessia kutsutaan höyryelektrolyysiksi. Tällöin hyötysuhteeksi voidaan saada 92 %. Vain noin 4 % maailman vedystä valmistetaan elektrolyysillä. (Padro ja Putche, 1999)

Vedyn elektrolyyttinen tuotanto on alkanut jälleen kiinnostaa tutkijoita muun muassa uusiutuvien energianlähteiden kuten tuuli- ja aurinkoenergian hyödyntämisen myötä sekä polttokennojen kaupallistumisen takia. Uusiutuvien energianlähteiden energiaa voidaan hyödyntää elektrolyysiin, jolloin vety toimii väliaikaisena energiavarastona. Varastointivety toimii energianlähteenä erilaisille polttokennojen sovelluksille kuten ajoneuvojen ja voimalaitosten käyttöön. Vedyn elektrolyyttisen tuotannon katsotaan kuuluvat tärkeäksi osaksi tulevaisuuden energiamarkkinoita. (Smolinka & al., 2010)

Suhteellisen uusi tapa tuottaa vetyä on PEM -elektrolyysikennon avulla. Vetyä tuotetaan PEM -polttokennon käänteisreaktioilla: (Smolinka & al., 2010)



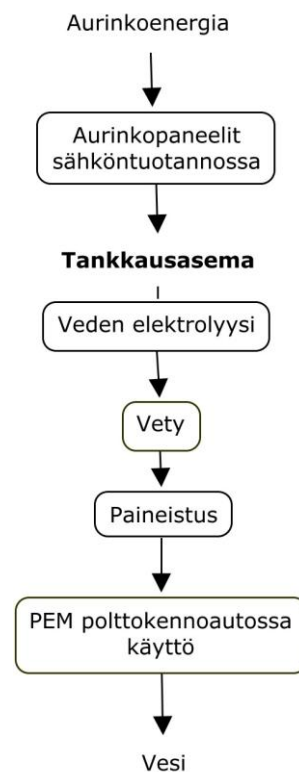
PEM -elektrolyysikennon elektrodit ovat erotettu elektrolyytillä, joka on materiaaliltaan happamaksi tehtyä kiinteää polymeeriä. Varauksenkantajana elektrolyytissä toimii vetyionit (H^{+}). Elektrolyysiin tapahtuu noin 20–1000 °C lämpötilassa. (Smolinka & al., 2010)

PEM -elektrolyysi on kilpailukykyinen tapa tuottaa vetyä perinteiseen alkaliseen elektrolyysin verraten. PEM elektrolyysikennon kallis hinta rajoittaa vielä sen tuloa massamarkkinoille. Toisaalta PEM -elektrolyysikennon materiaalit ovat samoja kuin PEM -polttokennoissa, minkä tutkimus on hyvin kiivasta. (Grigoriev, Poremsky & Fateev, 2006)

2.5 Polttokennojen ympäristövaikutukset

Polttokennoilla tuotetun energian ympäristöystävällisyyttä määrittää keskeisimpänä niiden aiheuttamat pienet päästöt ympäristölle. Polttokennon paikalliset päästöt ovat pienet, silloin kun, vedyn ja hapen reagoidessa kemiallisesti saadaan tuotettua sähköä ja lämpöä sekä päästönä puhdasta vettä. Koska vety ei ole primäärienergianlähde, polttokennon ympäristövaikutusten kartoittamisessa on otettava huomioon koko energiantuotantoketju. Vaikka polttoaineena käytettäisiin reformerin avulla maakaasua tai dieselöljyä, paikalliset päästöt jäävät silloinkin vähäisiksi, koska polttoaine on puhdistettava ennen käyttöön ottoa muun muassa rikkiä ja raskasmetalleista. Polttokennon reaktio ei myöskään tuota typen oksideja eikä pienhiukkasia. (U.S. Department of Energy, 2000; Corre & Irvine, 2010)

Polttokennoteknologia voidaan saada täysin päästöttömäksi vain jos sen vaatima polttoainevety tuotetaan myös päästöttömästi. Vetyä voidaan tuottaa päästöttömästi elektrolyysillä, kun siihen tarvittava energia otetaan uusiutuvista energianlähteistä kuten tuulivoimasta, vesivoimasta, aaltoenergiasta tai aurinkoenergiasta aurinkopaneeleilla. Kuvassa 2.8 esitetään energiantuotantoketjumalli, jossa näytetään, kuinka aurinkoenergialla voidaan puhtaasti tuottaa polttoainevetyä polttokennosovelluksen kuten polttokennoauton käyttöön.



Kuva. 2.8. Polttokennoteknologian ympäristövaikutukset polttokennoautoja käytettäessä (Dincer & Veziroglu, 2010)

Polttokennoista tekee ympäristöystävällisen myös se, että ne tuottavat sähköä hyvällä hyötysuhteella. Polttokennot muuntavat kemiallisen energian suoraan sähköenergiaksi ilman liekillistä palamista. Hyötysuhde ei ole tällöin rajoittunut Carnot'n prosessiin. Kennojen hyötysuhdetta voidaan kasvattaa edelleen, jos polttokennojen sivutuotteena syntyvä lämpö käytetään hyödyksi esimerkiksi lämmöntuotannossa, sähköntuotannossa tai kaasuturbiinisovelluksissa. (Corre & Irvine, 2010)

Perinteisiin energiantuotantotapoihin verraten polttokennot aiheuttavat vähemmän melua, mikä voidaan katsoa kuuluvan ympäristöystävälliseen energiantuotantoon. Ne toimivat hiljaisesti, koska niiden sisällä ei ole lainkaan liikkuvia osia. Polttokennojen toiminta perustuu ainoastaan kemialliseen hapetus-pelkistysreaktioon. (Corre & Irvine, 2010)

2.6 Polttokennojen käyttökohteet

Vaikka polttokennojen keksimisestä on kulunut jo 160 vuotta ja ne omaavat poikkeuksellisen korkean hyötysuhteen ja ovat ympäristöystävällisiä, niiden kaupallistuminen on vasta nyt lähtenyt vauhdilla liikkeelle. Tällä hetkellä tärkeimmät käyttökohteet ovat paikallaan kiinteästi olevien voimalaitosten, kulkuvälineiden ja kannettavan elektroniikan erilaisissa sovelluksissa. Polttokennotyypeistä PEMFC ja SOFC ovat eniten tutkitut ja niiden osalta näyttää lupaavimmilta saavuttaa polttokennojen kaupallistumiselle asetetut hinta ja tehokkuus tavoitteet (Corre & Irvine, 2010). Polttokennojen kaupallistumiselle yleisiä hyötynäkökulmia ja haasteita on kerätty taulukkoon 2.2.

TAULUKKO 2.2

Polttokennojen yleisiä hyötynäkökulmia ja haasteita. (Roessler & al., 2010)

Hyödyt	Haasteet
Korkea hyötysuhde	Korkea hinta
Matalat päästöt	Tuntematon teknologia energiantuotantomarkkinoilla
Polttoaineen joustavuus	Ei vedynjakelun infrastruktuuria
Hiljainen	Matala teho paino suhde
Suora energianmuutos (ei palamista)	
Ei liikkuva osia energian muuttamisessa	
Demonstroitu kestävyys / luotettavuus	
Koon joustavuus	

2.6.1 Kiinteät polttokennosovellukset

Polttokennovoimalaitoksia kehitetään tuottamaan ensisijaisesti muutaman sadan kW voimaloista noin MW luokan voimaloihin. Suuret voimalaitokset toimivat itsenäisesti. Pienemmät voimalat voidaan sen sijaan sijoittaa lähelle tarvittavaa käyttökohdetta ja ne ovat helposti yhdistettävissä muihin laitoksiin.

Pieniä voimalaitoksia käytetään nykyään jo sairaaloissa, hotelleissa, suurissa toimistorakennuksissa ja vedenpuhdistamoissa. Pienillä voimalaitoksilla on useita hyödyllisiä piirteitä. Ne voidaan sijoittaa paikan päälle, ne tuottavat jatkuvasti hyvätasoista energiaa ja toimivat esimerkiksi varavoimana. Voimalaitoksissa käytettäviä polttokennotyyppejä ovat PEFC, AFC, PAFC, MCFC ja SOFC. (Anon., 2001)

Maailmassa toimii jo noin kolmetuhatta polttokennovoimalaitosta. Kennon käyttämä polttoaine, esimerkiksi maakaasu, tuodaan voimalaitokseen putkia pitkin ja vety tuotetaan reformoimalla maakaasu voimalaitoksessa. Maakaasu tulee vielä pitkään olemaan yleisin polttokennojen polttoaine. Maakaasua käytettäessä syntyy jonkin veran hiilidioksidipäästöjä, mutta vetytalouteen on siirryttävä asteittain. (Ahola, 2004) Tosin myös propaania, butaania, biokaasua ja vetyä on käytetty polttoaineina polttokennovoimalaitoksissa (U.S. Department of Energy, 2000).

Polttokennovoimalaitokset toimivat tehokkaasti ja tuottava sivutuotteena paljon kuumaa vettä ja hukkalämpöä, joita voidaan suoraan hyödyntää lähiasuinalueiden käyttöön esimerkiksi käyttöveden ja kiinteistöjen lämmittämiseen. Tämä lisää edelleen voimalaitoksen tehokkuutta. (Anon., 2001) Suomalaisyritys Wärtsilä hyödyntää polttokennovoimalajärjestelmissään kiinteäoksidityypin polttokennoteknologiaa, koska se soveltuu hyvin sähkön- ja lämmön yhteistuotantoon. Wärtsilän on kehittänyt muutaman 20-kilowattisen koelaitoksen ja kaksi 50-kilowattista koelaitosta. Näiden toiminnasta on saatu mitattua 43–47 prosentin hyötysuhteita 20-kilowattisilla laitoksilla. Yli 50-kilowattisilla laitoksilla tavoitteena on päästä yli 50 prosentin hyötysuhteeseen. (Käyhkö, 2010b) Polttokennovoimaloiden on arvioitu kestävän käytössä noin 5-7 vuotta eli 40 000 tuntia (U.S. Department of Energy, 2000).

2.6.2 Liikkuvat polttokennosovellukset

Tulevaisuudessa on tarvetta saasteettomille ja tehokkaille kuljetusvälineille kuten autoille, rekoille, työkoneille ja linja-autoille, jotka toimivat sekä perinteisillä polttoaineilla (benssiini, diesel) että myös uusiutuvilla polttoaineilla (vety, metanoli, etanoli, maakaasu ja muut hiilivedyt). Vedyllä kulkevat ajoneuvot ovat täysin saasteettomia, tuottaen päästöinä vain vesihöyryä. Etuna on myös niiden hiljaisuus, mutta vedyn tankkaus, kuljetus ja varastointi vaativat suuria investointeja tulevaisuudessa (Ahola, 2004). Kulkuvälinekehitys on keskittynyt PEFC tyyppin polttokennojen hyödyntämiseen (Gasteiger & al., 2010). Niiden etuna on alhainen käyttölämpötila (U.S. Department of Energy, 2000).

Linja-auto sovellukset ovat kaikkein kaupallistuneimmat polttokennojen käyttökohteista. Linja-autot käyttävät puhdasta vetyä, joka on varastoituna paineistettuna kaasuna. Polttokennot voivat toimia myös nestemäisillä polttoaineilla, jotka reformoidaan linja-autossa ennen polttoaineen syöttämistä polttokennoon. Linja-autosovellukset ovat looginen aloitus polttokennoteknologian käyttämiseksi liikennesektorilla. Etuja niille on monia. Esimerkiksi niissä on tarpeeksi tilaa polttokennolle ja sen polttoaineelle, tankkaus onnistuu keskustankkausasemalta ja linja-autot ovat jatkuvassa käytössä koulutetun kuljettajan ajamina. (Anon., 2001)

Henkilöautot ovat iso markkinarako niiden laajan kysynnän vuoksi. Vetyautot tarjoavat suuret mahdollisuudet polttokennokehitykselle, koska henkilöautot tuottavat suuren osan ilmansaasteista. Polttokennoauton kaupallistamisessa on ongelmallista esimerkiksi se, että autot ovat suhteellisen pieniä eikä suurelle polttoainetankille ole tilaa. (Anon., 2001) Korkeasti paineistettujen vetytankkien (70 MPa) kehittäminen mahdollistaa pienikokoisten polttokennoajoneuvojen kaupallistumisen (Gasteider & al, 2010).

Autojen kaupallistumisen esteenä on myös puuttuva vedynjakeluverkosto. Tästä syystä monet polttokennoautoprototyypit käyttävät polttoaineena metanolia ja reformoivat polttoaineen auton sisällä. Vaikka vaihtoehtona on käyttää vedyn sijasta muita polttoaineita, reformointilaitteen asentaminen lisää toimivuusongelmia ja hintaa. Reformointi ei täysin poista haitallisia päästöjä ja se ei vähennä juurikaan riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. (Anon., 2001)

Vaatimuksia polttokennoilla kulkeville autoille on useita. Auton tulisi kestää ajossa ainakin 5000 tuntia. (U.S. Department of Energy, 2000) Tähän asti ajoneuvo on saatu kestämään ajotesteissä vain 1200–1900 tuntia polttokennoissa käytettävän katalyytin kulumisen takia. (Wipke & al., 2009) Polttokennoilla tuotetun sähkön hinta saisi olla noin 50 euroa/kW (U.S. Department of Energy, 2000).

Ennen polttokennoautojen massatuotantoon siirtymistä, vaaditaan kehitystyötä liittyen polttokennoissa käytettävän kalliin platinakatalyytin käyttöön siten, ettei polttokennon suorituskyky kuitenkaan alenisi. Näin saataisiin PEM polttokennojen virrantiheystasoja nostettua ajoneuvojen vaatimille tasoille ($\sim 1 \text{ W cm}^{-2}$). Tällöin platinakatalyytin osuus on $\sim 0,5 \text{ mg}_{\text{Pt}}\text{cm}_{\text{MEA}}^{-2}$, mikä tarkoittaa, että platinaa tarvittaisiin $\sim 50 \text{ g } 100 \text{ kW}$ ($0,5 \text{ g}_{\text{Pt}} \text{ kW}^{-1}$) ajoneuvon polttokennostoa varten. Toyota ja General Motors ovat demonstroineen edellä mainitunlaista polttokennoautoa todellisissa ajo-olosuhteissa, jolloin ajomatkakasi on saatu 300 mailia eli 480 kilometriä. Platinakatalyytin määrää tulisi edelleen saada vähennettyä ($< 0,2 \text{ g}_{\text{Pt}} \text{ kW}^{-1}$) ja sen kestävyyttä parannettua. Platina voidaan korvata myös jollain ei platinaa sisältävällä katalyytillä, vaikkakin platinaa pidetään tällä hetkellä yhä katalyyteistä kaikkein lupaavimpana vaihtoehtona. (Gasteider & al., 2010) Taulukkoon 2.3 on koottu polttokennoauton kaupallistumiselle edellyttävien asioiden tämänhetkinen tilanne ja tavoitteet vuodelle 2015 (Wannek, 2010).

TAULUKKO 2.3

PEM polttokennoilta edellytettävien ominaisuuksien tämänhetkinen tilanne ja tavoitteet tulevaisuudelle.

Ominaisuus	Tavoite (2015)	Tilanne tällä hetkellä	
		Autosovellus	Laboratorio- olosuhteet
Kestävyys (h)	5000	1977	> 7300
Platinan metallin käyttö (g kW^{-1})	0,2	-	< 0,2
Hinta (US dollar kW^{-1})	30	73	

Uusimpien arvioiden mukaan polttokenno- ja akkuautojen massatuotanto voisi alkaa vuonna 2015. Miljoonien autojen valmistus alkaisi vuonna 2020. Kymmenen vuoden päästä liikenteessä voisi olla polttokennoautoja 1-3 prosenttia ja vuonna 2050 jo suuri osa autoista olisi polttokennoautoja. (Käyhkö, 2010a)

Polttokennot toimivat virranlähteenä myös sukellusveneissä. Polttokennot korvaavat sukellusveneissä käytettävät paristot. Polttokennojen lopputuotteena syntyvää kuumaa vettä voidaan käyttää hyödyksi sukellusveneen omiin tarpeisiin. Sukellusveneiden polttokennot käyttävät polttoaineenaan puhtaita lähtöaineita. (Anon., 2001)

2.6.3 Kannettavat ja pienitehoiset polttokennosovellukset

Pienikokoiset virranlähteet ovat polttokennoille sopiva käyttökohde. Kannettavia polttokennosysteemejä voidaan käyttää sovelluksissa, missä nykyään käytetään paristoja ja akkuja virranlähteenä. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi kännykät, kannettavat tietokoneet sekä muut kannettavat elektroniset laitteet. Polttokennot ovat perinteisiä paristoja ja akkuja tehokkaampia energiantuottajia, pienikokoisempia sekä kevyempiä ja tästä syystä pitkäikäisempiä (Corre & Irvine, 2010).

Metanolipolttokennot ovat yksi käytetty polttokennotyyppi kannettavissa sovelluskohteissa. Niitä käytetään muun muassa korvaamaan akut kännyköissä. (Mergel & al., 2010) Kaupallisesti on saatavilla yksiköitä, jotka tuottavat noin 1,2 kW sähkövoiman. Polttokennoilla käytettävien pienelektroniikkalaitesovellusten etuna on niiden nopea tankkaaminen. Lataamisen sijaan polttokennon voisi tankata esimerkiksi jonkinlaisella patruunalla. Käyttöaikaa voitaisiin pidentää huomattavasti, eikä lataamiseen tuhrautuisi turhaa aikaa. Polttoaineen voi myös kantaa mukanaan eikä näin vaadittaisi paikkaan sitovia pistorasioita. (Kortela, 2004)

2.7 Polttokennotutkimus Suomessa

Suomessa ollaan vahvasti mukana polttokennoteknologiatutkimuksessa. Tekesillä on käynnissä (2007–2013) Polttokennot-ohjelma, minkä tavoitteena on parantaa suomalaisen teollisuuden mahdollisuuksia tutkia, kehittää ja valmistaa polttokennoteknologiaan perustuvia läpimurtotuotteita kasvaville markkinoille. Ohjelman budjetti on noin 140 miljoonaa euroa, josta Tekesin osuus on 50 miljoonaa. (Tekes, 2010) Ohjelmassa on mukana teollisuudesta 60 kiinnostunutta yrityksiä ja nyt ollaan menossa tuotteiden demonstraatioaiheeseen. Ohjelman ensimmäisessä vaiheessa 26 yritys- tai tutkimushanketta on saatu päätökseen. (Käyhkö, 2010a)

Polttokennot-ohjelma synnytti yhteisen Demo2013 -hankkeen, jonka tavoitteena on saada näkyville kaikki Polttokennot-ohjelmahankkeen rahoituksessa mukana olevat tuotokset. Demo2013 toteutetaan Vuosaaren satamassa, jossa tullaan demonstroimaan päästötöntä ja melutonta polttokennoteknologiaa. Satamassa tullaan näkemään ainakin Wärtsilän polttokennovoimalaitos ja vedyn tankkausasema sekä trukkeja. (Käyhkö, 2010a)

Suomessa tehdään jatkuvasti tutkimusta kannettavien elektronisten laitteiden alueella. Suomessa toimivia yrityksiä ovat muun muassa Hydrocell ja Salcomp. Hydrocell kehittää esimerkiksi kannettavia alkalipolttokennoratkaisuja. Hydrocellin tuotteita on jo kaupallisilla markkinoilla. Ne soveltuvat mökki- ja veneilykäyttöön tai niitä voidaan asentaa skoottereihin tai polkupyöriin. (Tekes, 2009)

Kuljetusvälineiden alalla toimivia yrityksiä Suomessa ovat Cargotec Finland, Konecranes, Patria Land & Armament, Sandvik Mining and Construction. Carcotec ja Konecranes ovat keskittyneet tutkimuksessaan metsä- kaivos- ja satamakoneisiin. Cargotekin valmistamaa polttokennotruckki rakennettiin ja testattiin viime vuonna. (Tekes, 2009)

Voimalaitossovelluksen alalla tutkimusta ja kehitystyötä tekee muun muassa Wärtsilä Finland. Se on erikoistunut hajautettuun energiantuotantoon eli sähkön- ja lämmön tuottamiseen erityisesti SOFC polttokennotyyppiä käyttäen. Wärtsilä on rakentanut esimerkiksi Vaasan asuntomessualueelle 20 kW yksikön polttokennovoimalan. (Tekes, 2009)

3. POLTTOKENNOT OSANA YLÄKOULUN JA LUKION KEMIAN OPETUSTA

Tässä luvussa tarkastellaan, miten polttokennojen kemiaa voidaan yhdistää osaksi yläkoulun ja lukion kemian opetusta. Luvussa 3.1 tarkastellaan kemian opetuksen haasteita ulkomailla ja Suomessa. Luvussa 3.2 esitellään yläkoulun ja lukion opetussuunnitelman perusteiden asettamia tavoitteita ja sisältöjä sekä, miten polttokennojen kemiaa voidaan yhdistää niihin.

3.1 Kemian opetuksen haasteet

Maailmanlaajuisesti kemian opetuksen kehittämisessä yhtenä suurimpana haasteena pidetään opiskelijoiden, erityisesti tyttöjen, kiinnostuksen lisäämistä kemiaa kohtaan (Sjoberg, 2002). Yksi syy kiinnostuksen puutteeseen voidaan pitää kemian sisältöjä ja aihekokonaisuuksia sekä opetuksen työ- ja arviointitapojen yksipuolisuutta (Lavonen, 2005; Sjoberg, 2002). Kiinnostukseen ja sen ylläpitämiseen vaikuttavat paljon myös käytetyt pedagogiset työtavat ja sisältöjen mielekäs konteksti oppilaan kannalta (Aksela, 2005; Byman, 2002; Lavonen & al., 2005; Siegel & Ranney, 2003).

Kemia nähdään usein merkityksettömänä oppiaineena (Siegel & Ranney, 2003). Kemia koetaan perinteisesti myös hyvin teoreettiseksi ja tylsäksi oppiaineeksi (Malinen, 1992; Sjoberg, 2002). Lukiolaiset pitävät kemiaa yhteiskunnallisesti hyödyllisenä, mutta sen merkitystä ei nähdä kouluopetuksessa (Siegel & Ranney, 2003). Osborne ja Collins (2001) toteavat tutkimuksessaan kemian kiinnostuksen puutteen johtuvan syystä, että koulussa ei anneta mahdollisuuksia luovaan ilmaisuun sekä oppiaineen sisällöt ovat pirstaleisia, jolloin on vaikea luoda yhtenäistä kuvaa tieteestä.

Kouluopetuksen heikkoutena on sisältöjen merkityksettömyys oppilaan oman elämän kannalta. Sisällöt esitetään usein hyvin abstraktisti, jolloin ne eivät kohtaa oppilaiden kiinnostuksen kohteita. Opetuksen tulisi olla ihmisläheisempää. (Haussler & Hoffmann, 2000) Opetuksesta unohdetaan usein sosiaalinen ja historiallinen ulottuvuus (Sjoberg, 2002). Kiinnostusta voidaan tukea myös valitsemalla opetettavat aihekokonaisuudet siten, että ne tukevat molempien sukupuolten kiinnostusta, erityisesti tyttöjen (Jones & al, 2000). Kiinnostuneet oppilaat myös oppivat paremmin. Opiskelijoiden koetulokset ja kiinnostus luonnontieteiden opiskelua kohtaan korreloivat selvästi keskenään (Osborne ja Dillon, 2008).

Kemian tärkeyttä oppiaineena tulisi korostaa. Tämä näkyy jo suomalaisessa yhteiskunnassa. Esimerkiksi ammatillisessa koulutuksessa kemian opiskelu on tullut LUMA -hankkeen vaikutuksesta pakolliseksi kaikille oppilaille (Laurila, 2007).

Opetuksen laatuun on keskityttävä. Tutkimukset osoittavat, että keskeinen tekijä opiskelijoiden mielenkiinnon herättämiseksi on opetuksen laadussa. Opettajalla on tärkeä tehtävä opiskelijoiden kiinnostuksen herättäjänä (Sjoberg, 2002). Opiskelijoiden innostukseen kemiaa kohtaan vaikuttaa suuresti opettajan oma innostuneisuus ja merkityksen antaminen oppiainetta kohtaan (Karjalainen & Aksela, 2008).

Suomalaisen kemian opetuksen haasteita ovat kartoittaneet muun muassa Aksela ja Juvonen (1999) *kemian opetus tänään* -tutkimuksessa. Haasteina suomalaiset opettajat pitivät kemian opetuksen määrää, sisältöjä ja ajoitusta (33 % ongelmista). Eniten (54 %) opettajat toivat esille haasteita, jotka koskivat kemian opetuksen vähyyttä sekä yläkoulussa että lukiossa. Opettajista 31 % pitivät haasteena myös resursseja kuten tiloja, materiaaleja, välineitä, taloudellisia resursseja ja isoja ryhmäkokoja. Suurin haaste näistä oli opetustilat tai niiden puute. Seuraavaksi suurimpina haasteina nähtiin suuret ryhmäkoot ja rajalliset välineet. Muutama opettaja kaipasi lisää hyviä oppimateriaaleja. (Aksela & Juvonen, 1999)

Karjalainen ja Aksela (2008) kartoittivat kemian opetuksen haasteita ja nykytilaa Suomessa kymmenen vuotta myöhemmin. Tutkimuksen tuloksia vertailtiin kymmenen vuotta sitten tehdyn saman tutkimuksen tuloksiin (Aksela & Juvonen, 1999). Kuluneen kymmenen vuoden aikana on kemian opetuksessa tapahtunut paljon positiivisia muutoksia. Tuorein tutkimus osoittaa, että kemian opetuksen lähtökohdat ovat parantuneet kemian kurssitarjonnan, opettajien koulutustaustan ja opetusmahdollisuuksien osalta.

Kokeellisuuden merkitys oppimisen tukena on ymmärretty kouluissa. Ennen kokeellisuutta pidettiin tärkeänä kiinnostuksen ja motivaation herättäjänä. Nykyään kokeellisuus nähdään ensisijaisesti oppimisen kannalta tärkeänä. Kokeellisuus auttaa oppilaita ymmärtämään kemiaa paremmin ja tärkein peruste teettää kokeellisia töitä oppilailla on kemian oppiminen. Kemian työkurseja tai kertauskursseja järjestetään selvästi enemmän kuin kymmenen vuotta sitten. Myös yhteistyö ulkopuolisten tahojen kanssa on monipuolistunut ja se koetaan tärkeäksi. Tärkeimpänä yhteistyön tavoitteena opettajat pitävät kemian konkretisoitumista. (Karjalainen & Aksela, 2008)

Karjalaisen ja Akselan (2008) tutkimuksen mukaan kemian opetuksen keskeisimpinä haasteina opettajat pitävät opiskelijoiden innostuksen ja kemian arvostuksen sekä oppilasmäärien nostamista. Vertaukseksi kymmenen vuotta sitten suurimpina haasteina olivat vuoden 1994 opetussuunnitelman perusteiden keskeisten sisältöjen toteutus sekä resurssit. Edelleen opettajat kaipaavat lisätukea resursseihin, tiloihin, välineisiin ja materiaaleihin sekä täydennyskoulutukseen. Kemian opettajien mielekäs perus-, jatko- ja täydennyskoulutus on tärkeää, sillä innostunut ja taitava kemian opettaja on avainasemassa kiinnostuksen herättämisessä kemiaa kohtaan. Opettajien elinikäisen oppimisen tukeminen onkin yksi opettajakoulutuksen ajankohtaisia haasteita. (Karjalainen & Aksela, 2008)

3.2 Opetussuunnitelman tavoitteet ja sisällöt

Opetushallitus vahvistaa valtakunnalliset opetussuunnitelman perusteet, joissa määritellään valtioneuvoston vahvistaman tuntijaon mukaisesti oppiaineiden kuten kemian opetuksen tavoitteet ja keskeiset sisällöt. (Lukiolaki 629/1998 10 §) Polttokennojen kemiaa voidaan sisällyttää hyvin osaan sekä peruskoulun että lukion opetussuunnitelman asettamista tavoitteista (ks. taulukko 3.1 ja 3.2). Polttokennoja voidaan käsitellä muun muassa kemian arkielämäyhteyden ja ihmisen hyvinvoinnin, kokeellisuuden, tiedonhankinnan, teollisuuden teknologian ja ympäristötekniikan sekä kemiaan liittyvän yleissivistyksen yhteydessä. Polttokennot ovat tulevaisuuden teknologiaa. Lisäksi sen opetuksella voidaan herättämään yleistä kiinnostusta kemian opiskelua kohtaan.

3.2.1 Yläkoulun opetussuunnitelman perusteet

Perusopetuksen opetussuunnitelma (2004) asettaa opetukselle sen ajan koulutushaasteisiin vastaavia aihekokonaisuuksia. Ne ovat sellaisia kasvatus- ja opetustyön keskeisiä painoalueita, joiden tavoitteet ja sisällöt sisältyvät useisiin oppiaineisiin. Polttokennojen kemian opetus voidaan liittää perusopetuksessa *vastuu ympäristöstä, hyvinvoinnista ja kestävästä tulevaisuudesta* sekä *ihminen ja teknologia* -aihekokonaisuuksiin. Polttokennojen kemian opetuksen yhteydessä voidaan ottaa esiin ihmisen suhde teknologiaan ja auttaa näkemään teknologian merkitys arkielämässämme erilaisten polttokennosovellusten kautta. Opetuksessa voidaan pohtia lisäksi yhteiskunnan ja teknologian välistä yhteyttä tulevaisuudessa.

Perusopetuksen kemian vuosiluokkien 7-9 tavoitteissa ja keskeisissä sisällöissä kuvataan kemian opetuksen yleisiä opetuksen sisältöjä ja työtapoja. Kemian opetusta kuvataan oppilasta aktivoivana ja kokeellisuutta korostavana: *Opetus tukeutuu kokeelliseen lähestymistapaan, jossa lähtökohtana on elinympäristöön liittyvien aineiden ja ilmiöiden havaitseminen ja tutkiminen. Tästä edetään ilmiöiden tulkitsemiseen, selittämiseen ja kuvaamiseen sekä aineen rakenteen ja kemiallisten reaktioiden mallintamiseen kemian merkkikielellä. Kokeellisuuden tulee auttaa oppilasta hahmottamaan luonnontieteiden luonnetta ja omaksumaan uusia luonnontieteellisiä käsitteitä, periaatteita ja malleja, kehittää käden taitoja, kokeellisen työskentelyn ja yhteistyön taitoja sekä innostaa oppilasta kemian opiskeluun* (Opetushallitus, 2004) Nämä tavoitteet toteutuvat hyvin tässä tutkimuksessa kehitetyssä tutkimuksellisessa polttokennojen kemiaa käsittelevässä oppimateriaalissa (ks. taulukko 3.1)

Kemian opetuksen tavoitteiden mukaisesti oppilas oppii *työskentelemään ohjeita noudattaen ja turvallisesti, tekemään luonnontieteellisen tutkimuksen sekä tulkitsemaan ja esittämään tuloksia sekä tuntemaan kemian ilmiöiden ja sovellusten merkityksen sekä ihmiselle että yhteiskunnalle* (Opetushallitus, 2004). Esimerkiksi polttokennojen kemian opiskelu tutkimuksellisen opiskelun mukaisesti tukee näitä opetussuunnitelman asettamia tavoitteita.

Perusopetuksen kemian keskeiset sisällöt on jaettu kolmeen aihealueeseen: *ilma ja vesi, raaka-aineet ja tuotteet ja elollinen luonto ja yhteiskunta*. Polttokennojen kemiaa käsitellään aihealueen *raaka-aineet ja tuotteet* yhteydessä. Sen keskeisimpiin sisältöihin kuuluvat sähkökemialliset ilmiöt, sähköpari, elektrolyysi ja niiden sovellukset. Nämä sisällöt on otettu huomioon tässä tutkimuksessa kehitetyssä polttokennojen kemiaa käsittelevässä oppimateriaalissa.

TAULUKKO 3.1

Polttokennojen kemian kytkeminen perusopetuksen opetussuunnitelman perusteiden asettamiin kemian opetuksen tavoitteisiin (Opetushallitus, 2004).

Perusopetuksen opetussuunnitelman asettamat tavoitteet	Polttokennoihin liittyvä kemia yläkoulun kemian opetuksessa
<i>Opetus tukeutuu kokeelliseen lähestymistapaan, jossa lähtökohtana on elinympäristöön liittyvien aineiden ja ilmiöiden havaitseminen ja tutkiminen.</i>	Polttokennojen sekä vetytalouden opettaminen kokeellisen lähestymistavan kautta korostaen teknologian ympäristönäkökulmaa ja merkitystä tulevaisuuden energianratkaisuna
<i>Kokeellisuuden tulee auttaa oppilasta hahmottamaan luonnontieteiden luonnetta ja omaksumaan uusia luonnontieteellisiä käsitteitä, periaatteita ja malleja. Kehittää käden taitoja, kokeellisen työskentelyn ja yhteistyön taitoja.</i>	Lähestymistapana tutkimuksellinen opiskelu polttokennojen kemian opetuksessa
<i>Oppilas oppii tekemään luonnontieteellisen tutkimuksen sekä tulkitsemaan ja esittämään tuloksia sekä työskentelemään ohjeita noudattaen ja turvallisesti</i>	Polttokennojen kemiaan liittyvää kokeellisesti saatua tietoa arvioidaan, prosessoidaan ja esitetään muille. Työturvallisuusnäkökohdat otetaan huomioon kokeellisessa työskentelyssä
<i>Oppilas oppii tuntemaan kemian ilmiöiden ja sovellusten merkityksen sekä ihmiselle että yhteiskunnalle.</i>	Polttokennoteknologian mahdollisuuksien ymmärtäminen energiantuotannossa Polttokennojen merkitys puhtaana energiantuotantomenetelmänä
<i>Innostaa oppilasta kemian opiskeluun</i>	Polttokennojen kemia innostaa oppilaita, koska se on aiheena ajankohtainen. Polttokennojen käyttökohteet liittyvät opiskelijoiden arkielämään.

3.2.2 Lukion opetussuunnitelman perusteet

Opetussuunnitelma esittää erilaisia aihekokonaisuuksia, joita tulisi ottaa huomioon lukion opetuksessa. Käytännössä aihekokonaisuudet ovat lukion toimintakulttuuria jäsentäviä toimintaperiaatteita ja oppiainerajat ylittäviä, opetusta eheyttäviä painotuksia (Opetushallitus, 2003). Polttokennojen kemiaa voidaan erinomaisesti käsitellä lukion opetussuunnitelman (2003) asettamien aihekokonaisuuksien kuten *teknologia ja yhteiskunta* sekä *kestävä kehitys* yhteydessä. Aihekokonaisuuksien raameissa voidaan tarkastella polttokennoilla tuotetun energian vaikutusta yhteiskuntaan ja polttokennoteknologia voidaan esitellä opiskelijoille heitä lähellä olevien sovelluskohteiden kautta. Esimerkiksi, tutustutaan vedyllä toimivaan polttokennoautoon tai polttokennoilla toimiviin elektroniikkalaitteisiin. Polttokennoissa käytettävien polttoaineiden yhteydessä voidaan keskustella niiden eduista ja haasteita fossiilisiin polttoaineisiin kuten bensiiniin verrattuna. Aihekokonaisuuden *Kestävä kehitys* yhteydessä voidaan keskustella polttokennojen tarjoamista mahdollisuuksista energiantuotannossa. Aiheiden käsittelyn yhteydessä perehtyminen vihreän kemian periaatteisiin on myös luontevaa. Polttokennojen kemiaa voidaan opettaa opetussuunnitelman asettamien aihekokonaisuuksien ja tavoitteiden puitteissa (ks. taulukko 3.2).

Lukion kemian opetuksen tavoitteet jaetaan yleisiin ja kurssikohtaisiin tavoitteisiin. Kemian opetuksen yleisenä tehtävänä on välittää *kuva kemiasta yhtenä keskeisenä perusluonnontieteenä, joka tutkii ja kehittää materiaaleja, tuotteita, menetelmiä ja prosesseja kestävän kehityksen edistämiseksi. Opetus auttaa ymmärtämään jokapäiväistä elämää, luontoa ja teknologiaa sekä kemian merkitystä ihmisen ja luonnon hyvinvoinnille tutkimalla aineita, niiden rakenteita ja ominaisuuksia sekä aineiden välisiä reaktioita.* (Opetushallitus, 2003)

Kemian opetuksen yleisenä tavoitteena on, että opiskelija *osaa kemian keskeisimmät peruskäsitteet ja tietää kemian yhteyksiä jokapäiväisen elämän ilmiöihin sekä ihmisen ja luonnon hyvinvointiin. Perehtyy nykyaikaiseen teknologiaan teollisuudessa ja ympäristötekniikassa* (Opetushallitus, 2003) Esimerkiksi polttokennojen sovelluskohteiden käsittely sopii käsiteltäväksi näiden tavoitteen yhteydessä. Nykyaikaista teknologiaa voidaan käsitellä muun muassa perehtymällä polttokennojen mahdollisuuksiin energiantuotannossa.

Polttokennojen merkitystä puhtaana energianlähteenä sekä polttokennoissa käytettävän polttoaineen vedyn asemaa turvallisena ja saasteettomana tulevaisuuden polttoaineena voidaan tuoda esille opetussuunnitelman asettaminen tavoitteiden mukaisesti. Kemian opetuksen yhtenä tavoitteena on, että opiskelija *osaa käyttää kemiallista tietoa kuluttajana terveyden ja kestäväan kehitykseen edistämässä sekä osallistuessa luontoa, ympäristöä ja teknologiaa koskevaan keskusteluun ja päätöksentekoon* (Opetushallitus, 2003).

Kemian opetussuunnitelman tavoitteiden mukaan opiskelijoiden tulisi saada *kokemuksia, jotka herättävä ja syventävät kiinnostusta kemiaa ja sen opiskelua kohtaan* (Opetushallitus, 2003). Koska polttokennoilla on tulevaisuudessa tärkeä rooli energianlähteenä, kiinnostaa se oppilaita olemalla ajankohtainen aihe.

Kokeellisuudella on tärkeä merkitys kemian opetuksessa. Kokeellisuus on sisällytetty keskeisesti kemian opetussuunnitelmaan. Opetussuunnitelman mukaan *kemian opetukselle on luonteenomaista kemiallisten ilmiöiden ja aineiden ominaisuuksien havaitseminen ja tutkiminen kokeellisesti, ilmiöiden tulkitseminen ja selittäminen mallien ja rakenteiden avulla, ilmiöiden kuvaaminen kemian merkkikielellä sekä ilmiöiden mallintaminen ja matemaattinen käsittely* (Opetushallitus, 2003). Kokeellinen työskentely on monipuolisesti yhdistettävissä polttokennojen kemian opetukseen. Esimerkiksi polttokennojen kemian kokeellisuus voi olla tutkimuspohjaista kokeellisuutta, jossa opiskelijat laativat tutkimussuunnitelman itse. Oppilaat arvioivat, prosessoivat ja esittävät muille töihin liittyvää kokeellisesti hankittua tietoa tai aktiivisella tiedonhankinnalla saamaansa tietoa.

Lukiossa opiskelijalta odotetaan opetussuunnitelman mukaan paljon erilaisia kokeelliseen työskentelyyn liittyviä taitoja. Opiskelijan tulisi osata *kokeellisen työskentelyn ja muun aktiivisen tiedonhankinnan avulla etsiä ja käsitellä tieto elämän ja ympäristön kannalta tärkeistä kemiallisista ilmiöistä ja aineiden ominaisuuksista sekä arvioida tiedon luotettavuutta ja merkitystä* (Opetushallitus, 2003). Lisäksi odotetaan, että opiskelija *osaa tehdä ilmiöitä koskevia kokeita ja oppii suunnittelemaan niitä sekä ottaa huomioon työturvallisuusnäkökohdat, osaa tulkita ja arvioida kokeellisesti tai muutoin hankkimaansa tietoa ja keskustella sekä esittää sitä muille* (Opetushallitus, 2003).

Lukion kemian opetuksen tavoitteet ja sisällöt esitetään yksityiskohtaisemmin kurssikohtaisesti. Kemian ensimmäinen kurssi *Ihmisen ja elinympäristön kemia* on kaikille lukiolaisille yhteinen kurssi. Lisäksi on valittavana neljä valinnaista syventävää kurssia: *Kemian mikromaailma, Reaktiot ja energia, Metallit ja materiaalit* sekä *Reaktiota ja tasapaino*. (Opetushallitus, 2003) Koulukohtaisesti tarjotaan myös ylioppilaskirjoituksiin kertaava kurssi sekä työkursseja. Käsitteenä polttokennoja ei mainita lukion opetussuunnitelman perusteissa (2003), mutta se sijoittuu sisällöiltään pääasiallisesti kurssille KE4 -*Metallit ja materiaalit*. Aihetta voidaan hyvin käsitellä myös koulukohtaisilla työkursseilla.

Lukion KE4 - *Metallit ja materiaalit* -kurssin tavoitteissa mainitaan, että opiskelija *tuntee hapettimia ja pelkistimiä ja niiden käyttöä sekä osaa kirjoittaa hapettumis-pelkistysreaktioita, osaa sähkökemiallisten ilmiöiden periaatteet sekä niihin liittyviä kvantitatiivisia sovelluksia, osaa tutkia kokeellisesti ja malleja käyttäen metalleihin ja sähkökemiaan liittyviä ilmiöitä* (Opetushallitus, 2003). Polttokennojen kemian yhteydessä voidaan käsitellä hapetus-pelkistysreaktioita, sähkökemiallisen ilmiön periaatetta sekä sen sovelluskohteita. Myös kokeellinen työskentely ja malleihin tutustuminen on hyvin yhdistettävissä tähän kurssiin polttokennojen kontekstissa.

Lukion kemian kurssin *Metallit ja materiaalit* opetussuunnitelman perusteiden (2003) asettamiin keskeisiin sisältöihin kuuluvat muun muassa kohdat: kemiallinen paria ja elektrolyysi sekä hapetus-pelkistysreaktiot. Polttokennojen kemiaa voidaan käsitellä näiden keskeisten sisältöjen yhteydessä. Opetuksessa voidaan tuoda esille, että polttokennoilla voidaan saasteettomasti tuottaa energiaa.

TAULUKKO 3.2. Polttokennojen kemian kytkeminen lukion opetussuunnitelman perusteiden asettamiin kemian opetuksen tavoitteisiin (Opetushallitus, 2003).

Lukion opetussuunnitelman asettamat tavoitteet	Polttokennoihin liittyvä kemia lukion kemian opetuksessa
<i>osaa kemian keskeisimmät peruskäsitteet ja tietää kemian yhteyksiä jokapäiväisen elämän ilmiöihin sekä ihmisen ja luonnon hyvinvointiin</i>	Vedyn ominaisuudet ja mahdollisuudet polttoaineena polttokennoissa Polttokennojen sovelluskohteet ja niiden hyödyt ihmisille ja luonnon hyvinvoinnille
<i>perehtyy nykyaikaiseen teknologiaan teollisuudessa ja ympäristötekniikassa</i>	Polttokennoteknologian mahdollisuuksien ymmärtäminen energiantuotannossa
<i>osaa käyttää kemiallista tietoa kuluttajana terveyden ja kestävä kehityksen edistämässä sekä osallistuessa luontoa, ympäristöä ja teknologiaa koskevaan keskusteluun ja päätöksentekoon</i>	Ymmärtää vedyn aseman turvallisena ja saasteettomana polttoaineena polttokennoissa Polttokennojen merkitys puhtaana energiantuotantomenetelmänä
<i>osaa tehdä ilmiöitä koskevia kokeita ja oppii suunnittelemaan niitä sekä ottaa huomioon työturvallisuusnäkökohdat</i>	Polttokennojen kemian opiskelu voi olla tutkimuspohjaista kokeellisuutta, jossa työ suunnitellaan itse ja työturvallisuusnäkökohdat otetaan huomioon.
<i>osaa tulkita ja arvioida kokeellisesti tai muutoin hankkimaansa tietoa ja keskustella sekä esittää sitä muille</i>	Polttokennojen kemiaan liittyvää kokeellisesti saatua tietoa arvioidaan, prosessoidaan ja esitetään muille.
<i>saa kokemuksia, jotka herättävä ja syventävät kiinnostusta kemiaa ja sen opiskelua kohtaan</i>	Polttokennojen kemia kiinnostaa oppilaita, koska se on ajankohtainen opiskeltava aihe. Polttokennojen käyttökohteet ovat näkyvillä opiskelijoiden omassa arkielämässä.

4. TUTKIMUKSELLINEN KEMIAN OPISKELU

Luvut 4 ja 5 käsittelevät kemian opetusta ja oppimista tutkimuksen viitekehyksessä. Luvussa 4.1 käsitellään kemian tiedon luonnetta ja sen rakentumista. Luku 4.2 tarkastelee tutkimuksellisen opiskelua ja sen kiinnostavuutta työtapana sekä luku 4.3 esittää tutkimuksellisen opiskelun tukemista, haasteita ja rajoitteita. Luvussa 5.1 käsitellään kiinnostuksen merkitystä oppimisessa sekä (luku 5.2) esitellään kiinnostuksen merkitys opetuksessa.

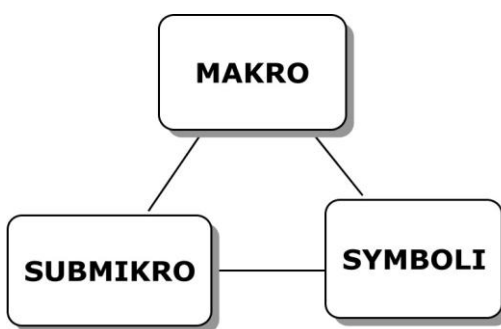
4.1 Kemian tiedon luonne ja rakentuminen

Kemian tiedon luonteen ymmärtäminen on yksi tärkeä kemian opetuksen tavoite. Opettajan tulee auttaa opiskelijoita ymmärtämään kemian tiedon luonne ja sen rakentuminen sekä antaa oppilaille kuva kemiasta tutkivana luonnontieteenä. Keskeisenä kemian opiskelussa olisi ymmärtää, mihin kemian tietoja ja taitoja tarvitaan. Tällä tavalla opiskelijat näkevät kemian merkityksen arkielämässä. (Aksela, 2005)

Kemia on luonteeltaan kokeellinen luonnontiede. Kemiallista tietoa hankitaan kokeellisuuden menetelmillä. Kokeellisuudella on merkittävä rooli myös kemian opetuksessa ja sen merkitys näkyy selvästi uudessa opetussuunnitelman perusteissa (Opetushallitus, 2003). Kokeellisen työskentelyn tavoitteena on opettaa oppilaille kemian asioita sekä välittää tietoa kemiasta tutkivana tieteenä (Millar, 2004).

Kemian tietorakenne on moniulotteinen ja verkottunut, mikä tekee kemian opiskelun haasteelliseksi. Monet kemian käsitteet ovat abstrakteja eivätkä oppilaat välttämättä ymmärrä termejä tieteellisesti. Vaihtoehtoiset käsitykset ovat hyvin yleisiä ja ne vaikeuttavat uuden tiedon liittämistä vanhaan tietorakenteeseen (Gabel, 1999).

Kemian tietoa voidaan esittää kolmella eri tasolla: submikroskooppisella, makro- ja symbolisella tasolla (ks. Kuva 4.1). Makroskooppisella tasolla tarkoitetaan asioita, joita voidaan silmin havaita ja mitata. Submikroskooppisen tason tieto on makroskooppisen tason tietoa selittävää tulkintaa. Submikroskooppista tasoa ei voida aistein havaita, vaan se perustuu perushiukkasiin (ionit, atomit, molekyylit) ja niiden välisiin vuorovaikutuksiin. Symbolitasoa kuvataan kemiallisilla merkeillä, kaavoilla ja reaktioyhtälöillä. (Johnstone, 1991) Polttokennojen kemiassa kolme kemian tasoa voidaan ajatella kytkeytyvän toisiinsa. Makrotasoa edustavat polttokennon toiminnan havaitseminen sen sovelluksissa. Mikrotasoa esittävät reaktiotuotteita kuvaavat molekyylimallit. Symbolitasoa kuvaavat reaktioyhtälöt, jotka esittävät kennossa tapahtuvia kemiallisia hapetus-pelkistysreaktioita.



Kuva 4.1. Kemian ilmiöitä voidaan tarkastella kolmella toisiinsa kytkeytyvällä tasolla: makro-, submikro- ja symbolitasolla.

Kemian eri tasojen ymmärtäminen ja niiden yhdistäminen toisiinsa tekee kemian oppimisesta vaikeaa (Gabel, 1999). Haasteellisinta oppilaille on kemiallisten ilmiöiden ymmärtäminen submikro- ja symbolitasolla. Submikrotaso on opiskelijoille usein vaikea käsittää, koska atomeita ja molekyylejä ei voida nähdä tai koskettaa. Toisaalta submikroskooppisen tason opettamiseen ei käytetä niin paljon aikaa, että opiskelijat ehtisivät sisäistämään sen. Makrotaso on oppilaille helpompi käsittää, mutta vain harvoja ilmiöitä pystytään selittämään yksin makroskooppisen tason avulla. (Oversby, 2000) Kemian ilmiöitä käsitellään opetuksessa aivan liian yksipuolisesti. Opetus tapahtuu pääasiassa symbolisella tasolla, joka on kolmesta tasosta kaikkein abstraktein ja vaikein omaksua. (Gabel, 1999)

Kemian tiedon omaksumiseen tarvitaan kaikkien kolmen tason ymmärtämistä ja kykyä siirtyä ajattelussa tasolta toiselle. Jos opiskelija epäonnistuu yhdistämään tasot, jää hänen kemian tietorakenne hajanaiseksi. Tasojen yhdistämisen tekee haastavaksi se, että jokaista kemiallisen tiedon kolmesta tasosta voidaan esittää useammalla kuin yhdellä tavalla. Lisäksi opiskelijat eivät osaa yhdistää tasoja toisiinsa, koska opettaja siirtyy opetuksessaan tiedostamattaan jatkuvasti tasolta toiselle. Vaikka kemiaa opetettaisiinkin kaikilla kolmella tasolla, ei opettaja esitä niiden välisiä yhteyksiä, mikä johtaa taas tiedon hajanaisuuteen. Kemiallinen tieto pysyy opiskelijoiden muistissa irrallisina asioina. Laboratoriotyöskentelyn uskotaan auttavan opiskelijoita hahmottamaan kolmen tason yhteys paremmin, mikä taas parantaisi heidän konseptuaalista ymmärrystä kemiasta. (Gabel, 1999)

4.2 Tutkimuksellinen opiskelu

Tutkiva oppiminen on yksi pedagoginen lähestymistapa ja malli, jolla voidaan tukea opiskelijoiden mielekästä oppimista sekä luoda yksilöiden ja ryhmien toimintaa tukeva oppimisen kulttuuri (Hakkarainen & al., 2004; Sahlberg, 1990). Tutkivasta oppimisesta (Engl. *Inquiry-based learning*) voidaan käyttää useita nimityksiä kuten tässä tutkimuksessa käytettävää tutkimuksellista opiskelua (Aksela, 2005).

Jean Piaget, David Ausubel, and Lev Vygotsky ovat yhteistyönä kehittäneet tutkimuksellisen opiskelun kulttuurin (Cakir, 2008). Se pohjautuu konstruktivistiseen oppimiskäsitykseen, minkä mukaan yksilö vertaa uutta tietoa aikaisempaan tietorakenteeseensa sitä korjaten tai edelleen uudella tiedolla täydentäen. Opetusmenetelmänä tutkimuksellinen opiskelu on ollut käytössä jo 1800-luvun puolivälistä lähtien (DeBoer, 2004). Se on sosiaalinen tapahtuma, missä oppijan on itse otettava vastuu työstään ja oltava tietoinen siitä (Minner & al., 2010).

Tutkimuksellisessa opiskelussa yhdistyvät omakohtainen tutkiminen, oppilaskeskeinen opiskelu ja tieteen käsitteiden havaitseminen käytännössä (Minner & al., 2010; Gordon, 1990). Kun opiskeltavaa asiaa lähestytään tutkimuksellisen opiskelun kautta, asiaan haetaan järjestelmällisesti ratkaisua etsimällä vastausta erilaisista tietolähteistä, kokeita tekemällä tai havaintoaineistoa hankkimalla (Hakkarainen & al., 2004). Opiskelumenetelmän taustalla on ajatus, jonka mukaan opiskelijat kehittävät tietoaan ja ymmärrystään tieteellisistä asioista samantapaisella prosessilla, kuin mitä tiedemiehet ovat aikoinaan käyneet läpi tutkiessaan uusia kemian teorioita (DeBoer, 2004). Oppimisprosessissa on tarkoituksenmukaista jäljitellä tiedonrakentumisessa tieteelliselle tutkimukselle tyypillisiä käytäntöjä kuten ajatusten esittämistä toisille sekä sosiaalista vuorovaikutusta muiden tutkijoiden kanssa. (Hakkarainen & al., 2004)

Luonnontieteen tutkimukseen prosessina voidaan tutustua tutkimuksellisen opiskelun avulla. Dynaaminen tutkimusprosessi erotetaan usein viideksi eri vaiheeksi, jotka ovat ominaisia myös luonnontieteen tutkimukselliselle opiskelulle: (Minner & al., 2010)

- Tutkimuskysymysten muodostaminen
- Tutkimuksen suunnittelu ja toteutus
- Tutkimustulosten keruu ja selityksen muotoilu sen perusteella
- Johtopäätökset ja vaihtoehtoisten selitysten arviointi
- Keskustelu tuloksista ja selitysten perustelu

Tutkimuksellisen opiskelun tavoitteena on tukea oppimista, auttaa hahmottamaan ja jäsentämään luontoa ja sen ilmiöitä sekä tukea kokonaisvaltaisesti oppilaan persoonallisuuden kehittymistä (Lavonen & Meisalo, 2007). Tavoitteena on myös kannustaa oppilaita ajattelemaan itsenäisesti, mutta kuitenkin käyttämään myös toisia oppilaita tietolähteinä, ajatusten testaajina ja ajatusmallien välittäjänä (DeBoer, 2004; Seitamaa-Hakkarainen & Hakkarainen, 2004).

Tutkimuksellista opiskelua voi toteuttaa opetuksessa monella tavalla. Tavat poikkeavat toisistaan avoimuudella eli sillä kuinka paljon opettaja ohjaa työn tekoa ja kuinka itsenäisesti oppilaat paneutuvat työhönsä (DeBoer, 2004). Tehtävät ovat avoimia, kun oppilaalle annetaan mahdollisuus aloitteellisuuteen, ideointiin, päätöksentekoon, vastuun ottamiseen, pitkäjänteiseen omaehtoiseen toimintaan ja itse arviointiin (Lavonen, Meisalo & al., 1998).

Kemian opetuksen tulee olla innostavaa ja mielekästä. Opetuksen tulisi lähteä tasolta, jonne oppilaat ovat aikaisemmissa opinnoissa yltäneet. (Aksela & Juvonen, 1999) Tutkimuksellinen opiskelu voidaan nähdä monella tavalla mielekkäänä oppimisena. Opetuksessa hyödynnetään muun muassa opiskelijan henkilökohtaisia assosiaatioita, opetus sisältää ideoitten syvällistä käsittelyä ja se mahdollistaa opiskelijan tulevan tietoiseksi omista vaihtoehtoisista käsityksistään (Hodson, 1990).

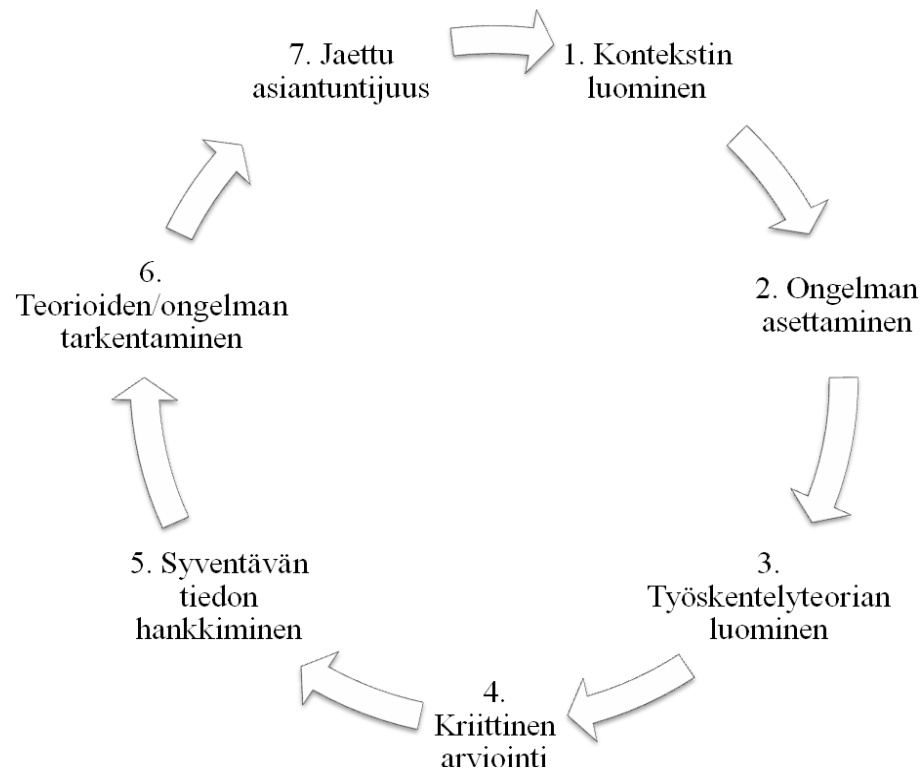
Tutkimus osoittaa, että tutkimuksellisella opetuksella on positiivisia oppimista tukevia vaikutuksia sekä sillä on saavutettu hyviä oppimistuloksia (Hodson, 1990). Esimerkiksi, opiskelijoiden kognitiiviset taidot ja laboratoriotyöskentelytaidot kehittyvät sekä tiedon ymmärtäminen parantuvat opiskeltaessa tutkimuksellisen opiskelun työtavan mukaisesti (Chang & Mao, 1998). Zachos & al, (2000) osoitti tutkimuksessaan, että yläkoululaiset oppilaat pystyivät varsin lyhyessä ajassa muodostamaan käsityksiä luonnontieteellisistä lainalaisuuksista ja testaamaan niitä kokeellisesti tutkimuksellisen opiskelun avulla.

4.2.1 Tutkimuksellisen kokeellisen opiskelun peruseriaatteet

Tutkimuksellisen opiskelun peruseriaatteisiin kuuluu seuraavat asiat: (Seitamaa-Hakkarainen & Hakkarainen, 2004)

- Pyrkimys ilmiöiden ymmärtämiseen ja ilmiöiden selittämiseen, ei ainoastaan annettujen tehtävien suorittaminen. Ymmärtäminen syntyy ilmiöiden merkityksen ja keskinäissuhteiden selittämisestä ja oivaltamisesta.
- Tiedonhankinta lähtee liikkeelle ongelmalähtöisestä ihmettelystä. Oppimisprosessi on ongelmanratkaisuprosessi, jonka alussa ongelmat määritellään.
- Omat ennakkokäsitykset nostetaan esiin. Oppilaiden omat käsitykset ja ajatukset otetaan yhteisen keskustelun kohteeksi ja niitä verrataan keskenään sekä arvioidaan niitä suhteessa tieteellisiin teorioihin.
- Huomio keskitetään keskeisiin käsitteisiin, periaatteisiin ja ilmiöihin.
- Tietoa rakennetaan yhdessä ja asiantuntijuus jaetaan. Oppilaita ohjataan systemaattisesti yhteisöllisen tiedonrakentelun prosessiin, missä tuotetaan hypoteeseja, teorioita, selityksiä ja tulkintoja.

Tutkimuksellisen opiskelun periaatteita voidaan kuvata myös syklisenä prosessina, kuten kuvassa 4.2 esitetään (Hakkarainen & al., 2004; Juuti, 2002).



Kuva 4.2. Tutkimuksellisen opiskelun syklinen prosessi.

Tutkimuksellisen opiskelun teoria voidaan liittää luontevasti polttokennojen kemian opetukseen. Esimerkiksi, kontekstiksi voidaan ottaa ilmastonmuutos tai yhteiskunta- ja teknologia. Ongelmaksi asetetaan tällöin joko kasvihuonepäästöjen vähentäminen tai tehokkaampien energiantuotanto menetelmien kehittäminen. Työskentelyteorioiden luomisessa otetaan esille oppilaiden aikaisemmat tiedot ja ennakkokäsitykset. Kriittisen arvioinnin vaiheessa pohditaan tutkimuksen hypoteeseja sekä arvioidaan, kuinka hyvin ne selittävät tutkittavaa ilmiötä. Syventävä tiedonhankinta on oppimisen kannalta tärkeä vaihe. Siinä suoritetaan luonnontieteellinen koe tai hankitaan tietoa monenlaisista tietolähteistä. Jaetun asiantuntijuuden vaiheessa kaikki prosessin osatekijät jaetaan oppimisyhteisön jäsenten kesken. Asiantuntemuksen jakaminen synnyttää uutta tietoa ja ymmärrystä, mihin kukaan ei yksinään pystyisi. Tällainen syklinen oppimisprosessi voi jatkua edelleen aikaisempien tutkimusten synnyttämien ongelmien pohjalta. Tällöin opiskelussa havaitaan ja jäljitellään tieteelliselle tutkimukselle tyypillisiä käytäntöjä.

4.3 Tutkimuksellisen opiskelun tukeminen, haasteet ja rajoitteet

Tutkimuksellinen opiskelu tukee oppilaan luontaista uteliaisuutta. Työtapana se tukee oppilaan kehitystä monipuolisesti. Oppilaat harjaannuttavat kriittistä ajattelua havainnoimalla, esittämällä kysymyksiä, tekemällä hypoteeseja, ennustamalla, suunnittelemalla tutkimuksia ongelman ratkaisemiseksi, tekemällä tarkkoja mittauksia, tulkitsemalla tuloksia, tekemällä johtopäätöksiä, yleistyksiä ja oletuksia sekä ymmärtämällä tieteellisen tutkimuksen rajat ja sen miten tietoa voidaan soveltaa uusiin tilanteisiin. (Gordon, 1990; Minner & al., 2010)

Tutkimuksellisessa opetuksessa opettajan on uskallettava heittäytyä tutkimuksen tekoon ja unohtaa oppikirjan seuraaminen (Juuti, 2002). Opettajan on luotava avoin ilmapiiri, jossa oppilaat ovat pääosassa ja opettaja toimii vain sivusta tarkkailijana. Opettajan on osattava ohjata oppilaita luovasti ja kannustavasti tutkimuksen aikana sekä osattava esittää avoimia kysymyksiä oppilaille (DeBoer, 2004; Gordon, 1990).

Tutkimuksellisen lähestymistavan kautta oppiminen on tehokkainta, kun oppilas omistautuu oppimiselle sekä kantaa vastuun omasta oppimisestaan (Näsäkkälä & al., 2001). Työn hyviin puoliin kuuluu sen palkitsevuus oppilaalle, kun hän ratkaisee jonkun ongelman (Gordon, 1990). Tutkimuksellisen opetuksen toteuttamisen edellytyksenä ovat asianmukaiset puitteet. Laboratoriotila, reagenssit ja työvälineet ovat oltava saatavilla (Näsäkkälä & al., 2001).

Tutkimuksellisen opiskelun käyttöönotto opetukseen vaatii opettajalta harjaantumista. Opettajalta vaaditaan aluksi paljon aikaa ja suunnittelutyötä opetuksen toteuttamiseen, kunnes opettajan ammattitaito kehittyy. Työtapana tutkimuksellinen opiskelu sopii kuitenkin kaikkiin kemian aihealueisiin, joissa on löydettävissä syy-seuraussuhteita. Opetusmenetelmä on hidas perinteiseen opettajajohtoiseen opetukseen verrattuna. Ajan puutteen takia moni opettaja ei käytä tutkimuksellista opiskelua työtapana opetuksessa. (DeBoer, 2004; Gordon, 1990) Suomen lukioissa on myös suuri paine menestyä valtakunnallisissa ylioppilaskokeissa, jolloin uusien opetustapojen käyttöä ja kokeilua opetuksessa vierastetaan ajan puutteen pelossa (Aksela & Juvonen, 1999).

Tutkiva opetus edellyttää oppilaalta monia taitoja. Esimerkiksi tutkimuksen aihepiiriin ja menetelmiin tutustumista, systemaattista työskentelyä ja kykyä erottaa olennaisin epäolennaisesta, tiedon esittämistä taulukkoina, kaavioina ja tekstinä kirjallisesti että suullisesti sekä saatujen tulosten luotettavuuden ja tarkkuuden arvioimista. (Lavonen & Meisalo, 2007) Tutkimuksellista opiskelua toteutetaan enimmäkseen yläkoulun opetuksessa, jolloin nuorille ei vielä ole ehtinyt kehittyä täysin kaikki työtavan edellyttämät taidot kuten kognitiiviset taidot. Jos oppilailta puuttuu tutkimukselliseen opiskeluun kuuluva osaaminen, voi työtavan käyttäminen olla oppilaille jopa haitallista ja johtaa turhautumiseen. Tähän haasteeseen opettaja voi vaikuttaa antamalla oppilaille ensin mahdollisuus tutkia ja pohtia ja lopuksi käydä tutkimus läpi väärinymmärrysten ehkäisemiseksi. (Kuhn & al., 2000) Ryhmä, jolla on vain vähän kokemusta tutkimuksellisesta opiskelusta, on hyvä lähteä liikkeelle selkeästi opettajan avustamana (Bybee, 2004).

Oppilaiden itsenäinen työskentely on edellytys tutkimuksellisen opiskelun onnistumiselle. Itsenäisyyttä rajoittavia tekijöitä voi olla muun muassa käytettävissä oleva aika, välineet, oppilaiden persoonallisuuden kehitystaso, kognitiivinen taso ja oppilaiden harjaantumattomuus itsenäiseen työskentelyyn. (Lavonen & al., 1998) Toisaalta oppilaiden on osattava toimia myös ryhmänä kuten tieteelliset tutkimusryhmät toimivat. Vaikka ryhmät voivat olla hyvin heterogeenisiä tiedoiltaan ja taidoiltaan, voi ryhmä toimiessaan yhdessä hyötyä sen kaikista jäsenistä. Ryhmässä ideoitten jakaminen edistää tutkimusta. (Eräpelto & Tynjälä, 1999)

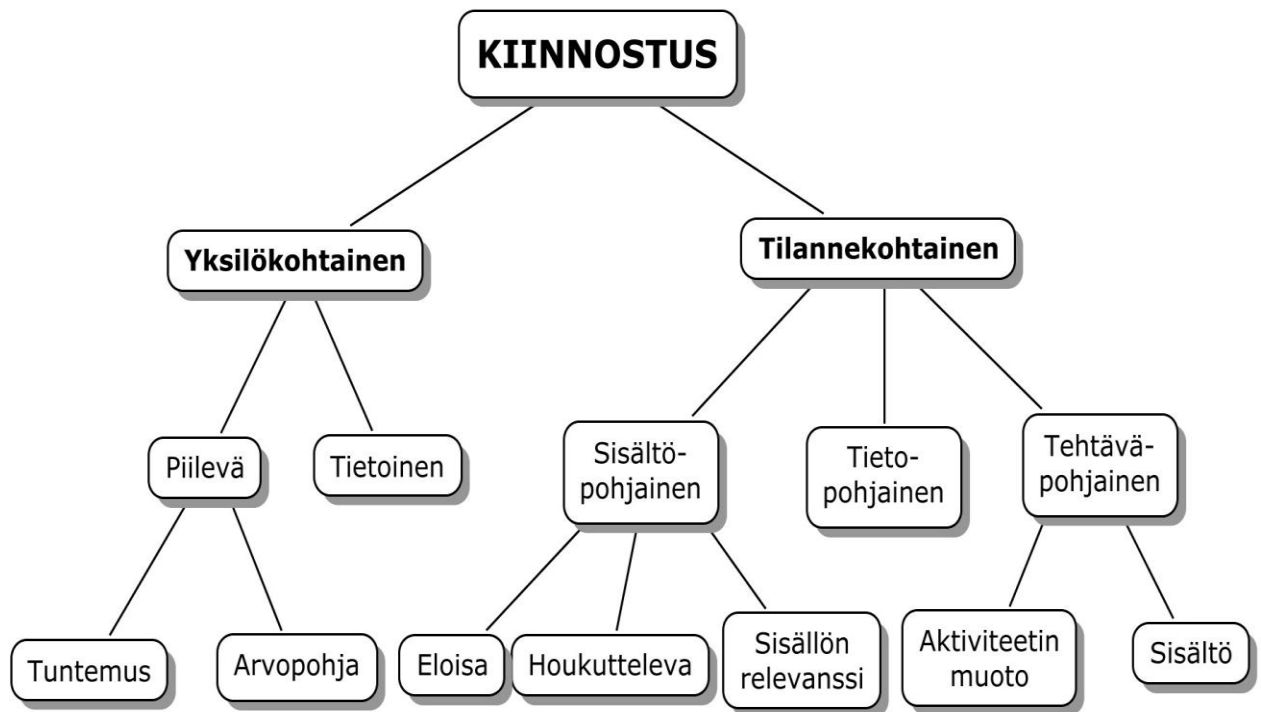
Polttokennojen kemian opetusta voidaan toteuttaa tutkimuksellisen opiskelun avulla. Tämän tutkimuksen työohjeet ovat laadittu siten, että ne ensisijaisesti herättävät oppilaiden kiinnostuksen opiskeltavaa asiaa kohtaan ja motivoivat oppilaita opiskelemaan. Oppilaat harjaannuttavat myös kokeellisuuteen liittyviä taitoja ja yhteistoiminnallisuuteen liittyviä valmiuksia (Näsäkkälä & al., 2001).

5. KIINNOSTUS

Kiinnostuksen ajatellaan syntyvän yksilön vuorovaikutuksessa ympäristön kanssa (Krapp, Hidi & Renninger, 1992). Se ilmenee monilla tavoin kuten yksilön aktiivisena osallistumisena, parantuneena tarkkaavaisuuden suuntaamisena, lisääntyneenä keskittymisenä sekä positiivisena tuntemuksena oppimista kohtaan (Hidi, 1990). Kun yksilö on kiinnostunut, hänelle syntyy tiivis suhde opiskeltaviin asioihin, mikä johtaa syväoppimiseen, jolloin opittuja tietoja voidaan käyttää uusissa tilanteissa (Krapp, 2002).

Kiinnostuksen yksiselitteinen määrittäminen on haastavaa, koska siihen liittyy paljon erilaisia tekijöitä. Yksi tapa määritellä kiinnostus on jakaa se kahteen päähaaraan: yksilökohtaiseen (*personal interest*) ja tilannekohtaiseen kiinnostukseen (*situational interest*) (kuva 5.1). Yksilökohtaista kiinnostusta kuvataan sisältä päin tulevana kiinnostuksena opiskeltavia asioita kohtaan kun taas tilannekohtainen kiinnostus herää spontaanisti ja on luonteeltaan ohimenevää (Hidi & Anderson, 1992). Yksilökohtaiseen kiinnostukseen liittyy yksilön henkilökohtaiset arvot. Siihen liittyvät myös yksilön ennakkotiedot, henkilökohtaiset kokemukset ja tunteet (Deci, 1992). Tilannekohtainen kiinnostus katsotaan olevan ympäristön luomaa ja kontekstisekä paikkasidonnaista (Hidi, Renninger, & Krapp, 1992). Tilannekohtainen kiinnostus voi kuitenkin muuttua syvemmäksi yksilökohtaiseksi kiinnostukseksi ajan kuluessa. (Schraw & Lehman, 2001)

Yksilökohtainen kiinnostus jaetaan edelleen kahteen osaan: piilevään (*latent*) ja tietoiseen (*actualized*) kiinnostukseen (Schiefele, 1992). Piilevä kiinnostus voidaan jakaa vielä tuntemuspohjaiseen ja arvopohjaiseen osaan. Tunnepohjaisella kiinnostuksella on ominaista positiivisten tunteiden liittyminen aiheita tai aktiviteettiä kohtaan kun taas arvopohjainen kiinnostus liittyy aiheen luomaan henkilökohtaiseen merkitykseen. Yksilökohtaisen kiinnostuksen toinen alalaji, tietoinen kiinnostus, viittaa aiheen sisällön kiinnostavuuteen ja haluun oppia aiheesta lisää. (Schiefele, 1991)



Kuva 5.1. Kiinnostuksen lajien jako yksilökohtaiseen ja tilannekohtaiseen kiinnostukseen (Hidi & Anderson, 1992).

Kiinnostukseen keskittynyt tutkimus tutkii pääasiassa tilannekohtaisen kiinnostuksen syntymistä ja tukemista, koska siihen kouluopetuksella on mahdollisuudet vaikuttaa. Yksilökohtaisen kiinnostuksen lajiin koulun on sen sijaan hankala vaikuttaa. Tilannekohtainen kiinnostus jaetaan kolmeen alalajiin: sisältöpohjaiseen (*text-based*), tietopohjaiseen (*knowledge-based*) ja tehtäväpohjaiseen (*task-based*) kiinnostukseen (kuva 5.1). Sisältöpohjaisella kiinnostuksella tarkoitetaan opiskeltavan asian sisältöjä kuten kirjallisen tekstin kiinnostuksen herättäviä ominaisuuksia. Tietopohjaiseen kiinnostukseen vaikuttaa asiaankuuluva aikaisempi tieto. Aikaisemmalla tiedolla on tutkimuskirjallisuuden mukaan enemmän vaikutusta yksilökohtaisen kiinnostuksen syntymiselle kuin tilannekohtaiselle kiinnostukselle, vaikkakin se liittyy oleellisesti molempiin kiinnostuksen lajeihin. Tehtäväpohjaisella kiinnostuksella tarkoitetaan kiinnostusta, joka voi syntyä ohjeiden antotavan ja tavoitteiden muuttuessa. (Schraw & Lehman, 2001)

5.1 Kiinnostuksen merkitys oppimisessa

Kiinnostus on tärkeä osa oppimisprosessia. Oppilaan kiinnostus vaikuttaa monella tavalla opiskeluun ja oppimiseen. Kiinnostunut oppilas seuraa tarkkaavaisemmin, keskittyy opiskeluun tehokkaammin ja haluaa oppia. Tutkimuksen mukaan myös korkeampi kiinnostuksen taso johtaa sekä määrällisesti että laadullisesti parempaan oppimiseen. (Schraw & Lehman, 2001; Alexander & Jetton, 1996)

Tilannekohtaisen kiinnostuksen kolmella alalajilla: sisältö-, tieto- ja tehtäväpohjaisella kiinnostuksella on kaikilla osoitettu olevan yhteys oppimiseen. Esimerkiksi sisältöpohjaiseen kiinnostukseen vaikuttavat opiskeltavan asian sisällön johdonmukaisuus, yhtenäisyys, helppo ymmärrettävyys ja värikkyys. Tutkimuksen mukaan tietopohjainen kiinnostus saattaa kumota sisältö- tai tehtäväpohjaista kiinnostusta, jos yksilöllä on hyvät aikaisemmat tiedot opiskeltavasta asiasta. Toisinaan voi olla, että tehtäväpohjainen kiinnostus voi kumota heikkoa sisältöpohjaista kiinnostusta. (Schraw & Lehman, 2001) Polttokennojen kemiaa käsittelevässä oppimateriaalissa on otettu huomioon sisältöpohjaisen kiinnostuksen tukemiseen vaikuttavat elementit sekä tehtäväpohjaista kiinnostusta tuetaan asettamalla työlle selkeät tavoitteet ja ohjeet.

5.2 Kiinnostusta tukeva opetus

Kiinnostuksen syntymistä opiskeltavaa asiaa kohtaan voidaan tukea kehittämällä kiinnostavia oppimateriaaleja. Tässä tutkimuksessa pyritään tuottamaan kiinnostusta tukevaa oppimateriaalia polttokennojen kemian opetuksen tueksi. Kiinnostavassa oppimateriaalissa tekstin on oltava yhtenäistä ja sen on herätettävä lukijan mielenkiinto (Mitchell, 1993). Oppimateriaalin sisältävien tietojen on oltava yhtenäisiä sekä relevantteja opiskelijan omien tavoitteiden kanssa. Tutkimuksen mukaan kiinnostavalla tarinalla on myös positiivinen yhteys oppimateriaalissa olevan tiedon muistamisen kanssa. (Schraw & Dennison, 1994) Kehitetty oppimateriaali polttokennojen kemiasta on yhdistetty tarinan muotoon kehyskertomuksen avulla.

Oppilaiden kiinnostus voidaan herättää ottamalla opetuksessa huomioon kontekstuaalisuus. Polttokennojen kemiaa voidaan opettaa kontekstuaalisesti esimerkiksi ympäristö sekä teknologia- ja yhteiskunta konteksteissa. Kontekstuaalisessa lähestymistavoissa oppilaita ohjataan kohtaamaan kemian käsitteitä sellaisissa tilanteissa tai asiayhteyksissä, joiden tiedetään tai uskotaan kiinnostavan oppilaita tai osoittavan, että kemiasta on hyötyä esimerkiksi jokapäiväisessä arkielämässä, jatko-opinnoissa ja työelämässä (Bennett, Hogarth ja Lubben 2003; Gilbert, 2006). Polttokennojen kemia näkyy oppilaiden arkielämässä muun muassa niiden käyttökohteiden kautta. Polttokennoilla toimivat julkiset kulkuvälineet ja kannettavat elektroniset laitteet ovat osa oppilaiden arkea lähitulevaisuudessa.

Opetuksessa tulisi ottaa huomioon nuorten kiinnostuksen kohteet. Yleisesti ottaen pojat ovat enemmän kiinnostuneet luonnontieteiden opiskelusta kuin tytöt (Kotte, 1992; Dawson, 2000). Kotte (1992) raportoi, että kiinnostuksen erot ja asenteet luonnontieteitä kohtaan kasvavat alakoulusta lähtien ja ovat suurimmillaan nuorten ollessa 10–14 -vuotiaita. Tutkimuksen mukaan poikien ja tyttöjen kiinnostuksen kohteet luonnontieteiden eri oppiaineita, aktiviteetteja ja opiskeltavia konteksteja kohtaan vaihtelevat. Sekä poikia että tyttöjä kiinnostivat kemian asiat, jotka sisälsivät konkreettisia havaintoja sekä aktiviteetteja, jotka sisälsivät kokeiluja ja tutkimuksia. (Osborne & Collins, 2001)

Kemian aihealueet kiinnostavat eri sukupuolia eri tavalla. Jones & al. (2000) tutkimuksen mukaan poikia kiinnostaa muun muassa atomipommit, tietokoneet ja teknologia (esim. teknologian mekaaniset sovellukset autoissa ja lentokoneissa). Poikien on tutkittu kiinnostuvan tyttöjä enemmän sähköenergian tuotannosta, sähköön vaikutuksista yhteiskunnan kehitykseen, energian säästöstä ja vaihtoehtoisista energianlähteistä, ajankohtaisista keksinnöistä ja löydöksistä tieteessä ja teknologiassa sekä kasvihuoneilmiöstä (Christidou, 2006). Tyttöjä sen sijaan kiinnostaa tutkimuksen mukaan biologiaan liittyvät aihealueet kuten esimerkiksi eläimet, viestintä ja terveellinen ruokavalio (Jones & al., 2000). Polttokennojen kemian opetuksessa voidaan ottaa huomioon molempien sukupuolten kiinnostuksen kohteet. Polttokennojen ympäristövaikutusten korostaminen tukee poikien kiinnostusta liittymällä osaksi kasvihuoneilmiöön ja tyttöjen kiinnostusta se tukee olemalla biologiaan liittyvä aihe.

Huomioitavaa kiinnostuksen jakautumisessa on kuitenkin se, että ne aihealueet, jotka kiinnostavat tyttöjä näyttävän kiinnostavat myös poikia, mutta tämä ei päde toisinpäin. Molempia sukupuolia kiinnostavia aihealueita on ihmisen biologiaan kuten terveyteen, ruokavalioon ja sairauksiin liittyvät asiat (Osborne & Collins, 2001). Christidou (2006) tutkimuksen mukaan vähiten kiinnostavina aihealueina molemmat sukupuolet pitivät ”tiede, teknologia ja niiden sosiaalinen ulottuvuus” ja ”tieteen uhkaavat näkökulmat ja teknologia” - aihealueita. Näille molemmille on yhteistä se, että niistä puuttuu henkilökohtainen ja sosiaalinen ulottuvuus. Polttokennojen opetus perustuu edellä mainittuihin aihealueisiin, joten sen opetuksessa on erityisesti kiinnitettävä huomiota henkilökohtaisen ja sosiaalisen ulottuvuuden näkymiseen.

6. TUTKIMUS

Tässä luvussa esitellään työn tutkimusvaiheet. Luvussa 6.1 esitellään tutkimusta ohjaavat tutkimuskysymykset ja tavoitteet. Luku 6.2 esittelee kehittämistutkimuksen vaiheita ja luku 6.3 käsittelee tutkimuksen luotettavuutta ja pätevyyttä.

6.1 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tutkimuksessa tavoitteena on luoda kiinnostusta tukevaa tutkimuksellisen opiskelun teorian mukaista oppimateriaalia yläkoulun polttokennojen kemian opetukseen.

Tutkimuskysymysten tarkoituksena on ohjata tutkimusta. Tämän tutkimuksen tavoitteena on saada vastaus seuraaviin kolmeen tutkimuskysymykseen:

1. Miten polttokennoja opetetaan yläkoulussa ja lukiossa?
2. Miten polttokennojen oppimista voidaan mielekkäästi tukea?
3. Minkälainen oppimateriaali polttokennoista kiinnostaa nuoria?
 - 3.1 Miten oppimateriaalin tukee poikien ja tyttöjen kiinnostusta?

Tutkimuskysymyksiin vastataan luvussa 7.

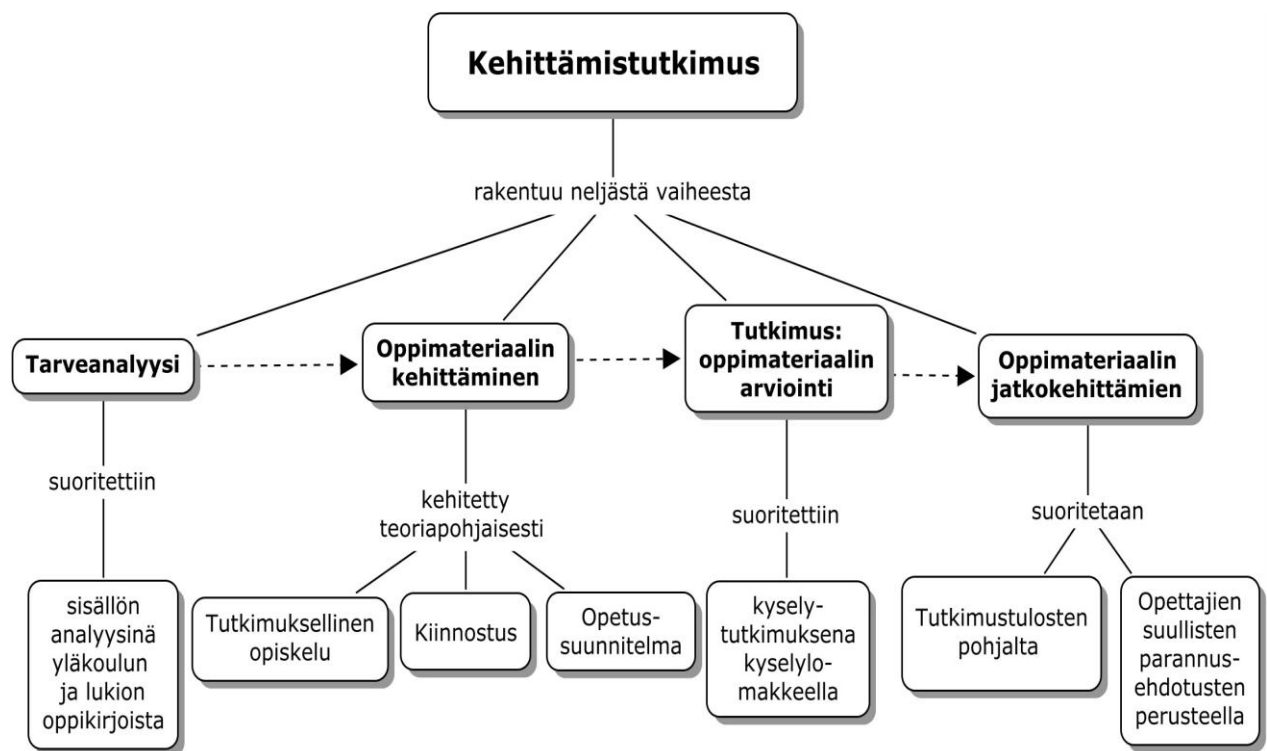
6.2 Kehittämistutkimus

6.2.1 Tutkimuksen toteutus

Tutkimus toteutetaan kehittämistutkimuksena (Edelson, 2002), joka sisältää neljä vaihetta:

1. Oppimateriaalin tarpeen kartoittaminen tarveanalyysillä
2. Oppimateriaalin kehittäminen
3. Tutkimuksen suoritus ja kehitetyn oppimateriaalin arviointi
4. Oppimateriaalin jatkokehittäminen.

Kuvassa 6.1 esitetään tämän kehittämistutkimuksen toteutusvaiheet. Kuvaa luetaan vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas.



Kuva 6.1. Kehittämistutkimuksen toteutus.

6.2.2 Tarveanalyysi

Tarveanalyysi tehtiin yläkoulun ja lukion opetuksessa käytettävistä oppikirjosta. Tutkimukseen otettiin mukaan 5 yläkoulussa käyttävää oppikirjaa sekä 5 lukiossa käytettävää oppikirjasarjaa, yhteensä tutkittavana oli 31 oppikirjaa (ks. liite 1).

Tarveanalyysi tehtiin oppikirjoista laadullisena sisällönanalyysinä eli tutkittavaa aineistoa pyrittiin kuvamaan sanallisesti ilman tulosten kvantitatiivista tarkastelua. Oppikirjoista tehtävällä sisältöanalyysillä saadaan kuvaus tutkittavasta ilmiöstä yleisessä ja tiiviissä muodossa. Aineistolähtöinen sisällönanalyysi on tapa, jolla aineisto saadaan järjestetyksi johtopäätösten tekemistä varten. (Tuomi & Sarajärvi, 2002)

Tarveanalyysin tavoitteena on tutkia, millä tavalla polttokennojen kemiaa esiintyy yläkoulun ja lukion oppikirjoissa. Tarveanalyysissä analysoitiin kaikki polttokennojen kemiaan liittyvät maininnat. Lisäksi analysoitiin oppikirjoissa käytettävät kuvat ja tehtävät. Oppikirjat soveltuvat hyvin tarveanalyysin kohteeksi. Tutkimusten mukaan opettajat tukeutuvat opetuksessaan vahvasti oppikirjoihin, mistä syystä oppikirja-analyysi antaa hyvän kuvan siitä, mitä polttokennojen kemiasta kouluissa opetetaan. (Uusikylä & Atjonen, 2000)

Tarveanalyysistä saadaan vastaus ensimmäiseen tutkimuskysymykseen:

1. Miten polttokennoja opetetaan yläkoulussa ja lukiossa?

6.2.3 Oppimateriaalin kehittäminen

Opetussuunnitelman perusteiden ja tarveanalyysin pohjalta kehitettiin kiinnostusta tukevaa tutkimuksellisen opiskelun teorian mukaista oppimateriaalia polttokennojen yläkoulun kemian opetukseen (ks. liite 3). Oppimateriaalin kehittämistä ohjasi tutkimuksen toinen tutkimuskysymys:

2. Miten polttokennojen oppimista voidaan mielekkäästi tukea?

Polttokenno-oppimateriaalille asetetut tavoitteet:

Oppilas...

- ymmärtää polttokennojen kemian ja niiden merkitystä energiantuotannolle, ympäristölle ja yhteiskunnalle
- ymmärtää vedyn merkitys tulevaisuuden ympäristöystävällisenä polttoaineena
- tutustuu polttokennoihin tutkimuksellisen opiskelun mukaisesti. Opiskelu sisältää yhtenä osana kokeellista työskentelyä.
- Oppimateriaali herättää innostuksen kemian kohtaan sekä tukee kiinnostuksen syntymistä.

Oppimateriaalin kontekstiksi valittiin polttokennoauto, koska tarveanalyysin perusteella se on oppikirjoissa eniten mainittu käyttökohde polttokennoille. Konteksti nostaa Gilbertin mukaan (2006) oppimateriaalin mielekkyyttä ja opiskelijoiden motivaatiota. Toisaalta kaikissa oppikirjoissa ei käsitelty polttokennoautoa yhtenä sen käyttökohteista tai polttokennojen käyttökohteiden käsittelyn laajuus vaihteli oppikirjojen välillä. Kehitetty oppimateriaali tukee siis sekä polttokennojen opetusta oppikirjojen rinnalla että antaa uutta näkökulmaa polttokennojen kemian opetukseen.

Kehitettävässä materiaalissa haluttiin ottaa huomioon tyttöjen ja poikien kiinnostusta tukevat asiat. Tutkimuskirjallisuuden mukaan poikia kiinnostaa tyttöjä enemmän teknologia kun taas tyttöjä kiinnostaa poikia enemmän biologiaan ja ihmiseen liittyvät aihealueet (Kotte, 1992). Molempien sukupuolten kiinnostus pyrittiin ottamaan huomioon oppimateriaalia kehitettäessä. Oppimateriaalissa tarkastellaan polttokennojen kemiaa perusopetuksen opetussuunnitelman asettamien eri aihekokonaisuuksien kuten *vastuu ympäristöstä, hyvinvoinnista ja kestävästä tulevaisuudesta* sekä *ihminen ja teknologia* näkökulmista (Opetushallitus, 2004).

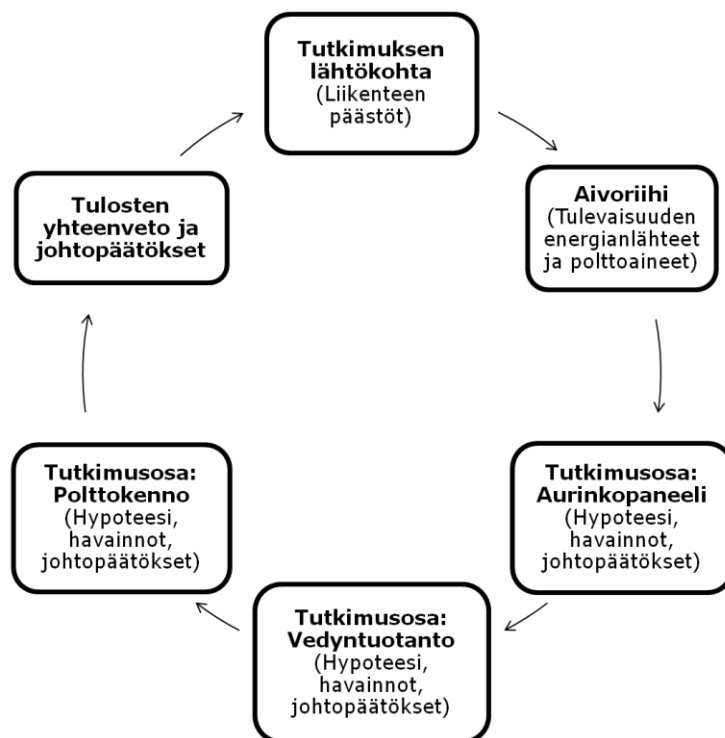
Yhtenä tavoitteena oppimateriaalin kehittämiseksi on sen korkea käytettävyys opetuksessa. Tämä tavoite otettiin huomioon sopivan polttokennon valinnassa. Oppimateriaali päädyttiin kehittämään pienoismallipolttokennoautoja hyödyntäen. Polttokennoautot tilattiin MFKA:n kautta, joka toimittaa opetusvälineitä Suomessa. Tässä tutkimuksessa käytettyjä autoja on tilattavissa MFKA:n verkkokaupan kautta hintaan 75 €. Vaikka oppimateriaalin käyttöönotto vaatiikin erillisiä hankintoja, pääsevät oppilaat kuitenkin suhteellisen edullisesti tutustuman polttokennon toimintaan ja vetyteknologian mahdollisuuksiin. Autoissa käytetään regeneroitua PEM -tyypin polttokennoa, jolla voidaan sekä valmistaa vedestä elektrolyytisesti vetyä ja happea sekä tuottaa näistä polttokennolla energiaa auton sähkömoottorille. Autoa voidaan siis hyödyntää opetuksessa melko kattavasti ja se soveltuu myös yksittäin hankittuna demonstraatiokäyttöön.

Oppimateriaalissa painotetaan ympäristönäkökulmaa ja sen kautta tuodaan esiin myös yhteiskunnallisia energiatalouteen liittyviä asioita. Materiaalin kehystarinalla, joka liittyy ilmastonmuutoksen ja liikenteen päästöjen vähentämiseen, pyrittiin lisäämään oppilaiden vastuunottamista omasta oppimisesta ja lisäämään kiinnostusta aihetta kohtaa. Aiheina ilmastonmuutos ja vaihtoehtoiset energianlähteet tukee varsinkin poikien kiinnostusta (Christidou, 2006). Aihe voidaan nähdä liittyvän ympäristönäkökulman kautta biologiaan, joka tutkimuksen mukaan tukisi tällöin myös tyttöjen kiinnostusta (Osborne & Collins, 2001).

Oppimateriaali kehitettiin oppilaan aktiivista roolia korostavaksi tutkimuksellisen opiskelun ja kiinnostuksen teorian periaatteita noudattaen. Oppilas saa asettua työskentelyssä tutkijan rooliin. Tutkimuksellisen opiskelun on opetustapana palkitsevaa oppilaalle (Gordon, 1990). Tutkimuksen mukaan tutkimuksellisen lähestymistavan on osoitettu vaikuttavan positiivisesti opiskelijoiden asenteisiin luonnontieteitä ja koulua kohtaan (Gibson & Chase, 2002) sekä olevan tehokkaampi tapa opiskella luonnontieteitä (Hodson, 1990; Näsäkkälä & al., 2001). Kiinnostuksen syntymistä tuetaan oppimateriaalissa tekstin mielenkiintoisella ja yhtenäisellä tekstillä (Mitchell, 1993).

Kehitetty oppimateriaali pyrittiin laatimaan niin, että oppilas voi kirjallisten ohjeiden perusteella suoriutua töistä ilman opettajan suurempaa ohjausta. Kehitetty materiaali koostuu kuvallisesta ”ohjekirjasta”, jossa on ohjeet auton rakentamiseen ja eri tutkimusvaiheiden tekoon. Ohjekirja sisältää myös tutkimusten hypoteesien asettamiseen ja johtopäätöksiin liittyviä kysymyksiä. Materiaali sisältää lisäksi oppilaalle jaettavan tuloskaavakkeen. Kaavakkeeseen kirjataan tutkimusten hypoteeseja, tuloksia ja johtopäätöksiä. Tuloskaavake auttaa oppilaita hahmottamaan olennaiset asiat tutkimuksista ja pohtimaan samalla työvaiheiden merkitystä. Kun oppilas toimii tutkimuksia tehdessä aktiivisena ajattelijana, parantaa se sisältöjen ja erityisesti tieteen ilmiöiden oppimista (Minner & al., 2010). Tuloskaavakkeen täyttäminen voidaan hyvin jättää pois työskentelystä, jolloin opiskelusta tulee avoimempaa, kuin oppilaat joutuvat itse pohtimaan ja kirjoittamaan tutkimuksista esimerkiksi kirjallisen raportin (DeBoer, 2004).

Tutkimuksellinen opiskelu näkyy kehitetyssä materiaalissa kuvan 6.2 mukaisesti. Tutkimuksen lähtökohtana on ilmastonmuutos ja liikenteen aiheuttamat päästöt, mikä tuodaan esille kehitetyn oppimateriaalin kehyskertomuksessa. Seuraavaksi oppilaat pohtivat tutkimusryhmissään, millaisia ratkaisuja voidaan kehittää tulevaisuuden liikennejärjestelmille. Oppilaat pohtivat tulevaisuuden energianlähteitä, joilla voitaisiin korvata polttomoottori sekä tulevaisuuden polttoaineita fossiilisten polttoaineiden tilalle. Aivoriihen jälkeen lähdetään tekemään tutkimuksia polttokennopienoismalliautoa apuna käyttäen. Ensin tehdään aurinkopaneelitutkimus, jossa tarkoitus on tutkia, voiko aurinkopaneeli tuottaa riittävästi virtaa polttokennoauton sähkömoottorille. Seuraavaksi tutkitaan veden elektrolyysiä ja vetyä tulevaisuuden polttoaineena. Autossa tuotetaan PEM -elektrolyysikennolla elektrolyytisesti vedestä vety- ja happikaasu auton tankkeihin. Tankkauksen jälkeen tutkitaan polttokennojen toimintaa energiantuottajana. Työn tekeminen noudattaa luonnontieteelliselle tutkimukselle ominaisia vaiheita. Tutkimuksissa tehdään hypoteesi, kirjataan tutkimustulokset ja pohditaan johtopäätöksiä.



Kuva 6.2. Tutkimuksellinen opiskelu kehitetyssä oppimateriaalissa.

Kehitetyn oppilaalle suunnatun oppimateriaalin lisäksi opettajalle on laadittu PowerPoint -esitys, mikä on tehty tulosten läpikäynnin ja yhteisten pohdintojen tueksi. Kaikki tässä tutkimuksessa kehitetty oppimateriaali on löydettävissä Internetistä osoitteesta:

http://www.helsinki.fi/kemianluokka/yksikko/huhtikuu_2010.html.

6.2.4 Tutkimuksen kohderyhmä

Tutkimukseen osallistui 159 yläkoulun 8-luokan oppilasta, joista 72 oli poikia ja 87 oli tyttöjä. Otosta voidaan pitää riittävänä määrälliselle tutkimukselle (Cohen, Manion & Morrison, 2007). Tutkimuksen kohderyhmän valinnassa käytettiin mukavuusotantaa.

Tutkimuksen taustatiedoissa selvitettiin oppilaiden kiinnostusta kokeellisuutta ja kemiaa kohtaan. Vastaajat suhtautuivat positiivisesti kokeelliseen työskentelyyn laboratoriossa. Tutkimusryhmän vastaajista 68 % piti kokeellista työskentelyä laboratoriossa jokseenkin tai erittäin kiinnostavana. Vastaajista 37 % piti kemiaa jokeenkin tai erittäin kiinnostavana (taulukko 6.1). Tutkimuksen mukaan tyttöjen ja poikien kiinnostus kokeellisuutta kohtaan eroaa siten, että pojat olivat tyttöjä enemmän kiinnostuneempia kokeellisuudesta (Arajärvi & Aksela, 2009). Tämän tutkimuksen tulosten mukaan on samoin (keskiarvo pojille 3,89 ja tytöille 3,76).

TAULUKKO 6.1

Oppilaiden vastaukset (N=159)

Arvioitava kohde	f.						ka.	kh.
	täysin eri mieltä	jokseenkin eri mieltä	ei samaa eikä eri mieltä	jokseenkin samaa mieltä	täysin samaa mieltä	en osaa sanoa		
Kokeellisuuden kiinnostus	1	19	23	78	30	8	3,77	0,93
Kemian kiinnostavuus	14	35	44	48	10	6	3,03	1,09

Oppilaiden tutkimuksen aikana täyttämä kyselylomake kerättiin nimettömänä. Tulosten analysointia varten lomakkeet numeroitiin 1-159.

6.2.5 Tutkimuksen kulku

Tutkimuksen oppimateriaalin suunnittelu aloitettiin kesällä 2009. Polttokennoautojen tilaukset hoidettiin keväällä 2009. Tutkimuksen oppimateriaalin suunnittelu aloitettiin kesällä 2009. Tilattujen autojen mukana oli vain englanninkieliset käyttöohjeet, joten kehitettyä oppimateriaalia varten tuli käyttöohjeet kääntää suomeksi ja tehdä työohjeesta pedagogisen mallinen, tutkimuksellisen oppimisen, mukainen oppimateriaali.

Kehitettyä oppimateriaalia ja tutkimuksessa käytettyä kyselylomaketta sekä niiden toimivuutta tutkittiin pilottitutkimuksessa Kemianluokka Gadolinissa viikolla 4. Pilottitutkimukseen osallistui yhteensä 34 8-luokkalaista oppilasta. Varsinainen tutkimus toteutettiin Kemianluokka Gadolinin toiminnan yhteydessä Mäntsälän Ehnroosin koululla, missä vietettiin teknologiaviikkoa viikolla 6.

Tutkimusmateriaalia kerättiin yhteensä 18 kemiapajasta. Pajoissa työskenneltiin kehitetyn oppimateriaalin mukaisesti ja kyselytutkimuksella pajan lopuksi tutkittiin oppimateriaalin kiinnostavuutta. Tutkimus toteutettiin kahtena peräkkäisenä päivänä. Ensimmäisenä päivänä pajoja pidettiin 10. Toisena päivänä pajoja oli kahdeksan. Jokainen paja oli kestoaltaan 60 minuuttia, minkä aikana kehitetty tutkimuksellisen opiskelun mukainen opiskelutuokio toteutettiin. Opiskelutuokion jälkeen oppilailta kerättiin kyselylomakkeella (ks. liite 4) tutkimusaineistoa oppimateriaalin kiinnostavuudesta ja sen toimivuudesta. Pajoja oli pitämässä neljä ohjaaja. Kussakin pajassa oli kerrallaan kaksi ohjaajaa. Tutkija oli itse mukana pajojen pitämisessä

6.2.6 Kyselylomake

Kehitettyä oppimateriaalia arvioidaan kyselylomakkeella (ks. liite 4). Kyselylomake koostuu IV mittarista: (I) taustatiedot, (II) oppimistehtävien sisältöjen kiinnostavuus, (III) oppimistehtävien sisällöt ja (IV) vapaa palaute.

Mittarissa I kysytään vastaajan sukupuolta, kokeellisen laboratoriotyöskentelyn kiinnostavuutta ja kemian kiinnostavuutta. Mittari II koostuu suljetuista kysymyksistä, joissa vastaajat arvioivat oppimateriaalin kiinnostavuutta viisiportaista Likertin järjestelmäasteikkoa käyttäen (Hirsjärvi & al, 2009). Asteikolla 1= ei lainkaan kiinnostava, 2= vähän kiinnostava, 3= neutraali, 4= jokseenkin kiinnostava ja 5= erittäin kiinnostava. Kyselylomakkeessa oli annettu myös mahdollisuus vastata 0, joka tarkoittaa ”en osaa sanoa”. Kyselylomakkeen mittarissa III kartoitetaan oppimateriaalin työhöjeiden ja ohjekirjan ulkoasua sekä sisältöjen laajuutta ja vaatimustasoa. Kysymykset on suljettuja, joiden arvioinnissa käytetään viisiasteista mitta-asteikkoa, jossa 1= välttävä, 2= tyydyttävä, 3= hyvä, 4= kiitettävä ja 5= erinomainen. Kyselylomakkeen avoimissa kysymyksissä kartoitetaan perusteluja oppimateriaalien sisällöistä. Osiossa IV vastaajat saavat antaa vapaata palautetta tutkijalle avoimella vastausalueella.

Vastaajilla oli noin viisi minuuttia aikaa vastata kyselyyn, minkä takia kyselylomake laadittiin mahdollisimman selkeäksi ja yksinkertaiseksi. Tästä syystä lomake ei sisällä ns. varmennuskysymyksiä, joilla voitaisiin todeta vastaajien vastausten johdonmukaisuus. Lomakkeen ulkoasuun kiinnitettiin myös erityistä huomiota. Kyselylomake on kaksisivuinen, mutta se kopioitiin mahtumaan horisontaalisesti yhdelle A4 lomakkeelle, jolloin vastaajien ei tarvitse kääntää lomaketta. Kyselylomakkeen taulukot tehtiin selkeiksi, jotta vastaukset olisi helppo antaa.

Kyselylomakkeen toimivuutta testattiin pilottitutkimuksessa Kemianluokka Gadolinissa. Kyselyyn vastasi tällöin 34 vastaajaa. Kyselylomaketta parannettiin tutkijan omien havaintojen perusteella. Esimerkiksi ”töiden laajuus” ja ”töiden kemian vaatimustaso” -kysymysten mitta-asteikkoa muutettiin viisiportaisesta asteikosta (1= välttävä, 5= erinomainen) sanalliseen muotoon (laaja, sopiva, suppea /vaikea, sopiva, helppo), jolloin saatiin parempi kuva vastaajien arvioista.

6.2.7 Tutkimusaineiston analysointi ja arviointi

Tutkimusaineiston analysointia ja arviointia ohjasi tutkimuskysymys:

3. Minkälainen oppimateriaali polttokennoista kiinnostaa nuoria?

3.1 Miten oppimateriaalin tukee poikien ja tyttöjen kiinnostusta?

Tutkimuksen kyselylomakkeella kerätty aineisto analysoitiin kvantitatiivisesti SPSS 15.1 (Statistical Package for Social Science) tilasto-ohjelmalla. Ensin tutkimusaineisto koodattiin Microsoft Office Excel 2007 -taulukkolaskentaohjelmaan, josta ne siirrettiin tilastollisia analyysejä vasten SPSS -ohjelmaan. Vastauksista analysoitiin frekvenssit, tyyppi-arvot, keskiarvot ja keskihajonnat. Lisäksi tehtiin t-testit ja määritettiin p-arvot. P-arvo kuvaa sukupuolikohtaisen kiinnostuksen erojen merkitsevyyttä.

Kyselylomakkeen avoin kysymys analysoitiin aineistolähtöisellä sisällönanalyysillä. Tutkimuslomakkeet koodattiin juoksevilla numeroilla 1-159, jotta voidaan esittää yksittäisten vastaajien tulokset.

6.2.8 Oppimateriaalin jatkokehittäminen

Oppimateriaalia on esitelty opettajille Kokkolassa järjestettävillä valtakunnallisilla kemian opetuksen päivillä sekä Helsingissä LUMA tiede- ja teknologiapäivillä. Opettajien suulliset parannusehdotukset on otettu huomioon oppimateriaalin jatkokehittämisessä. Materiaalia on paranneltu myös Kemianluokka Gadolinin ohjaajakollegoilta saadun palautteen perusteella. Lopullinen oppimateriaali löytyy tämän tutkimuksen liitteestä 3.

7. TULOKSET

Tässä luvussa käsitellään tarveanalyysin tulokset ja sen pohjalta kehitetyn oppimateriaalin sekä sen arvioinnin tulokset. Luku 7.1 esittelee tarveanalyysin tulokset. Tarveanalyysillä saadaan vastaus ensimmäiseen tutkimuskysymykseen: miten polttokennoja opetetaan yläkoulussa ja lukiossa? Luku 7.2 esittelee tutkimuksessa kehitetyn oppimateriaalin. Oppimateriaalin kehittämistä ohjasi toiseen tutkimuskysymys. Kolmanteen tutkimuskysymykseen: minkälainen oppimateriaali polttokennoista kiinnostaa nuoria?, saadaan vastaus kokeellisten töiden yhteydessä toteutetun kyselytutkimuksen vastauksista, joita käsitellään luvussa 7.3.

7.1 Polttokennojen kemiaa yläkoulun ja lukion opetuksessa

Oppikirjoista tehdyllä tarveanalyysillä selvitettiin, miten polttokennojen kemiaa käsitellään yläkoulun ja lukion oppikirjoissa. Tarveanalyysi toteutettiin laadullisena sisällönanalyysinä. (Tuomi & Sarajärvi, 2002) Hyvän kokonaiskuvan saamiseksi analyysissä tutkittiin yhteensä 5 yläkoulun ja 26 lukion kemian oppikirjaa. Yläkoulun kirjoja merkitään kirjantunnuksin (F-J). Lukion oppikirjat nimettiin kirjain ja numero yhdistelmin. Kirjain symboloi kirjasarjaa ja numero kertoo kirjasarjan kemian kurssin järjestysnumeron. Lukion tutkittavia kirjasarjoja oli yhteensä viisi (A-E) ja kirjoja kussakin kirjasarjassa viidestä kuuteen. Tutkituista yläkoulun oppikirjoista kolmesta oppikirjasta ei löytynyt lainkaan mainintoja polttokennoista. Lukion oppikirjoista 20 oppikirjasta ei löytynyt mainintoja polttokennojen kemiasta. Tutkitut oppikirjat ovat tarkemmin koottuna liitteessä 1.

Oppikirjoissa esiintyneet maininnat polttokennoista koottiin taulukkomuotoon. Polttokennojen kemiaa koskevat maininnat luokiteltiin kuuteen kategoriaan aineisto- ja teoriapohjaisesti.

Nämä kuusi kategoriaa ovat:

- Polttokennojen toiminta ja rakenne (taulukko 7.1),
- Polttokennotyypit (taulukko 7.2)
- Polttokennoissa käytettävät polttoaineet (taulukko 7.3.)
- Polttokennojen ympäristövaikutukset (taulukko 7.4)
- Polttokennojen käyttökohteet (taulukko 7.5)
- Muut maininnat polttokennojen kemiasta (taulukko 7.6).

Tarveanalyysin aineisto on koottu kokonaisuudessaan liitteeseen 2.

Oppikirja-analyysien taulukkojen ensimmäisessä sarakkeessa on tutkitun oppikirjan/oppikirjasarjan symboli tai symboli ja numero. Toiseen sarakkeeseen on koottu tiivistetysti oppikirjassa esiintynyt asia polttokennoista. Taulukon kolmanteen sarakkeeseen on listattu oppikirjoista kustakin aiheesta löytyvät kuvat ja tehtävät.

7.1.1 Kemian sisällöt polttokennojen kemiasta

Taulukko 7.1 esittelee maininnat, jotka liittyvät polttokennojen toimintaan ja rakenteeseen. Polttokennojen toimintaan liittyviä asioista mainittiin symbolitasolla esitettyjä kennoreaktioita, polttokennon rakenne ja polttokennon toimintaperiaate. Kaksi oppikirjaa (B4 ja C4) esittelivät kaavakuvan polttokennojen toiminnasta. Muut kaksi kuvaa oli makrotason esityksiä polttokennosta. Tehtäviä toimintaperiaatteeseen liittyen löytyi kaksi. Tehtävässä pyydettiin kirjoittamaan elektrodireaktiot etaanilla toimivalle polttokennolle ja kuvailemaan polttokennoa virran lähteenä.

TAULUKKO 7.1

Maininnat polttokennon toiminnasta ja rakenteesta

Kirj a	Maininnat tekstissä	Kuva tai tehtävä
A4	Vety-happi-polttokennon toimintaperiaate (kennoreaktiot) Polttokennon rakenneosien ja materiaalien kuvaus	Kuva: polttokenno kantolaukussa (makrotaso)
B4	Polttokennon toiminnan kuvaus verraten galvaaniseen kennoon sekä vety-happi-polttokennon kennoreaktiot Polttokennon rakenneosien ja materiaalien kuvaus	Kuva: kaavakuva vety- happipolttokennosta (submikroskooppinen ja symbolitaso)
C4	Polttokennon esittely hapetus-pelkistysreaktion kautta Vety-happipolttokennon kennoreaktiot Polttokennon rakenneosien ja materiaalien kuvaus	Kuva: poikkileikkaus kaavakuva vety- happipolttokennosta (submikroskooppinen ja symbolitaso)
D4	Polttokennon vertaus galvaaniseen kennoon Vety-happipolttokennon kennoreaktiot ja kennonrakenteen kuvaus	Tehtävä: kennoreaktioiden kirjoittaminen ja lasku
E4	Polttokennon vertaus galvaaniseen kennoon Kahden erityyppisen polttokennon toiminnan kuvaus ja Polttokennon rakenteen kuvaus	
I	polttokennon toiminnan vertaus akkuun ja paristoon	Kuva: Pienikokoisesta polttokennosta (makrotaso) Tehtävä: Millainen virtalähde polttokenno on?

Maininnat polttokennotyypeistä on koottu taulukkoon 7.2. Huomioitavaa polttokennotyyppien kemian käsittelyssä on, että kolme kirjasarjaa (A4, D4 ja E4) esittelee polttokennotyypeistä fosforihappopolttokennon ja alkalipolttokennon, vaikka tutkimuksen rintamalla lupaavimpina polttokennotyyppeinä pidetään PEM- ja SOFC polttokennoja.

Kirjasarja A ei mainitse yhtään polttokennotyyppiä nimeltä vaan luokittelee polttokennon yksistään niiden toimintalämpötilan mukaan matala- ja korkealämpöpolttokennoihin. Polttokennotyyppien nimet voi kuitenkin päätellä kirjan antamien elektrolyyttien perusteella. Huomioitavaa on myös se, että polttokennotyypeistä vain yksi oppikirja (D4) mainitsee PEM -kennotyyppin polttokennot, mikä on kuitenkin yksi tutkituimmista polttokennotyypeistä ja tässäkin tutkimuksessa käytettävä kennotyyppi. Polttokennotyypeistä löytyi vain yksi aiheeseen liittyvä tehtävä (B4), sekin on luonteeltaan tiedonhankintatehtävä.

TAULUKKO 7.2

Maininnat polttokennotyypeistä

Kirja	Maininnat tekstissä	Kuva tai tehtävä
A4	Matalassa lämpötilassa toimivat polttokennotyyppit: alkalipolttokenno ja fosforihappopolttokenno Korkeassa lämpötilassa toimiva kennotyyppi: sulakarbonaattipolttokenno	
B4		Tehtävä: Polttokennotyypeistä (tiedonhaku)
D4	Biopolttokennot PEM -kenno (polymeerielektrolyttimembraanikenno) Fosforihappokennot, alkalipolttokennot, sulakarbonaattikennot ja kiinteäoksidipolttokennot	
E4	Fosforihappopolttokenno ja alkalipolttokenno	

Mainintoja polttokennoissa käytettävistä polttoaineista on koottu taulukkoon 7.3. Jokaisesta lukion kirjasarjasta (A-E) löytyi mainintoja polttokennoissa käytettävistä polttoaineista. Polttoaineina mainittiin esimerkiksi nesteytetty vety, metallihybrideihin sitoutunut vetykaasu, vedyn ja hiilimonoksidin seos, metaani, metanoli, hiilivedyt ja etanoli. Oppikirjoista löytyi neljä kuvaa aiheesta. Kuvissa esitettiin nestemäisen vetypolttoaineen täyttöasema, metallihydridisäiliö, geoterminen voimala ja neljännessä kuvassa esitettiin kaavio vedyn valmistuksesta ja sen käytöstä energianlähteenä. Polttoaineisiin liittyviä tehtäviä löytyi kaksi. Tehtävätyypit olivat laskutehtävä ja tiedonhankintatehtäviä.

TAULUKKO 7.3

Maininnat polttokennoissa käytettävistä polttoaineista

Kirja	Maininnat tekstissä	Kuva tai tehtävä
A3	Vety Vedyn valmistus: hajottamalla vettä esimerkiksi aurinkosähköllä, kaasuttamalla biomassaa tai krakkauksreaktioiden sivutuotteena.	Kuva: Nestemäisen vetypolttoaineen täyttöasema (makrotaso)
A4	Vetyä ja joissakin tapauksissa vedyn ja hiilimonoksidin seos Metaani tai metanoli Hapettimena ilman happi	Kuva: metallihydridisäiliö (makrotaso)
B4	Vety	Kuva: Geoterminen voimala (makrotaso)
C4	Vety puhtaana alkuaineena tai hiilivetyyn sitoutuneena Hapettimena ilmasta saatava happi Vedyn valmistus: elektrolyytisesti vettä hajottamalla hyödyntämällä auringon energiaa	Kuva: Vedyn valmistus ja käyttö energianlähteenä (submikroskooppinen, makrotaso, symbolitaso) Tehtävä: Vety tulevaisuuden energianlähteenä.
D4	Polttoaine riippuu elektrodireaktioista: katodilla happikaasu, anodille polttoaine: mikä tahansa virtaava ja hapetettavissa oleva aine Metanoli ja etanoli Vedyn valmistus: paikan päällä tuotettuna metaanista tai hydratsiinista	Tehtävä: Lasku metaanilla toimivan polttokennon polttoainesäiliön tilavuudesta
E4	Polttoaineenaan vetykaasua ja hapettimena happikaasua Vedyn valmistus: muista vetyä sisältävistä yhdisteistä, kuten metaanista, metanolista, etanolista tai jopa maakaasusta	
H	Nestemäinen vety	Kuva: ilmalaivasta ja raketista (makrotaso)

Polttokennojen ympäristövaikutuksiin liittyvät maininnat on koottu taulukkoon 7.4. Kakki lukion oppikirjat käsittelivät ympäristönäkökohtia, tosin melko suppeasti. Ympäristönäkökohdista esille tuotiin jätteiden myrkyttömyys ympäristölle ja polttokennojen päästöttömyys eli ympäristöystävällisyys. Oppikirja D4 otti huomioon koko polttokennojen energiajärjestelmän päästöttömyyden eli polttokennojen käyttämä polttoainevety on myös tuotettava päästöttömästi. Vain yksi oppikirja (H) mainitsi reaktiotuotteena tulevan vedyn olevan liiallisessa määrin ympäristölle haitallista. Oppikirjat eivät käsitelleet aihetta tehtävissä eivätkä esittäneet siitä kuvia.

TAULUKKO 7.4

Maininnat polttokennojen ympäristövaikutuksista

Kirja	Maininnat tekstissä	Kuva tai tehtävä
A4	Jätteiden myrkyttömyys ympäristölle: reaktiotuotteena syntyy vain vettä Hiilipitoisista polttoaineista muodostuu veden ohella vain hiilidioksidia.	
B4	Saasteettomuus: lopputuotteena on pelkkä vesi	
C4	Ei synny ympäristölle haitallisia savukaasuja ollenkaan Muillakin polttoaineilla päästäjä tulee vähän verrattuna muihin energiantuotantotapoihin.	
D4	Vety-happipolttokennojen päästönä syntyy vain vettä. Ei synny haitallisia päästöjä missään vaiheessa. Edellyttää, että vedyn valmistukseen käytettävä energia tuotetaan päästöttömästi	
E4	Vety-happipolttokenno on saasteeton, ympäristöystävällinen tapa tuottaa sähköenergiaa	
H	Vedyn palaessa muodostuu pelkkää vettä. Tosin liiallinen vesihöyry on myös haitallista ympäristölle.	

Taulukossa 7.5 esitellään polttokennojen käyttökohteisiin liittyvät maininnat. Käyttökohteista oppikirjat mainitsivat polttokennoautot, voimalaitossovellukset ja kannettavat elektroniset laitteet. Eniten mainittu käyttökohde oppikirjoissa oli polttokennoauto, joita käsitteli myös oppikirjojen (B4, C4 ja D4) ainoat kuvat. Lukion oppikirjat (A-E) eivät käsitelleet käyttökohteiden yhteydessä lainkaan tehtäviä, sen sijaan yläkoulun kirjoissa (H ja I) tehtävissä käsiteltiin käyttökohteita.

TAULUKKO 7.5

Maininnat polttokennojen käyttökohteista

Kirja	Maininnat tekstissä	Kuva tai tehtävä
B4	Hajautettu sähköntuotanto, pienet voimalat Kannettavat tietokoneet Avaruustekniikassa Polttokennoautot	Kuva: Polttokennoauto (makrotaso)
C4		Kuva: Polttokennoauto (makrotaso)
D4	Kulkuvälineet (polttokennoauto, julkiset kulkuneuvot) Voimalaitossovellukset Kannettavien laitteet (kännykät, kannettavat tietokoneet) Skootteri, cd-levysoitin, kahvinkeitin Autojen apuvirranlähteenä	Kuva: Polttokennoauto (makrotaso)
E4	Autojen voimanlähteenä Elektroniikan ja tietokoneiden virtalähteinä	
H		Tehtävä: tiedonhankinta vetyautosta ja Internet tehtävä polttokennosta
I	Autojen laturit polttokennoilla toimiviksi	Tehtävä: Miksi tulevaisuuden autoissa polttokenno korvaa laturin?

Polttokennojen kemiaan liittyvät muut maininnat on esitelty taulukossa 7.6. Polttokennoista tuodaan esille muun muassa polttokennojen hyvä hyötysuhde sekä polttokennojen haasteita ja etuja. Eniten mainintoja oppikirjoista löytyi liittyen polttokennojen hyvään hyötysuhteeseen, mitä verrattiin polttomoottorin tai lämpövoimalan hyötysuhteeseen.

TAULUKKO 7.6

Muut maininnat polttokennojen kemiasta

Kirja	Maininnat tekstissä	Kuva tai tehtävä
A4	Hyvä hyötysuhde (50–80 %) parempi kuin polttomoottorin	
B4	Polttokennon hyötysuhde voi olla jopa 70 %, syntyvä lämpöenergian talteenotto nosta entisestään hyötysuhdetta (vrt. polttomoottorin hyötysuhde)	
C4	Kenno on äänetön, mutta jäähdytyspuhaltimet aiheuttavat jonkin verran ääntä. Polttokennoteknologia avaruustekniikassa Ongelmia: kennon korkea toimintalämpötila, riittävän hyvän sähköisen kosketuksen luominen kolmen eri faasin välille (kaasumainen polttoaine, kiinteät elektrodit ja elektrolyyttiliuos), katalyyttien korkeat hinnat ja kennon osien korroosio	
D4	Hyvä hyötysuhde Haaste: toimivan ja taloudellisen kennon kehittäminen Kosteudenhallinta Etuja: hyvä suorituskyky, nopea käynnistyminen ja reagointi kuorman muutoksiin, vähäinen korroosio ja kiinteän elektrolyytin käytön helppous	
E4	Hyvä hyötysuhde 40–70 % (vrt. lämpövoimala)	
I	Melko korkea hyötysuhde	

7.1.1.1 Kuvat

Kuvien käyttäminen polttokennojen kemian yhteydessä oli vähäistä. Peruskoulun oppikirjoista vain kirjasarja I esitti yhden makrotason kuvan polttokennosta. Lukion oppikirjojen yhteydessä kuvia esiintyi kaikissa polttokennojen kemiaa käsittelevissä oppikirjoissa. Kuvat polttokennojen kemiasta esitettiin kaikilla kemian kolmella kemian tiedon tasolla: makro-, submikroskooppinen ja symbolitasolla, mutta suurin osa oppikirjoista (A, D, E, H ja I) ei esitellyt aihetta näiden kaikkien tasojen näkökulmasta. Vain kirjasarjat B ja C esittelivät polttokennojen kemiaa kaikilla kemian kolmella tiedon tasolla.

7.1.1.2 Tehtävät

Oppikirjoista löytyi vain vähän tehtäviä polttokennojen kemiasta. Kaikista kirjasarjoista löytyi yhteensä seitsemän tehtävää. Tehtävissä pyydettiin, joko kirjoittamaan kennoreaktioita, laskemaan polttoaineen määriä, kuvailemaan polttokennoja virranlähteenä tai etsimään tietoa polttokennoista Internetistä. Yhteenkään tehtävään ei liittynyt kokeellisuutta.

7.1.2 Yhteenveto tarveanalyysistä

Perusopetuksen oppikirjat käsitelivät polttokennojen kemiaa hyvin suppeasti ja pintapuolisesti. Lukion tutkittujen viiden oppikirjasarjan välillä esiintyi polttokennojen kemian käsittelyn osalta vaihtelua. Kaikista kirjasarjoista löytyi mainintoja polttokennojen kemiasta vain kurssin KE4- *Metallit ja materiaalit* oppikirjoista. Poikkeuksena oppikirjasarja A käsiteli polttokennoja kurssin KE3 - *reaktiot ja energia* yhteydessä, jossa mainittiin polttokennojen käyttävän polttoaineenaan vetyä. Eniten mainintoja löytyi polttokennojen kemiasta niiden toimintaan ja rakenteeseen liittyvistä asioista (ks. taulukko 7.1) ja polttokennoissa käytettävistä polttoainesta (ks. taulukko 7.3). Vähiten mainintoja löytyi polttokennotyypeistä (ks. taulukko 7.2).

Tarveanalyysin tulosten perusteella pystyttiin rajaamaan kehitettävän oppimateriaalin sisällöt. Oppimateriaalin kontekstiksi valittiin oppikirjoissa eniten mainittu polttokennojen sovelluskohde, joka on polttokennoautot. Polttokennon polttoaineista useimmin mainittu oli vety, joka otettiin mukaan kehitettävän oppimateriaalin sisältöihin. Oppikirjat käsittelivät hyvin vaihtelevasti eri polttokennotyyppejä. Tämän tutkimuksen polttokennotyyppi on PEM - polttokenno, vaikka se mainittiin nimeltä vain yhdessä tutkituista oppikirjoista.

7.2 Kiinnostusta tukevan oppimateriaalin toteutus

Oppimateriaali kehitettiin tutkimuksellisen kokeellisen opiskelun periaatteita hyödyntäen (ks. luku 4.2.1) kehyskertomuksen ympärille. Kehitetty oppimateriaali alkaa ongelman määrittämisellä, jossa ilmaistaan liikenteen aiheuttamat korkeat päästöt. Oppilaat muodostavat ”aivoriihen” ja lähtevät etsimään ratkaisuja kahden tai kolmen hengen ryhmissä tulevaisuuden päästöttömiin liikenneratkaisuihin. Tehtävänä on kehitellä vaihtoehtoinen ratkaisu polttomoottorin tilalle ja tulevaisuuden polttoaine fossiilisten polttoaineiden tilalle.

Oppimateriaalin toimivuutta testattiin pilottitutkimuksessa Kemianluokka Gadolinin toiminnan yhteydessä. Oppilailta kerättiin palautetta tutkimuksessa käytettävällä kyselylomakkeella. Oppimateriaaliin tehtiin oppilaiden antaman palautteen perusteella korjauksia ja parannuksia. Myös opettajien ja toisen laboratorio-ohjaajan antamien suulliset palautteet otettiin huomioon materiaalin kehitystyössä.

Oppimateriaalin kehyskertomus johdattelee oppilaat aivoriihen jälkeen varsinaisiin kokeellisiin tutkimuksiin. Materiaalin ensimmäisessä vaiheessa tutkitaan aurinkopaneelia energianlähteenä. Tutkimuksessa selvitetään, tuottaako aurinkopaneeli yksinään riittävästi energiaa auton sähkömoottorille.

Aurinkopaneelitutkimuksen tulosten perusteella siirrytään kehittämään jokin parempi ratkaisu energiantuottamiseen. Tutkimukset jatkuvat vedyntuotanto -tutkimuksella. Vety toimii energian varastointimuotona. Auringonvalosta saatava energia voidaan sitoa kemialliseen muotoon. Tutkimuksessa tuotetaan polttoainevety- ja happikaasua veden elektrolyysillä. Tutkimuksessa seurataan vety- ja happikaasun tuotantonopeuksia ja pohditaan vedyn merkitystä tulevaisuuden polttoaineena.

Polttokennoauton tankkauksen jälkeen siirrytään tutkimaan polttokennoa energiatuottajana. Tutkimuksessa suoritetaan vetyauton ajotestit. Ajotestin tulosten vertailtavuuden vuoksi, testit tehdään ajoradalla. Ajoradaksi on kehitetty muovinen ”hulavanne”, jonka kehän pituus voidaan laskema ja näin saadaan ajotestitulokset metreissä ilmoitettavaan muotoon. Tämän tutkimuksen johtopäätöksissä pohditaan polttokennoauton kehittämistä paremmaksi.

Kaikki kolme tutkimusta yhdessä tuovat esille kehitystien, jossa ymmärretään aurinkopaneelien rajallisuus energiantuotannossa ja vedyn merkitys tulevaisuuden ympäristöystävällisenä polttoaineena polttokennoissa. Oppilaat pääsevät itse tutkimaan ja kokeilemaan uusien energiamuotojen toimivuutta sekä luomaan selityksiä tutkimusten tuloksille.

7.3 Oppimateriaalin arvioinnin tulokset

Kehitettyä oppimateriaalia ja sen toimivuutta tutkittiin 18 oppilasryhmällä (N=159). Oppilaat arvioivat kiinnostustaan kehitetyn oppimateriaalin laboratorioaktiviteettejä, tehtäviä ja aihealueita kohtaan viisiportaisella Likertin -järjestysasteikolla (1= ei lainkaan kiinnostava, 5= erittäin kiinnostava) (Hirsjärvi & al, 2009).

Kyselylomakkeen suljettujen kysymysten tulokset on koottu taulukkoihin 7.7.-7.14. Vastauksista analysoitiin frekvenssit, keskiarvo, tyyppi-arvo ja keskihajonta. Vastauksissa oli myös joitakin tyhjäksi jätettyjä vastauksia. Vastausvaihtoehto 0 ”en osaa sanoa” otettiin mukaan frekvenssien tarkasteluun, mutta niitä ei otettu huomioon keskiarvojen määrittämisessä.

Taulukko 7.7 esittää oppilaiden vastausten frekvenssit, keskiarvot ja keskihajonnat oppimateriaalin laboratoriotöiden työvaiheita kohtaan.

TAULUKKO 7.7

Oppilaiden kiinnostus oppimateriaalin laboratoriotöitä kohtaan. (N=159)

Arvioitava kohde	Frekvenssi						Keskiarvo	Keskihajonta
	1	2	3	4	5	0		
Aurinkopaneelin toiminnan tutkiminen	16	41	58	24	6	14	2,74	1,00
Polttokennoauton rakentamisen	6	16	34	63	35	5	3,68	1,06
Polttokennoauton tankkaaminen vedyllä*	10	24	43	56	18	7	3,32	1,09
Polttokennoautolla ajaminen**	6	9	24	55	58	4	3,99	1,07

* (N=158), ** (N=156)

Kiinnostavimmaksi laboratoriotyöksi nousi kyselytutkimuksen mukaan polttokennoautolla ajaminen (keskiarvo 3,88; tyyppiarvo 5). Oppilaat kokivat kiinnostavana myös polttokennoauton rakentamisen (keskiarvo 3,57; tyyppiarvo 4). Aurinkopaneelin tutkiminen kiinnosti vastaajia vähiten (keskiarvo 2,50; tyyppiarvo 3). Polttokennojen tankkaaminen vedyllä sai vastaajilta kiinnostuksen suhteen lähelle neutraalit arvostelut kun katsotaan keskiarvoa, joka on 3,17. Vedyn tankkaustutkimuksen tyyppiarvo on kuitenkin 4 eli jokseenkin kiinnostava.

Oppimateriaalin tehtävien kiinnostusta kartoitettiin kahdella suljetulla kysymyksellä. Tulokset on koottu taulukkoon 7.8. Oppilaiden vastausten keskiarvo kysymykseen ”tulosten kirjaaminen” on 2,37 ja tyyppiarvo on 2. Kysymys ”pohdintakysymyksiin vastaaminen” sai keskiarvoksi 2,51 ja tyyppiarvoksi 3. Molempien kysymysten vastaukset kallistuvat laskevan kiinnostuksen puolella, kun keskiarvo 3 tulkitaan neutraaliksi kiinnostukseksi.

TAULUKKO 7.8

Oppilaiden kiinnostus oppimateriaalin tehtäviä kohtaan. (N=159)

Arvioitava kohde	Frekvenssi						Keskiarvo	Keskihajonta
	1	2	3	4	5	0		
Tulosten kirjaaminen	36	46	43	18	4	12	2,37	1,07
Pohdintakysymyksiin vastaaminen	26	41	58	16	3	15	2,51	0,98

Vastaajista 22 (13,8 %) piti tulosten kirjaamista jokseenkin tai erittäin kiinnostavana. Pohdintakysymyksiin vastaamista 19 (11,9 %) oppilasta piti jokseenkin tai erittäin kiinnostavana.

Taulukossa 7.9 on esitetty frekvenssit, keskiarvo ja keskihajonta oppimateriaalin aihealueiden kiinnostavuudesta.

TAULUKKO 7.9

Oppilaiden kiinnostus oppimateriaalin aihealueita kohtaan. (N=158)

Arvioitava kohde	Frekvenssi						Keskiarvo	Keskihajonta
	1	2	3	4	5	0		
Vetyenergiatalous	15	35	51	31	9	17	2,89	1,07
Polttokennot ja sen sovellukset*	17	31	47	43	6	13	2,93	1,08
Aiheen ajankohtaisuus	15	28	46	41	14	14	3,08	1,13

*(N=157)

Oppilaiden kiinnostusta tuki jossakin määrin aiheen ajankohtaisuus (keskiarvo 3,08; tyyppiarvo 3). Oppilaat kokivat vetyenergiatalouden sekä polttokennot ja sen sovellukset alle neutraalin kiinnostuksen (keskiarvot 2,89 ja 2,93; tyyppiarvot 3 ja 3).

Kyselylomakkeen taustatiedoissa kysyttiin vastaajan sukupuolta, milloin voidaan vertailla oppimateriaalin vaikutusta kiinnostavuutta sukupuolien välillä. Taulukkoihin 7.10–7.12 on koottu tyttöjen ja poikien arviot kiinnostuksesta oppimateriaalin laboratoriotöitä, tehtäviä ja aihealueita kohtaan. Oppilaiden vastauksista analysoitiin sukupuolten keskiarvot. Lisäksi tehtiin t-testit ja määritettiin p-arvot. P-arvo kuvaa sukupuolikohtaisen kiinnostuksen erojen merkitsevyyttä.

Laboratoriotöiden työvaiheita pojat ovat tyttöjä kiinnostuneempia aurinkopaneelin toiminnan tutkimisesta ja polttokennoauton rakentamisesta. Tytöt olivat taas poikia enemmän kiinnostuneet polttokennoauton tankkaamisesta ja autolla ajamisesta. Poikien ja tyttöjen välillä ei löytynyt tilastollisesti merkitseviä eroja oppimateriaalin laboratoriotöiden kiinnostavuudessa (ks. Taulukko 7.10).

TAULUKKO 7.10

Tyttöjen ja poikien kiinnostus oppimateriaalin laboratoriotöitä kohtaan (N= 159)

Arvioitava kohde	Keskiarvo		t	p<
	Poika	Tyttö		
Aurinkokennon toiminnan tutkiminen	2,80	2,70	0,64	0,52
Polttokennoauton rakentamisen	3,71	3,66	0,30	0,77
Polttokennoauton tankkaaminen vedyllä	3,28	3,35	– 0,44	0,66
Polttokennoautolla ajaminen	3,93	4,04	– 0,63	0,53

Oppimateriaalin tehtävien kiinnostuksessa on tilastollisesti merkitsevä tulos kohdassa ”tulosten kirjaaminen” (ks. Taulukko 7.11). Tytöt olivat poikia kiinnostuneempia sekä tulosten kirjaamisesta että pohdintakysymyksiin vastaamisesta.

TAULUKKO 7.11

Tyttöjen ja poikien kiinnostus oppimateriaalin tehtäviä kohtaan (N= 159)

Arvioitava kohde	Keskiarvo		T	p<
	Poika	Tyttö		
Tulosten kirjaaminen	2,16	2,55	– 2,21	0,03*
Pohdintakysymyksiin vastaaminen	2,36	2,63	– 1,62	0,11

* p < 0,05

Oppimateriaalin aihealueista pojat olivat tyttöjä kiinnostuneempia polttokennojen sovelluksista (ks. Taulukko 7.12). Tämä tulos on tilastollisesti merkitsevä. Tyttöjä kiinnosti poikia enemmän vetyenergiatalous ja polttokennoaiheen ajankohtaisuus.

TAULUKKO 7.12

Tyttöjen ja poikien kiinnostus oppimateriaalin aihealueita kohtaan. (N= 159)

Arvioitava kohde	Keskiarvo		T	p<
	Poika	Tyttö		
Vetyenergiatalous	2,80	3,00	– 0,91	0,37
Polttokennot ja sen sovellukset	3,15	2,74	2,32	0,02*
Aiheen ajankohtaisuus	2,90	3,23	– 1,82	0,07

* p < 0,05

Oppimateriaalin ulkoasua ja selkeyttä arvioitiin viisiportaisella asteikolla, jossa 1=välttävä, 2=tyydyttävä, 3=hyvä, 4=kiitettävä ja 5=erinomainen. Taulukoon 7.13 on koottu arviontien tulokset. Oppilaat antoivat hyvät arvioinnit oppimateriaalille. Kaikkien arvioitavien kohteiden keskiarvot olivat yli hyvän (keskiarvo yli 3). Parhaan arvion sai ohjekirjan selkeys (3,72).

TAULUKKO 7.13

Oppilaiden vastaukset oppimateriaalin ulkoasusta ja selkeydestä. (N=159)

Arvioitava kohde	Frekvenssi					Keskiarvo	Keskihajonta
	1	2	3	4	5		
Työohjeen ulkoasu	4	17	52	60	26	3,55	0,97
Ohjekirjan ulkoasu	3	16	59	56	25	3,53	0,94
Työohjeen selkeys	3	14	51	57	34	3,66	0,97
Ohjekirjan selkeys	2	13	45	66	33	3,72	0,93

Taulukossa 7.14 on esitetty frekvenssit, keskiarvot ja keskihajonnat oppimateriaalin töiden laajuuden ja kemian vaatimustason arvioista. Kysymystä töiden laajuudesta arvioitiin asteikolla 1-3, jossa 1=liian laaja, 2=sopiva ja 3= suppea. Kemian vaatimustasoa arvioitiin myös kolmiportaisella asteikolla, jossa 1=vaikea, 2=sopiva ja 3=helppo.

TAULUKKO 7.14

Oppilaiden vastaukset oppimateriaalin töiden laajuudesta ja kemian vaatimustasosta. (N=159)

Arvioitava kohde	Frekvenssi			Keskiarvo	Keskihajonta
	1	2	3		
Töiden laajuus	2	151	6	2,03	0,22
Kemian vaatimustaso *	6	131	21	2,09	0,40

* (N=158)

Materiaalin laajuutta ja kemian vaatimustasoa pidettiin onnistuneina. Molemmat saivat oppilailta arvion sopiva (tyyppiarvot 2 ja 2). Vastaajista kaksi (1,3 %) piti töiden laajuutta laajana ja kuusi oppilaista (3,8 %) taas suppeana. Suurin osa vastaajista (95 %) oli sitä mieltä, että laboratoriotöiden laajuus oli sopiva. Kemian vaatimustasoa kuusi oppilasta (3,8 %) arvioi vaikeaksi ja 21 (13,2 %) oppilasta helpoksi. Kemian vaatimustasoa sopivana pitivät 82,4 % vastaajista.

Kyselylomakkeen avoimet kysymykset analysoitiin aineistolähtöisellä sisällön analyysillä ja vastaukset luokiteltiin aineistosta nousseihin luokkiin (Tuomi & Sarajarvi, 2002). Oppimistehtävien sisältöjen arvioinnin perusteluihin muodostui kuusi luokkaa. Perusteluja antoi 49 vastaajaa. Taulukossa 7.15 on esitetty muodostuneet luokat, niiden frekvenssit ja esimerkkejä vastaajien vastauksista.

TAULUKKO 7.15**Vastaajien perusteluja oppimistehtävien sisältöjen arvioinnista (N=49)**

Luokka	Frekvenssi	Esimerkki
Kiinnostava	4	<i>"Työ oli vaikea koska koulussa emme tee vastaavia kokeita. Koe oli vaikea, mutta KIINNOSTAVA" (Vastaaja 66)</i>
Hyvä työ	4	<i>"Ei ollu liian helppo muttei myöskään liian vaikea. Kiva tehtävä!" (Vastaaja 145)</i>
Selkeät/hyvät ohjeet	22	<i>"Työ oli helppo tehdä kun oli hyvät ohjeet" (Vastaaja 26)</i>
Kokonaisuus	7	<i>"Hyvä, kiva oli tehdä jotain erilaista kuin normaalisti" (Vastaaja 40)</i>
Enemmän/selkeämmät kuvat	2	<i>"Vähän enemmän kuviahan olisi voinut olla ... mutta niin on" (Vastaaja 70)</i>
Muut maininnat	10	<i>"Kaikki oli hyvää ja ymmärrettävissä" (Vastaaja 153)</i> <i>"Vety polttoaineena ei ole tylsä aihe vaan jokseenkin kiinnostava" (Vastaaja 82)</i>

Selkeät ja hyvät ohjeet olivat 22 vastaajan mielestä hyvää oppimistehtävissä. Seitsemän vastaajan mielestä oppimateriaali oli kokonaisuutena hyvä. Oppimistehtäviä koki kiinnostavaksi neljä vastaajaa. Neljä vastaajaa koki oppimistehtävien olevan hyviä töitä esimerkiksi, koska ne olivat kemian vaatimustasoltaan sopivia. Kaksi vastaajaa olisi toivonut oppimateriaaliin lisää kuvia.

8. TUTKIMUKSEN LUOTETTAVUUDEN TARKASTELU

Tutkimuksen teossa pyritään aina arvioimaan tutkimuksen luotettavuutta ja pätevyyttä. Tutkimuksen luotettavuutta nostaa toistettavuus, saman tuloksen saaminen erilaisilla mittareilla ja tutkimuksen toteuttamisen tarkka selostus tutkimusraportissa (Hirsjärvi & al, 2009). Kehittämistutkimuksessa korkean luotettavuuden saavuttamiseksi tutkimuksen toteuttamisen vaiheet on dokumentoitava tarkasti ja arviointia on tapahduttava koko tutkimuksen ajan sen jokaisessa vaiheessa (Edelson, 2000). Tämän tutkimuksen luotettavuuteen vaikuttavat asiat on koottu taulukkoon 8.1.

Tutkimuksen pätevyyden arvioimisen tarkoitus on selvittää, mittasiko tutkimus juuri sitä, mitä oli tarkoituskin mitata (Hirsjärvi & al, 2009). Tämän tutkimuksen tarkoitus oli tuottaa yläkoulun 8-luokkalaisille materiaalia, joka tukee kiinnostusta kemiaa kohtaan. Tutkimuksen pätevyyttä nostaa kyselyn vapaa palaute, jossa vastaajat saavat ilmaista asioita, joita kyselylomakkeessa ei kysytty. Kokonaisuutena tutkimusta voidaan pitää luotettavuudeltaan ja pätevyydeltään hyvänä. Tämän tutkimuksen luotettavuus on varmistettu useilla eri tavoilla (ks. taulukko 8.1).

TAULUKKO 8.1

Tutkimuksen luotettavuuden tarkastelu.

Tutkimus	Luotettavuustarkastelu
Tarveanalyysi (oppikirja- analyysi)	▪ Tarveanalyysin luotettavuutta nostaa se, että tutkittavasta aineistosta tehtiin taulukot, joissa on tarkat lainaukset oppikirjojen polttokennojen kemiaan liittyvistä teksteistä sekä niiden sijainti on ilmoitettu sivunumeroilla. ▪ Tarveanalyysin luokittelu tehtiin teorialähtöisesti. Tutkijan subjektiivinen näkemys aineiston luokittelun tulkinnasta saattaa vaikuttaa luotettavuuteen alentavasti. Vertaisluokittelua ja vahvistettavuutta ulkopuolisilla arvioijilla ei tutkimuksessa suoritettu.
Materiaalin kehittäminen	▪ Materiaalin kehittämisprosessi on kuvattu tutkimuksessa yksityiskohtaisesti, mikä varmistaa tutkimuksen uskottavuuden. ▪ Materiaali on kehitetty tutkimuksellisen opiskelun ja kiinnostuksen teorioiden tutkimuskirjallisuuden pohjalta. Materiaalissa on huomioitu myös opetussuunnitelmien perusteet.
Materiaalin arviointi (kyselytutkimus)	▪ Luotettavuutta nostaa kyselyn toistaminen kahtena eri tutkimuspäivänä. Sama tutkimusasetelma toteutettiin tutkimuksessa yhteensä 18 kertaa. ▪ Kyselytutkimuksen avointen kysymysten aineistolähtöisessä sisällön analyysissä luokittelut ryhmät muodostettiin analysoitavasta materiaalista, joten niiden muodostamiseen vaikuttaa tutkijan subjektiivinen näkemys. ▪ Luotettavuuteen saattaa vaikuttaa alentavasti vastaajien lyhyt vastausaika (5 minuuttia). Lyhyen vastausajan takia kyselylomakkeeseen ei esimerkiksi laadittu varmennuskysymyksiä, joilla olisi voitu tarkistaa vastausten johdonmukaisuus.

9. JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tämän tutkimuksen päätavoitteena on herättää ja tukea nuorten kiinnostusta kemian opiskelua kohtaan. Päätuloksena saatiin kehitettyä tutkimuspohjaista uutta oppimateriaalia yläkoulun polttokennojen kemian opetukseen. Materiaali tukee nuorten kiinnostusta tutkimuksellisen opiskelun ja kiinnostuksen teorian periaatteiden mukaisesti. Materiaalin tavoitteena on toimia myös opettajien resurssina opetuksessa.

9.1 Tarve polttokennojen kemian oppimateriaalille

Perusopetuksen opetussuunnitelmien perusteiden (Opetushallitus, 2004) sisällöissä ei suoraan mainita polttokennoja aiheena, mutta polttokennojen kemiaa voidaan hyvin sovittaa opetussuunnitelman asettamiin tavoitteisiin (ks. luku 3.2). Lukion opetussuunnitelman perusteissa (Opetushallitus, 2003) polttokennot mainitaan terminä KE4 – *Metallit ja materiaalit* kurssin keskeisissä sisällöissä. Kemian opetuksen yleisiin tavoitteisiin polttokennojen kemiaa voidaan kytkeä muun muassa kemian arkielämäyhteyteen, luontoon, kokeellisuuteen, tiedonhankintaan, teollisuuden teknologiaan, ympäristötekniikkaan ja kestäväan kehitykseen. Polttokennojen opetuksella voidaan lisäksi herättää oppilaiden kiinnostus ja innostaa heitä kemian opiskeluun.

Tarpeellisuus polttokennojen kemian oppimateriaalille kartoitettiin tarveanalyysillä, joka toteutettiin laadullisena sisällönanalyysinä oppikirjoista. Tutkimuksessa analysoitiin viisi yläkoulun oppikirjaa ja viisi lukion opetuksessa käytettävää oppikirjasarjaa (26 oppikirjaa). Perusopetuksen oppikirjat käsittelivät polttokennojen kemiaa hyvin suppeasti ja pintapuolisesti. Myös lukion opetuksessa käytettävien oppikirjasarjojen välillä esiintyi polttokennojen kemian käsittelyn osalta vaihtelua. Kaikista kirjasarjoista löytyi mainintoja polttokennojen kemiasta vain kurssin KE4- *Metallit ja materiaalit* oppikirjoista. Eniten mainintoja löytyi polttokennojen toimintaan ja rakenteeseen liittyvistä asioista sekä polttokennoissa käytettävistä polttoainesta. Vähiten mainintoja löytyi eri polttokennotyypeistä.

Kuvien käyttäminen polttokennojen kemian yhteydessä oli oppikirjoissa vähäistä. Vain kaksi oppikirjaa esitti polttokennojen kemiaa kaikilla kemian tiedon kolmella tasolla (makro-, submikroskooppinen ja symbolitaso). Polttokennojen kemiaan liittyviä tehtäviä löytyi oppikirjoista vähän, yhteensä seitsemän kappaletta. Yksikään tehtävä ei liittynyt kokeelliseen työskentelyyn.

Oppimateriaalin kontekstiksi valittiin tarveanalyysin pohjalta polttokennoauto, joka oli oppikirjoissa eniten mainittu polttokennojen käyttökohde. Kontekstiin yhdistettiin ympäristönäkökulma, mikä tuotiin myös usein esille oppikirjoissa. Tutkimuksen mukaan konteksti nostaa oppimateriaalin mielekkyyttä ja opiskelijoiden motivaatiota (Gilbertin, 2006).

Tarveanalyysin tulosten perusteella voidaan pitää tarpeellisenä ja perusteltuna kehittää uutta oppimateriaalia polttokennojen kemian opetukseen, koska polttokennojen kemiaa käsitellään oppikirjoissa vaihtelevalla laajuudella ja niiden sisällöissä on eroja.

9.2 Kehitetty oppimateriaali kiinnostuksen tukena

Kehitetty oppimateriaali polttokennojen kemiasta tukee tutkimuksen mukaan hyvin oppilaiden kiinnostusta. Kokeelliset oppimistehtävät koettiin enemmän kiinnostusta tukevaksi kuin päinvastoin. Kiinnostavimmaksi laboratoriotyöksi nousi kyselytutkimuksen mukaan polttokennoautolla ajaminen (keskiarvo 3,88; tyyppiarvo 5). Oppilaat kokivat kiinnostavana myös polttokennoauton rakentamisen (keskiarvo 3,57; tyyppiarvo 4). Aurinkopaneelin tutkiminen koettiin vähiten kiinnostavaksi (keskiarvo 2,50; tyyppiarvo 3). Tämä voi selittyä siitä, että tutkimuksessa ei tapahtunut mitään makrotasolla silmillä havaittavaa. Tätä tulosta tukee tutkimuskirjallisuus, jonka mukaan nuoria kiinnostavat kemian asiat, jotka sisältävät konkreettisia havaintoja (Osborne & Collins, 2001). Kehitysehdotuksena aurinkopaneelitutkimukseen voitaisiin tutkimuksen tekoon ottaa käyttöön yleismittarit, joilla tutkitaan aurinkopaneelin antaman jännitteen suuruutta erilaisissa valonlähteissä. Näin oppilaat näkisivät havainnollisesti, kuinka aurinkokenno toimii erilaisissa olosuhteissa.

Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan sanoa, että oppilaat eivät ole kovin kiinnostuneita tulosten kirjaamisista tai pohdintatehtäviin vastaamisesta. Oppimateriaalin eri aihealueiden kiinnostavuus yleisesti sai myös jokseenkin heikot arviot. Polttokennoaiheen ajankohtaisuus koettiin jokseenkin kiinnostavaksi (ka. 3,08). Kun taas vetyenergiatalous ja polttokennojen sovelluskohteet koettiin aihealueina hieman alle neutraalin kiinnostuksen (ka. 2,89 ja 2,93).

Tutkimuksessa selvitettiin kiinnostuksen määrää eri sukupuolten välillä. Tulosten perusteella nähdään, että tytöillä ja pojilla on keskimäärin erilaisia eri laboratorioaktiviteetteihin, tehtäviin ja aihealueisiin liittyviä kiinnostuksen kohteita. Myös useiden muiden tutkimusten mukaan kemian aihealueet kiinnostavat eri sukupuolia eri tavalla (mm. Jones & al. 2000).

Laboratorioaktiviteeteistä pojat (ka. 2,80/3,71) ovat tyttöjä (ka. 2,70/3,66) kiinnostuneempia aurinkopaneelitutkimuksesta ja polttokennoauton rakentamisesta. Sen sijaan tyttöjä (ka. 3,35/4,40) kiinnostaa poikia (ka. 3,28/3,93) enemmän polttokennoauton tankkaaminen vedyllä ja sillä ajaminen. Erot eivät kuitenkaan ole suuria eivätkä tilastollisesti merkitseviä. Oppimateriaalin eri tehtävätyypit, tulosten kirjaaminen ja pohdintakysymyksiin vastaaminen kiinnostivat enemmän tyttöjä kuin poikia.

Oppimateriaalin eri aihealueiden kiinnostavuus jakaantui sukupuolen mukaan. Pojat (ka. 3,15) olivat tyttöjä (ka. 2,74) kiinnostuneempia polttokennojen sovelluskohteista. Tämä tulos on tilastollisesti merkitsevä ja tulosta tukee aikaisemmin tehty tutkimus, jossa poikien todettiin kiinnostuneen tyttöjä enemmän teknologia-aiheista (Kotte, 1992). Myös Jones & al. (2000) on saanut vastaavia tuloksi. Heidän tutkimuksen mukaan pojat ovat tyttöjä kiinnostuneempia teknologian sovelluksista esimerkiksi autoissa.

Oppimateriaalin aihealueista vetyenergiatalous ja polttokennoaiheen ajankohtaisuus tukevat enemmän tyttöjen (ka. 3,00/3,23) kuin poikien (ka. 2,80/2,90) kiinnostusta. Tulokset eivät ole tilastollisesti merkitsevä. Vetyenergiatalous voidaan nähdä ympäristöön ja biologiaan liittyvänä asiana. Tutkimuskirjallisuuden mukaan tytöt ovat poikia kiinnostuneempia biologiaan liittyvistä aiheista (Kotte, 1992). Toisaalta poikia on tutkittu kiinnostavan tyttöjä enemmän vaihtoehtoiset energianlähteet, ajankohtaiset keksinnöt sekä kasvihuoneilmiö (Christidou, 2006).

Osborne ja Collins (2001) ovat todenneet tutkimuksessaan, että jos tytöt saadaan kiinnostumaan jostakin asiasta, usein myös pojat ovat kiinnostuneita siitä. Tämä huomioon ottaen oppimateriaalin mukaan opiskeltaessa tulisi aihekokonaisuuksista tuoda esiin erityisesti vetyenergiatalous ja aiheen ajankohtaisuus.

Tässä tutkimuksessa kehitetty oppimateriaali on sisällöltään ja ulkoasultaan toimiva. Oppilaat pitivät oppimateriaalin ulkoasua sekä selkeyttä keskimäärin hyvänä tai kiitettävänä. Tulosten perusteella voidaan katsoa oppimateriaalin tukevan tässäkin mielessä nuorten kiinnostusta. Tutkimuskirjallisuuden mukaan kiinnostavassa oppimateriaalissa tekstin on oltava yhtenäistä, johdonmukaista ja helposti ymmärrettävää (Mitchell, 1993; Schraw & Lehman, 2001).

Materiaalin laajuutta ja kemian vaatimustasoa pidettiin molempia sopivina. Vain muutama oppilas (1,3 %) piti töitä liian laajoina tai vaikeina (3,8 %). Suppeana töitä piti 3,8 % oppilaista. Oppilaista 13,2 % oli sitä mieltä, että työt olivat helppoja. Tutkimuskirjallisuuden pohjalta kehitetty ja oppilailla testattu oppimateriaali on näiden tulosten valossa sellaisenaan käyttökelpoinen yläkoulun kemian opetuksen tueksi.

Tutkimukseen osallistuneet oppilaat ottivat kehitetyn oppimateriaalin polttokennojen kemiasta kokonaisuudessaan hyvin vastaan. Oppilaat kuvailivat työtä muun muassa hyväksi, kiinnostavaksi ja erilaiseksi, normaalista poikkeavaksi. Vastaavia positiivisia, oppimista tukevia tuloksia on saatu tutkimuksissa, joissa on käytetty työtapana tutkimuksellista opiskelua (Hodson, 1990).

9.3 Tutkimuksen merkitys

Tutkimuksen myötä kehitetty oppimateriaali tuki hyvin nuorten kiinnostusta. Toisaalta on muistettava, että aina on olemassa nuoria, joiden kiinnostusten kohteet poikkeavat ”keskiarvo-oppilaasta”. Vaikka tulokset osoittavatkin, että myös sukupuolten välillä on keskimäärin erilaisia laboratorioaktiviteetteihin, tehtäviin ja aihealueisiin liittyviä kiinnostuksen kohteita, liian suoraviivaisten yleistysten tekemistä on varottava edellä esiteltyjen tulosten pohjalta. Tämä tutkimuksen tulokset eivät ole absoluuttisia koko ikäryhmää koskevia, vaan ne ilmentävät mäntsäläläisten 8-luokkalaisten nuorten käsityksiä kehitetyn oppimateriaalin kiinnostavuudesta.

Tutkimuksen otosta (N= 159) voidaan pitää riittävänä määrälliselle tutkimukselle (Cohen, Manion & Morrison, 2007). Tutkimuksen luotettavuus on kokonaisuudessaan hyvä. Kyselylomakkeet ja oppimateriaali testattiin oppilasryhmillä pilottitutkimuksella tutkimusta vastaavissa olosuhteissa.

Tutkimuksesta nousi esiin mahdollisia jatkotutkimusaiheita. Seuraavaksi voidaan tutkia vaikuttaako tässä tutkimuksessa kehitetty oppimateriaali oppilaiden oppimistuloksiin. Tutkimuksellisen kokeellisuuden mukainen opiskelu tukee tutkimuskirjallisuuden mukaan kemian käsitteiden oppimista (Minner & al., 2010), joten olisi aiheellista selvittää mitä opilat oppivat töistä. Mielenkiintoista olisi tutkia myös materiaalin toimivuutta opettajien käyttämänä kouluopetuksessa. Tutkimuksen oppimateriaalia tulisi edelleen kehittää opettajien esittämien tarpeiden mukaan sekä oppimateriaalin vaikutuksia kiinnostukseen voitaisiin määrittää laajemmin. Olisi tärkeää myös tutkia, säilyykö oppilaissa herännyt kiinnostus pidempään ja kuinka pysyvää kiinnostusta kemiaa kohtaan voitaisiin tukea tutkimuksellisen kokeellisuuden avulla.

Opetuksessa käytettävällä työtavalla on suuri merkitys kiinnostuksen herättämisessä ja tukemisessa (Lavonen & al., 2005). Tämän tutkimuksen mukaan tutkimuksellisen opiskelun työtavalla on yhteys polttokennojen kemian opiskelun kiinnostavuuteen. Jotta kouluissa opettajat käyttäisivät tutkimuksellisen opiskelun mukaista työtapaa, on tärkeää, että heille on sen mukaista oppimateriaalia saatavilla. Jatkossakin olisi tärkeä kehittää lisää tutkimuksellisen opiskelun mukaista materiaalia. Lisäksi tulisi tarjota täydennyskoulutusta tutkimuksellisen opiskelun työtavan toteuttamisesta opetuksessa, jotta opettajien kynnys sen toteuttamiseen madaltuisi. Opetuksen kun katsotaan olevan usein liian aikaa vievää ja työtavan toteuttaminen vaatii opettajalta erityisiä taitoja (DeBoer, 2004). Työtavan toteuttaminen voitaisiin ottaa esille jo opettajankoulutuksen yhteydessä. Tämä tutkimus antaa viitteitä siitä, että kehitetty uusi oppimateriaali polttokennojen kemiasta antaa hyvät mahdollisuudet kemian kiinnostavuuden tukemisessa ja vastaa täten kemian opetuksen suurimpaan haasteeseen – kiinnostuksen herättämiseen.

LÄHTEET

- Ahola, E. (2004). Vetyä tankkiin ja tietokoneeseen. *Euroopan Teide ja Teknologia*, 5. <http://www.tekes.fi/eu/fin/julkaisut/ett/0504/4.html>. (luettu 24.2.2009)
- Aksela, M., & Juvonen, R. (1999). *Kemian opetus tänään*. Helsinki: Opetushallitus, Edita Oy.
- Aksela, M. (2005). *Supporting Meaningful Chemistry Learning and Higher-order Thinking Through Computer-Assisted Inquiry: A Design Research Approach*. Väitöskirja, Helsingin yliopisto. Helsinki: Yliopistopaino.
- Alanen R., Koljonen T., Hukari S. ja Saari P., (2003), *Energian varastoinnin nykytila*, VTT Prosessit, <http://vtt.fi/inf/pdg/tiedotteet/2003/T2199.pdf> (luettu 24.2.2009)
- Alexander, P. A. & Jetton, T. L. (1996). The role of importance and interest in the processing of text. *Educational Psychology Review*. 8: 89–121.
- Anon. (2001). *Module 4: Fuel Cell Technology*. College of the Desert. http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm04r0.pdf. (luettu 4.8.2010)
- Arajärvi, K. & Aksela, M. (2009). Kokeellisuus ja kiinnostus kemian opetuksessa. Kirjassa M. Aksela, & J. Pernaa (Toim.), *Arkipäivän kemia, kokeellisuus ja työturvallisuus kemian opetuksessa perusopetuksesta korkeakouluihin – IV Valtakunnalliset kemian opetuksen päivät* (s. 172–180). Helsinki: Yliopistopaino.
- Barbier, F. (2010). Hydrogen Distribution Infrastructure for an Energy System: Present Status and Perspectives of Technologies. Stolten D. (toim.). *Hydrogen and Fuel Cells – Fundamentals, Technologies and Applications* (s. 121-148). Weinheim: Wiley-vch.
- Bennett, J., Hogarth, S. & Lubben, F. (2005). A systematic review of the effects of context-based and Science-Technology-Society (STS) approaches in the teaching of secondary science. Educational Studies: University of York. <http://www.york.ac.uk/depts/educ/research/ResearchPaperSeries/SciTTA1a.pdf> (luettu 5.7.2010)
- Blomen, I. J. M. J. & Mugerwa, M. N. (1993). *Fuel Cell System*. Plenum Press: New York ja Lontoo.
- Bybee, R. (2004). Scientific inquiry and science teaching. Flick, L. & Lederman, N. (toim.) *Scientific inquiry and nature of science: implication for teaching, learning and teacher education* (s.1-14). Science & Technology Education Library: Kluwer Academic Publishers.

- Byman, R. (2002). Voiko motivaatiota opettaa? Teoksessa: P. Kansanen ja K. Uusikylä (Toim.). *Luovuutta, motivaatiota, tunteita. Opetuksen tutkimuksen uusia suuntia* (s. 25–41). PS-kustannus 2002. Opetus.
- Cakir, M. (2008). Constructivist Approaches to Learning in Science and Their Implications for Science Pedagogy: A Literature Review. *International Journal of Environmental and Science Education*, 3(4), 193-206.
- Chang C. Y. & Mao S. L., (1998), The effects of an inquiry-based instructional method on earth science students' achievement, *ERIC*.
- Christidou, V. (2006). Greek Students' Science-related Interest and Experiences: Gender differences and correlations. *International Journal of Science Education*, 28(10). 1181-1199.
- Cohen, L., Manion, L. & Morrison, K. (2007). *Research method in education*. 6th edition. London: Routledge.
- Corre, G. P. G. & Irvine, J. T. S. (2010). High-Temperature Fuel Cell Technology. Stolten D. (toim.). *Hydrogen and Fuel Cells – Fundamentals, Technologies and Applications* (s. 61-87). Weinheim: Wiley-vch.
- Dawson, C. (2000). Upper primary boys' and girls' interest i science: have they changed since 1980? *International Journal of Science Education*, 22, 557-570.
- DeBoer, G. E. (2004). Historical perspective on inquiry teaching in schools. Teoksessa: Flick, L. B. & Ledean, N. G. (toim.) *Scientific inquiry and nature of science: Implications for teaching, lerning, and teacher eduction*, (s.17-34) Dordrecht: Kluwer Academic Publishers,
- Deci, R. (1992). The Relation of interest to the Motivation of Behavior: A Selfdetermination of Theory Perspective. Teoksessa Renninger, K. A., Hidi, S. & Krapp, K. (toim.) *The Role of Interest in Learning and Development*, (s. 43-71) Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Dincer, I. & Veziroglu, N. (2010). Environmental Impact of Hydrogen Technologies. Stolten D. (toim.). *Hydrogen and Fuel Cells – Fundamentals, Technologies and Applications* (s.498-529). Weinheim: Wiley-vch.
- Edelson, D. V., (2000), Design research: What we learn when we engage in design. *The Journal of Learning Science*. 11, 105-121.
- Eräpelto, A. & Tynjälä, P. (toim.). (1999). *Oppiminen ja asiantuntijuus*. Juva: WSOY.
- FCTec. (2010). Fuel Cell Basics. http://www.fctec.com/fctec_types.asp. (luettu 9.8.2010)

- Fuel Cell Europe. (2009). About Fuel Cells.
<http://www.fuelcelleurope.org/index.php?m=7&sm=44>. (luettu 9.8.2010)
- Gabel, D. (1999). Improving Teaching and Learning through Chemistry Education Research: A Look to the Future. *Journal of Chemical Education*, 76, 548-554.
- Garche, J. (1998). *Application of Small Scale Fuel Cells on Combined Heat/Power Cogeneration*. Hydrogen power: Theoretical and Engineering Solution. Kluwer Academic Publisher: Hollanti.
- Gasteiger, H. D., Baker, D. R., Carter, R. N., Gu, W., Liu, X., Wagner, F. T. & Yu, P. T. (2010). Electrolysis and Catalyst Degradation Challenges in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. Stolten D. (toim.). *Hydrogen and Fuel Cells – Fundamentals, Technologies and Applications* (s. 3-16). Weinheim: Wiley-vch.
- Gibson, H. L. & Chase, C., (2002), Longitudinal Impact of an Inquiry-Based Science Program on Middle School Students' Attitudes Toward Science. *Science Education*, 86, 693-705.
- Gilbert, J. K. (2006). On the Nature of "Context" in Chemical Education. *International Journal of Science Education*, 28(9), 957-976.
- Corre, G. P. G. & Irvine, J. T. S. (2010). High-Temperature Fuel Cell Technology. Stolten D. (toim.). *Hydrogen and Fuel Cells – Fundamentals, Technologies and Applications* (s. 61-87). Weinheim: Wiley-vch.
- Gordon, E. U. (1990). Inquiry in classroom. *BioScience*, 40(11), 841–843.
- Grigoriev, S.A., Poremsky, V.I. & Fateev V.N. (2006). Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 171 – 175.
- Hakkarainen, K., Lonka, K. & Lipponen, L. (2004). *Tutkiva oppiminen: Järki, tunteet ja kulttuuri oppimisen sytyttäjinä* (6. uudistettu painos). Helsinki: WSOY.
- Hidi, S. & Anderson, V. (1992). Situational Interest and its impact on reading and expository writing. Teoksessa Renninger, A., Hidi, S. & Krapp, A. (toim.) *The Role of Interest in Learning and Development*, (215–238). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Hidi, S., Renninger, K. A. & Krapp, A. (1992). The present stage of interest research. Teoksessa: Renninger, K. A., Hidi, S. & Krapp, K. (Toim.) *The Role of Interest in Learning and Development* (s. 433-446). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Hidi, S. (1990). Interest and its contribution as a mental resource for learning. *Educational Psychology Review*. 60, 549–572.

- Hirschenhofer, J. H., Stauffer, D. B. & Englemann, R. R. (1994). *Fuel Cells, A Handbook*, Gilbert/Commonwealth Inc. U.S. Department of Energy. Morgantown Energy Technology Center.
- Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. (2009). *Tutki ja kirjoita*. Helsinki: Tammi.
- Hodson, D., (1990). A critical look at practical work in school science. *School Science Review*, 256, 33–40.
- Häussler, P. & Hoffmann, L. (2000). A curricula frame for Physics Education: Development, comparison with students' interest, and impact on students' achievement and self-concept. *Science Education*, 84(6), 689-705.
- Jones, G., Howe, A. & Rua, M. J. (2000). Gender Differences in Students' Experiences, Interests, and Attitudes towards Science and Scientists. *Science Education*, 180(84). 180–192.
- Johnstone, H. A. (1991). Why is Science Difficult to Learn? Things Are Seldom What They Seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7, 75.
- Juuti, K. (2002). Tutkiva opiskelu fysiikassa ja kemiassa. *Dimensio*, 5, 34–37.
- Karjalainen, V. & Aksela, M. (2008). *Kemian opetus tänään: Nykytila ja haasteet Suomessa*. Kemian opetuksen keskus. Kemian laitos: Helsingin yliopisto, Yliopistopaino.
- Kim, H.-T., You, D. J., Yoon, H.-K, Joo, S.H., Pak, C., Chang, H. & Song, I.-S. (2009). *Journal of Power Sources*, 180 (2), 724-732.
- Kortela, M. (2004). *Polttokenno kehittyy kännykän akuksi*, <http://www.tekniikkatalous.fi/tk/article24336.ece>. (luettu 26.2.2009)
- Kotte, D. (1992). Gender differences in science achievement in 10 countries. Frankfurt: Peter Lang.
- Krapp, A. (2002). Structural and dynamic aspects of interest development: theoretical considerations from an ontogenetic perspective. *Learning and Instruction*, 12, 383–409.
- Krapp, A., Hidi, S. & Renninger, K. A. (1992). Interest, Learning, and Development. Teoksessa: Renninger, K. A., Hidi, S. & Krapp, K. (Toim.) *The Role of Interest in Learning and Development* (s. 3-25). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Kuhn, D., Black, J., Keselman, A. & Kaplan, D. (2000). The Development of Cognitive Skills to Support Inquiry learning. *Cognition and Instruction*, 18(4), 495–523.

- Käyhkö, T. (2010a). Tekesin Polttokennot-ohjelma luotsaa yrityksiä liiketoimintaan. *Ympäristö ja Terveys*.
- Käyhkö, T. (2010b). Wärtsilältä järjestelmiä maalle ja merelle. *Ympäristö ja Terveys*.
- Laurila, P. (2007). Kemian opetus ammatillisissa oppilaitoksissa: yhteiset opinnot. Teoksessa: Aksela, M. & Montonen, M. (Toim.). *Uusia lähestymistapoja kemian opetukseen perusopetuksesta korkeakouluihin* (s. 34–35). Opetushallitus: Helsinki.
- Lavonen, J. (2005). Fysiikan ja kemian opetuksen uudistaminen. *Didacta Varia*. Helsinki: Helsingin yliopisto.
- Lavonen, J., Juuri, K., Meisalo, V., Uitto, A. & Byman, R. (2005). Luonnontieteiden opetuksen kiinnostavuus peruskoulussa. Soveltavan kasvatustieteen laitos: Helsingin yliopisto. s. 5–30.
- Lavonen, J. & Meisalo, V. (2007). *Kokeellisuuden työtavat*. Helsinki: Helsingin yliopiston kasvatustieteen laitos. s. 21–32.
- Lavonen, J., Meisalo, V & al. (1998). Matemaattis-luonnontieteellisten aineiden työtapaopas. Kokeellisuuden työtavat. <http://www.edu.helsinki.fi/malu/kirjasto/kokeel//index.htm> (5.7.2010)
- Lloyd, A. C., Pike, E. & Baral, A. (2010). Renewable Hydrogen Production. Stolten D. (toim.). *Hydrogen and Fuel Cells – Fundamentals, Technologies and Applications* (s. 465–488). Weinheim: Wiley-vch.
- Lukiolaki 629/1998 10§ (21.8.1998). Ks. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1998/19980629>.
- Malinen, P. (1992). *Opetussuunnitelmat koulutyössä*. VAPK-kustannus: Helsinki.
- Mennola, T., Noponen, M., Kallio, T., Mikkola, M. & Hottinen, T. (2004). Water balance in a free-breathing polymer electrolyte membrane fuel cell. *Journal of Applied Electrochemistry*, 34, 31–36.
- Mergel, J., Glösen, A. & Wannek, C. (2010). Current Status of and Recent Developments in Direkt Liquid Fuel Cells. Stolten D. (toim.). *Hydrogen and Fuel Cells – fundamentals, Technologies and Applications* (s. 41–60). Weinheim: Wiley-vch.
- Millar, R. (2004). The role of practical work on the teaching and learning of science, Paper Prepared for the Meeting: High School Science Laboratories: Role and Visio, Washington National Academy of Sciences. 1–22.

- Minner, D. D., Levy, A. J. & Century, J. (2010). Inquiry-Based Science Instruction – What Is It and Does it Matter? Results from a Research Synthesis Year 1984 to 2002. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(4), 474-496.
- Mitchell, M. (1993). Situational interest: Its multifaceted structure in the secondary school mathematics classroom. *Journal of Educational Psychology*, 85(3), 424-436.
- Näsäkkälä, E., Flinkman, M. & Aksela, M. (2001). *Luonnontieteellisen tutkimuksen tekeminen Koulussa*. Opetushallitus: Helsinki.
- Ojanperä, K. (2008). Suomi yrittää polttokennoissa maailman kärkeen. *Tekniikka & talous*. <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article64161.ece>. (luettu 10.7.2010)
- Opetushallitus (2003). *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2003*. Helsinki: Opetushallitus. Ks. http://www.oph.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/oph/embeds/47345_lukion_opetussuunnitelman_perusteet_2003.pdf.
- Opetushallitus (2004). *Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2004*. Helsinki: Opetushallitus. Ks. http://www02.oph.fi/ops/perusopetus/pops_web.pdf.
- Osborne, J. & Collins, S. (2001), Pupils' views of the role and value of the science curriculum: A focus group study. *International Journal of Science Education*, 23(5), 441-467.
- Osborne, J. & Dillon, J. (2008). Science Education in Europe: Critical Reflections, A Report to the Nuffield Foundation, http://www.pollen-europa.net/pollen_dev/Images_Editor/Nuffield%20report.pdf (luettu 23.6.2010)
- Oversby J. (2000). Models in explanations of chemistry: the case of acidity. Teoksessa: Gilbert, J.K. & Boulter C.J. (toim.) *Developing models in science education* (s. 227-251). Dordrecht Kluwer.
- Rocard, M., Csermely, P., Jorde, D., Lenzen, D., Welberg-Henrikson, H. & Hemmo, V. (2007). European Commission Community research: Science Education Now: A Renewed Pedagogy for the Future of Europe. Directorate-General for research Science, Economy and Society.
- Roessler, C., Schoemann, J., Baier, H. (2010). Aerospace Applications of Hydrogen and Fuel Cells. Stolten D. (toim.). *Hydrogen and Fuel Cells – Fundamentals, Technologies and Applications* (s. 661-680). Weinheim: Wiley-vch.
- Sahlberg, P. (1990). *Luonnontieteiden opetuksen työtapoja*. Helsinki: Valtion painatuskeskus.
- Schraw, G. & Dennison, R. S. (1994). The effect of reader purpose on interest and recall. *Journal of Reading Behavior*, 26, 1-18.

- Schraw, G. & Lehman, S., (2001) Situational Interest: A Review of the Literature and Directions for Future Research. *Educational Psychology Review*, 13(1), 23-52.
- Schiefele, U. (1992). Topic interest and level of text comprehension. Teoksessa: Renninger, K. A., Hidi, S. & Krapp, K. (Toim.) *The Role of Interest in Learning and Development* (s. 151-182). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Schiefele, U. (1991). Interest, learning, and motivation. *Educational Psychologist* 26(34), 299–323.
- Seitamaa-Hakkarainen, P. & Hakkarainen, K. (2004). Tutkiva oppiminen. http://mlab.taik.fi/polut/Yhteisollinen/teoria_tutkiva_oppiminen.html. (luettu 5.7.2010)
- Siegel, M., A. & Ranney, M. A. (2003). Developing the Changes in Attitude about the Relevance of Science (CARS) Questionnaire and Assessing Two High School Science Classes. *Journal of Research in Science Teaching*, 40, 757-775.
- Sjoberg, S. (2002). Science and Technology Education in Europe: Current Challenges and Possible Solutions. *Connect: UNESCO International Science, Technology & Environmental Education Newsletter*, 27, 1-5.
- Smolinka, T., Rau, S. & Hebling, C. (2010). Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Water Electrolysis. Stolten D. (toim.). *Hydrogen and Fuel Cells – Fundamentals, Technologies and Applications* (s. 271-289). Weinheim: Wiley-vch.
- Tekes. (2010). Polttokennot-ohjelma 2007–2013. www.tekes.fi/polttokennot. (luettu 13.8.2010)
- Tekes. (2009). Tekes Polttokennot-ohjelman vuosiseminaari, Hanasaari. www.tekes.fi/polttokennot. (luettu 15.8.2010)
- Tuomi, J. & Sarajärvi, A. (2002). *Laadullinen tutkimus ja sisältoanalyysi*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- US Department of Energy. (2004). *Fuel Cell Handbook*, 7. painos. US Department of energy: Washington, DC.
- US Department of Energy. (2009). Types of Fuel Cell. http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html. (luettu 13.8.2010)
- Uusikylä, K. & Atjonen, P. (2000). *Didaktiikan perusteet*. Juva: WS Bookwell Oy.
- Wannek, C. (2010). High-Temperature PEM Fuel Cells: Electrolytes, Cells, and Stacks. Stolten D. (toim.). *Hydrogen and Fuel Cells – Fundamentals, Technologies and Applications* (s. 17-40). Weinheim: Wiley-vch.

- Wipke, K., Sprik, S., Kurtz, J. & Garbak, J. (2009). Field experience with fuel cell vehicles. Vielstich, W., Gastaiger, H. H. & Yokokawa, H. (toim.) *Hydrogen and Fuel Cells – Fundamentals, Technologies and Applications* (s. 893). John Wiley& Sons., Ltd, Chichester.
- Zachos, P., Hick, T., Doane, W. & Sargent, C. (2000). Setting Theoretical and Empirical Foundation for Assessing Scientific Inquiry and Discovery in Educational Programs. *Journal of Research in Science teaching*, 37(9), 938–962.
- Zumdahl S. & Zumdahl S., (2003), *Chemistry*, 6th edition.

LIITTEET

- Liite 1: Tutkitut oppikirjat
- Liite 2: Oppikirja-analyysin tulokset taulukoituina
- Liite 3: Kehitetty oppimateriaali
- Liite 4: Kyselylomake
- Liite 5: Tilastollisten analyysien tulokset
- Liite 6: Kyselylomakkeen avointen kysymysten vastaukset

Liite 1: Tutkitut oppikirjat

Lukion oppikirjasarjat:

A: Kemisti

B: KIDE

C: Mooli

D: Neon

E: REAKTIO

Yläkoulun oppikirjasarjat:

F: Avain 2

G: Aine ja energia

H: ILMIÖ

I: Hehku

J: KEMIA FyKe 7-9

Löytyi mainintoja polttokennojen kemiasta:

Lukion oppikirjat:

A 3: Aroluoma, I., Kanerva, K., Karkela, L., Lampiselkä, J., Mäkelä, R., Sorjonen, T. & Vakkilainen, K-M. (2005). *Kemisti 3 – Reaktiot ja energia*. Helsinki: WSOY.

A 4: Aroluoma, I., Kanerva, K., Karkela, L., Lampiselkä, J., Mäkelä, R., Sorjonen, T. & Vakkilainen, K-M. (2006). *Kemisti 4 – Metallit ja materiaalit*, Helsinki: WSOY.

B 4: Kalkku, I., Kalmi H. & Korvenranta, J. (2006). *KIDE 4 – Metallit ja materiaalit, KE4*. Helsinki: Otava.

C 4: Lehtiniemi, K. & Turpeenoja, L. (2006). *MOOLI 4 – Metallit ja materiaalit*. Helsinki: Otava.

D4: Hannola-Teitto, M., Jokela, R., Leskelä, M., Näsäkkälä, E., Pohjakallio, M. & Rassi, M. (2006). *Neon 4 – Metallit ja materiaalit*. Helsinki: Edita.

E 4: Kaila, L., Meriläinen, P., Ojala, P. & Pihko, P., (2006). *Lukion kemia – REAKTIO 4, Metallit ja materiaalit*. Helsinki: Tammi.

Yläkoulun oppikirjat:

- H: Ikonen, M., Tuomisto, M., Termonen, M. & Perkkalainen P. (2009). *ILMIÖ. KEMIAN oppikirja 7-9* (1. painos). Vammala.: Tammi.
- I: Havonen, T., Karpin, T., Keinonen, T. & Muurinen M. (2009). *Hehku. KEMIA 7-9* (1. painos). Keuruu: Otava.

Ei mainintoja polttokennojen kemiasta:

Lukion oppikirjat:

- A1 : Lampiselkä, J., Sorjonen, T., Vakkilainen, K-M., Aroluoma, I., Kanerva, K., Karkela, L. & Mäkelä, R. (2004). *Kemisti 1 – Ihmisen ja elinympäristön kemia*. Helsinki: WSOY.
- A 2 : Lampiselkä, J., Sorjonen, T., Vakkilainen, K-M., Aroluoma, I., Kanerva, K., Karkela, L. & Mäkelä, R. (2005). *Kemisti 2 – Kemian mikromaailma*. Helsinki: WSOY.
- A 5 : Aroluoma, I., Kanerva, K., Karkela, L., Lampiselkä, J., Mäkelä, R., Sorjonen, T. & Vakkilainen, K-M. (2007). *Kemisti 5 – Reaktiot ja tasapaino*. Helsinki: WSOY.
- B1 : Kalkku, I., Kalmi, H., & Korvenranta J. (2004). *KIDE 1 – Ihmisen ja elinympäristön kemia. KE1*. Helsinki: Otava.
- B 2: Kalkku, I., Kalmi, H. & Korvenranta, J. (2004). *KIDE 2 – Kemian mikromaailma. KE2*, Helsinki: Otava.
- B 3: Kalkku, I., Kalmi, H., & Korvenranta J. (2005). *KIDE 3 – Reaktiot ja energia. KE3*. Helsinki: Otava.
- B5: Kalkku, I., Kalmi, H., & Korvenranta J. (2007). *KIDE 5 – Reaktiot ja tasapaino. KE 5*. Helsinki: Otava.
- C1 : Lehtiniemi, K. & Turpeenoja, L. (2005). *MOOLI 1 – Ihmisen ja elinympäristön Kemia*. Helsinki: Otava.

- C 2 : Lehtiniemi, K. & Turpeenoja, L. (2005). *MOOLI 2 – Kemian mikromailma*. Helsinki: Otava.
- C 3 : Lehtiniemi, K. & Turpeenoja, L. (2005). *MOOLI 3 –Reaktiot ja energia*. Helsinki: Otava.
- C 5 : Lehtiniemi, K. & Turpeenoja, L. (2007). *MOOLI 5 – Reaktiot ja tasapaino*. Helsinki: Otava.
- D1 : Hannola-Teitto, M., Jokela, R., Leskelä, M., Näsäkkälä, E., Pohjakallio, M. & Rassi, M. (2004). *Neon 1 – Ihmisen ja elinympäristön kemia*. Helsinki: Edita.
- D2 : Hannola-Teitto, M., Jokela, R., Leskelä, M., Näsäkkälä, E., Pohjakallio, M. & Rassi, M. (2005). *Neon 2 – Kemian mikromailma*. Helsinki: Edita.
- D3 : Hannola-Teitto, M., Jokela, R., Leskelä, M., Näsäkkälä, E., Pohjakallio, M. & Rassi, M. (2006). *Neon 3 – Reaktiot ja energia*. Helsinki: Edita.
- D5 : Hannola-Teitto, M., Jokela, R., Leskelä, M., Näsäkkälä, E., Pohjakallio, M. & Rassi, M. (2006). *Neon 5 – Reaktiot ja tasapaino*. Helsinki: Edita.
- E1 : Kaila, L., Meriläinen, P., Ojala, P., Pihko, P. & Salo K. (2005). *Lukion kemia – REAKTIO 1. Ihmisen ja elinympäristön kemia*. Helsinki: Tammi.
- E 2 : Kaila, L., Meriläinen, P., Ojala, P., Pihko, P. & Salo K. (2006). *Lukion kemia – REAKTIO 2. Kemian mikromailma*. Helsinki: Tammi.
- E 3 : Kaila, L., Meriläinen, P., Ojala, P. & Pihko, P. (2006). *Lukion kemia – REAKTIO 3, Reaktiot ja energia*. Helsinki: Tammi.
- E 5 : Kaila, L., Meriläinen, P., Ojala, P., Pihko, P. & Salo K. (2007). *Lukion kemia – REAKTIO 5. Reaktiot ja tasapaino*. Helsinki: Tammi.
- E 6: Kaila, L., Meriläinen, P., Ojala, P., Pihko, P. & Salo K. (2007). *Lukion kemia – REAKTIO. Kertauskirja*. Helsinki: Tammi.

Yläkoulun oppikirjat:

- F: Happonen, J., Heinonen, M., Muilu, H. & Nyrhinen K. (2008). *Avain kemian 2. 1.-6 painos*. Keuruu: Otava.

- G: Aspholm, S., Hirvonen, H., Lavonen, J., Penttilä, A., Saari, H., Viiri, J. & Hongisto, J. (2008). *Aine ja energia. Kemian tietokirja* (8.-13 painos). Helsinki.: WSOY.
- J: Kangaskorte, A., Lavonen, J., Penttilä, A., Pikkarainen, O., Saari, H., Sirviö, J., Vakkilainen K-M. & Viiri, J. (2010). *KEMIA. FyKe 7-9* (1. painos). Helsinki: WSOYpro.

Liite 2: Oppikirja-analyysin tulokset taulukoituina

Taulukko 1. Polttokennojen toiminta ja rakenne

Kirja	Teksti oppikirjassa	Kuva tai tehtävä
A4	Positiivisella kohtiolla ilman happi pelkistyy oksidi-ioneiksi elektrodille ja negatiivisella kohtiolla vetykaasu hapettuu vetyioneiksi. Muodostuneet ionit kulkeutuvat elektrodeilta pois päin ja reagoivat toistensa kanssa vedeksi. s. 50 $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$ $2H_2 + 4e^- \rightarrow 4H^+$ Tuotteet reagoivat edelleen $4H^+ + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O$ s. 50 Matalassa lämpötilassa (80 °C – 200 °C) toimivissa polttokennoissa on platinaelektrodit, joiden pinnalla happi- ja vetykaasut johdetaan. Tällaisissa kennoissa elektrolyytinä on jokin sähköä johtava polymeeri, kaliumhydroksidi KOH tai fosforihappo H₃PO₄. Korkean lämpötilan (600 °C – 1 000 °C) kennoissa ei tarvita enää platinaelektrodia katalyytiksi, vaan kaasut johdetaan suoraan huokoisen elektrodin pinnalle. Nämä kennot voivat käyttää polttoaineena myös hiilivetyjä. Niissä on elektrolyytinä Li₂CO₃- tai K₂CO₃-sulate tai kiinteä ZrO₂. s. 51	Kuva: Kuvan kantolaukussa ylhäällä on polttokenno (pituus 44 cm, paksuus 6,0 cm) ja sen alapuolella metallihydridisäiliö (40 cm³). Kennon ulostulojännite on 14,4 V. –virta 1,6 A ja kapasiteetti 7 Ah. s.51 (makrotaso)
B4	Polttokennossa polttoaineen kemiallinen energia muuntuu suoraan sähköenergiaksi ja lämmöksi ilman liekillistä palamista. Polttokennoa pidetään galvaanisena kennona, vaikka erona tavalliseen galvaaniseen kennoon on se, että polttokennossa reagoivia aineita syötetään laitteistoon koko ajan. s.26 Tutustutaan polttokennon toimintaperiaatteeseen oheisen kuvan mukaisen yksinkertaisen vety-happipolttokennon avulla. Vety-happipolttokennon elektrodeina voidaan käyttää esimerkiksi nikkeliverkkoa, jotka on päällystetty hienojakoisella palladiumilla. Palladium toimii elektrodireaktiossa katalyyttinä. Kumpikin nikkeliverkko on väkevässä kaliumhydroksidiliuoksessa. Elektrodit ovat nestekosketuksessa toisiinsa huokoisen väliseinän kautta. vety-happipolttokennon toiselle elektrodille johdetaan vetykaasua ja toiselle happikaasua. Elektrodireaktiot ovat seuraavat: $H_2(g) + 2 OH^-(aq) \rightarrow 2 H_2O(l) + 2 e^-$ $O_2(g) + 2 H_2O(l) + 4 e^- \rightarrow 4 OH^-(aq)$ Nähdään, että elektrodireaktiossa vety hapettuu ja happi pelkistyy. Kun puolireaktiot yhdistetään, saadaan vety-happipolttokennon kokonaisreaktioksi: $2 H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2 H_2O(l)$	Kuva: Kaavio vety-happipolttokennosta. Negatiivisella elektrodilla kuluu ja positiivisella elektrodilla muodostuu OH⁻-ioneja. jotta liuokset pysyisivät sähköisesti neutraaleina, huokoisen väliseinän läpi siirtyy OH⁻-ioneja oikealta elektrodilta vasemmalle elektrodille.s. 26 (submikrotaso ja symbolitaso)

	Elektrodireaktiossa vedystä ja hapesta syntyy siis vettä. Myös kaupallisissa alkalipolttokennoissa elektrolyytinä käytetään väkevää kaliumhydroksidiliuosta. Elektrodit ovat yleensä katalyytillä päällystettyä grafiittia. Tässä kennotyyppissä vetykaasun pitää olla erittäin puhdasta, sillä esimerkiksi hiilidioksidi aiheuttaa kiinteän karbonaatin muodostamista. Karbonaatti haittaa ionien liikkumista. s. 27	
C4	Kun sähköenergiaa tuotetaan polttoaineesta sähkökemiallisessa parissa, saadaan palamisreaktion kemiallinen energia muutettua sähköiseksi paremmalla hyötysuhteella. Tällöin puhutaan polttokennoista, vaikka hapettumis-pelkistymisreaktio tapahtuukin ilman liekkiä. s. 60 Vety-happi-polttokennon negatiiviselle elektrodille johdetaan vetyä ja positiiviselle elektrodille happea. Elektrodit ovat huokoista grafiittia, joka on pinnoitettu metallikatalyytillä, kuten platinalla. Elektrolyytinä käytetään kaliumhydroksidiliuosta. Kennossa tapahtuvat reaktiot ovat: $2 \text{H}_2 (\text{g}) + 4 \text{OH}^- (\text{aq}) \rightarrow 4 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) + 4 \text{e}^- \quad E_{\text{h}} = +0,83 \text{ V}$ $\text{O}_2 (\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) + 4 \text{e}^- \rightarrow 4 \text{OH}^- (\text{aq}) \quad E_{\text{h}} = +0,40 \text{ V}$ Kokonaisreaktio: $2 \text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \quad E = +1,23 \text{ V}$	Kuva: Vety-happipolttokennon poikkileikkaus. s. 61 (submikrotaso, symbolitaso)
D4	Paristot, akut ja polttokennot ovat kaikki galvaanisia kenoja. Niissä reaktioiden kemiallinen energia muuntuu suoraan sähköenergiaksi, mikä mahdollistaa hyvän hyötysuhteen. s. 34 Polttokennojen toiminta on samantyyppistä kuin paristojen, mutta polttokennoissa reagoivia aineita syötetään kennoon jatkuvana virtana kennon ulkopuolelta, kun taas paristot ovat kertakäyttöisiä. s. 38 (-) – <i>navalla, anodilla</i>: $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ (+) – <i>navalla, katodilla</i>: $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ <i>kokonaisreaktio</i>: $2\text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} (\text{l})$ Yhden tällaisen sähköparin lähdejännite E^0 on 1,23 V, mutta käytännössä jännite jää noin puoleen lähdejännitteestä. Polttokennot voivat sisältää useita sähköpareja sarjaan kytkettynä, jolloin niiden antama jännite on yksitáisten sähköparien jännitteiden summa. s. 39 Vety-happipolttokennoissa katodireaktiona on happikaasun pelkistyminen. Kennossa käytetään avointa katodia, eli katodi on suoraan kosketuksessa ympäröivän ilman kanssa, jossa on happea yllin kyllin. ”Kehittämässämme kennotyyppissä polttoaineena toimiva vetykaasu tuotetaan esimerkiksi ruteenikatalyytin avulla natriumboorihydridiliuoksesta ja johdetaan hapettumaan kennon anodille. Anodi ja katodi on valmistettu huokoisesta hiilestä, johon katalyytiksi on lisätty platinaa”, Lund kuvaa kennon rakennetta. s. 40 Akkujen ja paristojen suorituskyyky laskee varaustason laskiessa, kun taas polttokennon suorituskyyky pysyy	Tehtävä: Kirjoita reaktioyhtälöt polttokennon anodi- ja katodireaktioille, kun kennon toiminta perustuu etaanin C_2H_6 (g) palamisreaktioon hiilidioksidiksi CO_2 (g) ja vedeksi H_2O (l) happamassa vesiliuoksessa. $2 \text{C}_2\text{H}_6 (\text{g}) + 7 \text{O}_2 (\text{g}) \rightarrow 4 \text{CO}_2 (\text{g}) + 6 \text{H}_2\text{O} (\text{l})$ Laske, kuinka monta litraa etaania (NTP) tarvitaan anodilla tuottamaan 0,50 ampeerin virta kuuden tunnin ajaksi. Kuinka monta litraa happea tällöin kuluu katodilla? s. 50

	vakiona niin kauan kuin polttoainetta riittää. s. 40	
E4	Tänään galvaanisten kennojen sovellutukset toimivat kaikkien paristo- ja akkukäyttöisten laitteiden virtalähteinä. Myös polttokennoissa sovelletaan samaa ideaa. s. 30 Polttokenno on sähkökemiallinen jatkuvatoiminen laite, joka muuttaa polttoaineen ja hapettimen kemiallisen energian sähköksi ja lämmöksi ilman palamista. s. 46 Polttokenno koostuu anodista, katodista ja niitä erottavasta elektrolyytistä. Elektrolyytin tehtävänä on estää polttokennoon jatkuvasti syötettävän polttoaineen ja hapettimen sekoittuminen ja palaminen. Sen on myös mahdollistettava tiettyjen ionien kulku, jotta varaustasapaino kennossa säilyy. Sekä anodi että katodi on valmistettu huokoisesta nikkelistä tai grafiitista. Niihin on lisätty katalyyttiä elektrodireaktioita nopeuttamaan. s. 46 Kennon elektrodireaktiot ovat: 1) kun elektrolyytinä on fosforihappo: $\text{anodi: } 2H_2(g) \rightarrow 4H^+ + 4e^-$ $\text{katodi: } O_2(g) + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O(g)$ $\text{kennoreaktio: } 2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(g)$ 2) kun elektrolyytinä on kuuma KOH: $\text{anodi: } 2H_2(g) + 4OH^- \rightarrow 4H_2O(g) + 4e^-$ $\text{katodi: } O_2(g) + 2H_2O(g) + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ $\text{kennoreaktio: } 2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(g)$ s. 46 Kennon tuottama jännite on teoriassa noin 1,23 V, mutta käytännössä 0,7 V-0,9 V. s. 46	
I	Polttokenno on myös kemiallinen virtalähde. Se eroaa paristosta ja akusta siten, että sen sähköenergiaa tuottavia ainesosia lisätään polttokennoon koko sen käytön ajan. Polttokennosta saadaan siis virtaa juuri niin kauan kuin siihen syötetään energiaa tuottavia ainesosia. s. 148	Kuva: Polttokennoista s. 148 (makrotaso) Tehtävä: Millainen virtalähde on polttokenno? s. 148

Taulukko 2. Polttokennotyypit

Kirja	Teksti oppikirjassa	Kuva tai tehtävä
A4	Matalassa lämpötilassa (80 °C – 200 °C) toimivissa polttokennoissa on platinaelektrodit, joiden pinnalla happi- ja vetykaasut johdetaan. Tällaisissa kennoissa elektrolyytinä on jokin sähköä johtava polymeeri, kaliumhydroksidi KOH tai fosforihappo H ₃ PO ₄ . Korkean lämpötilan (600 °C – 1 000 °C) kennoissa ei tarvita enää platinaelektrodia katalyytiksi, vaan kaasut johdetaan suoraan huokoisen elektrodin pinnalle. Nämä kennot voivat käyttää polttoaineena myös hiilivetyjä. Niissä on elektrolyytinä Li ₂ CO ₃ - tai K ₂ CO ₃ -sulate tai kiinteä ZrO ₂ . s. 51	
B4		Tehtävä: Mitä muita polttokennotyyppejä on kehitetty kuin alkalipolttokenno? Tietoa eri polttokennotyypeistä saa esimerkiksi seuraavasta osoitteesta: www.automation.hut.fi/edu/as84134/halinen105.pdf ; hakusana polttokenno
D4	Osassa kennoissa käytetään katalyytteinä entsyymejä, jolloin puhutaan biopolttokennoista. s. 38 Elektrolyytin perusteella luokiteltuina yleisimmät polttokennotyypit ovat PEM –kennot eli polymeerielektrolyyttimembraanikennot, fosforihappokennot, alkalipolttokennot, sulakarbonaattikennot ja kiinteäoksidipolttokennot. Näistä kaksi viimeiseksi mainittua ovat lähinnä voimalaitoskäyttöön soveltuvia korkean lämpötilan (600-1000 °C) kennotyyppejä ja muut matalamman lämpötilan kennotyyppejä.	Kuva: polttokennosta (makrotaso)
E4	Vety-happipolttokenno, jossa elektrolyytinä on, a) fosforihappo, b) kaliumhydroksidi. s. 46	Kuva: fosforipolttokennon ja alkalipolttokennon toimintaperiaatteesta (submikrotaso ja symbolitaso) s. 46

Taulukko 3. Polttokennoissa käytettävät polttoaineet

Kirja	Teksti oppikirjassa	Kuva tai tehtävä
A3	Vety on yksi suurimmista tulevaisuuden lupauksista polttoainemarkkinoilla. Se on puhdas energianlähde, sillä palamisessa muodostuu vain vettä. Lisäksi vetyä voidaan käyttää polttoaineena polttokennoissa. Ne ovat virtalähteitä, joissa vedyn ja hapen välinen hapetus-pelkistysreaktio tapahtuu elektrodeilla. Vetyä voidaan valmistaa hajottamalla vettä esimerkiksi aurinkosähköllä tai kaasuttamalla biomassaa. Sitä syntyy myös krakkauksreaktioiden sivutuotteena. Vedyn laajempi käyttö esimerkiksi autojen polttoaineena ei ole toistaiseksi mahdollista, sillä jakeluverkosto on puutteellinen. Sama ongelma haittaa myös bio- ja maakaasun jakelua. Niitä molempia voitaisiin käyttää bensiinin korvikkeena. s. 105	Kuva: Nestemäisen vetypolttoaineen täyttöasema, joka toimii aurinkoenergialla. s. 105 (makrotaso)
A4	Polttokennojen polttoaineena voidaan käyttää vetyä ja joissakin tapauksissa vedyn ja hiilimonoksidin seosta. s. 50 Polttoainevety on joko nesteytettyä tai metallihydrideihin sitoutunutta vetykaasua. Joissain polttokennotyypeissä polttoaineeksi soveltuvat myös metaani tai metanoli. Reaktioon tarvittava happi otetaan yleensä ilmasta. polttokennoilla toimivissa autoissa on kompressoreja, jotka puristavat ilman riittävän suureen paineeseen. s. 50	Kuva: Kuvan kantolaukussa ylhäällä on polttokenno (pituus 44 cm, paksuus 6,0 cm) ja sen alapuolella metallihydridisäiliö (40 cm ³). Kennon ulostulojännite on 14,4 V. –virta 1,6 A ja kapasiteetti 7 Ah. s.51 (makrotaso)
B4	Tulevaisuudessa polttokennot näyttävät avaavan tien vetyenergiatalouteen. Polttokennossa vedyn kemiallinen energia muuttuu suoraan sähköenergiaksi. Polttokennolla vedyn energiasta saadaan paljon suurempi osa hyötykäyttöön kuin käyttämällä vetyä polttoaineena perinteisen höyryvoimalan sähköntuotannossa.	Kuva: Geoterminen voimala. Islanti on pitkällä suunnittelemassa siirtymä vetytalouteen. Vetyä on tarkoitus tuottaa elektrolyytisesti. Tämä on taloudellisesti mahdollista, sillä Islannissa on runsaasti vesivoimaa ja geotermistä energiaa. Paitsi polttokennotekniikassa vetyä voidaan hyödyntää muuttamalla hiilimonoksidia metanoliksi. Metanoli puolestaan soveltuisi kalastusalusten polttoaineeksi. s. 42 (makrotaso)

C4	Polttokennoon syötetään polttoainetta, jona voi toimia vety puhtaana alkuaineena tai hiilivetyyn sitoutuneena. Vetyä on helppo valmistaa elektrolyytisesti esimerkiksi merivedestä. Lisäksi tarvitaan hapetin, jona toimii ilmasta saatava happi. s. 60 Näiden lisäksi vedyn varastointi on ongelmallista. vety nesteytyy vasta -253 ° C:n lämpötilassa, joten nestemäisen vedyn säilytys on hankalaa. Vetyä pyritään säilyttämään paineistettuna tai metallihydridiin sidottuna. NykYTEKNIKALLA vetyä saadaan säilöttyä noin 10 prosenttia säiliön painosta, mikä tarkoittaisi noin 500 km:n ajomatkaa polttokennoautolla. s. 61 Vedyn käyttö tulevaisuuden energianlähteenä on eräs energiapolitiikan tärkeimpiä kysymyksiä. Vedestä vetyä voidaan tuottaa elektrolyytisesti hyödyntämällä auringon energiaa, jolloin energiakustannukset jäävät alhaisemmiksi kuin muulla tavoin tuotettua sähköenergiaa käyttämällä. Polttokennossa vety reagoi uudelleen hapen kanssa, jolloin muodostuu vettä ja vapautuu energiaa. Vetykäyttöisten kulkuneuvojen yksi etu on, että pakokaasut sisältävät lähes yksinomaan vesihöyryä. s. 94	Kuva: Vedyn valmistus ja käyttö energianlähteenä. s. 94 (submikrotaso, makrotaso, symbolitaso) Tehtävä: tiedonhankintatehtävä epämetalleista. Vety tulevaisuuden energianlähteenä. s. 98
D4	Kennon elektrodireaktiot määräävät sen, mitä polttokennoon tankataan. Kennon katodilla reagoi yleensä happikaasu O₂, ja kennon polttoaineeksi kutsutaan sitä ainetta, joka hapettuu kennon anodilla. Polttoaineeksi käy periaatteessa mikä tahansa virtaava ja hapetettavissa oleva aine. Nykyisissä kennoissa suuri osa toimii vedyllä, jota voidaan syöttää kennoon suoraan paineetys säiliöstä tai tuottaa paikan päällä jostain sopivasta vedyn yhdisteestä, kuten metaanista CH₄ tai hydratsiinista N₂H₂. Myös esimerkiksi metanolia ja etanolia polttoaineenaan käyttävien kennojen kehitystyö on vilkasta. s. 38 Vetyä pidetään yhtenä lupaavimmista tulevaisuuden polttoaineista. vety ei esiinny maapallolla vapaana kuten öljy tai kivihiili, vaan vety täytyy valmistaa käyttämällä jostakin primäärienergianlähteestä tuotettua energiaa. Siksi vetyä kutsutaan energiankantajaksi. s. 39	Tehtävä: Jos sähköauton polttokennon polttoaineena käytetään metaania, kennon anodireaktio on $\text{CH}_4(\text{g}) + 10 \text{ OH}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}(\text{aq}) + 7 \text{ H}_2\text{O}(\text{l}) + 8 \text{ e}^-$ Kuinka suuri polttoainesäiliö autoon tarvitaan, jos auto toimii yhdellä tankkauksella 5 tuntia 400 ampeerin sähkövirralla? Metaani tankataan nestemäisenä, jolloin sen tiheys on 0,415 g/cm³. s. 49
E4	Toistaiseksi tutkituin ja tavallisin polttokenno käyttää polttoaineenaan vetykaasua ja hapettimena happikaasua. Vetykaasu voidaan tuottaa myös muista vetyä sisältävistä yhdisteistä, kuten metaanista, metanolista, etanolista tai jopa maakaasusta. Uusissa sovelluksissa pyritään polttoaineiden suoraan syöttöön, ilman vetykaasun erillistä valmistusvaihetta. s. 46	
H	Vety syttyy hyvin herkästi, koska se muodostaa hapen kanssa helposti räjähtävää seosta, räjähdyskaasua. Syttyessään kaasuseos muuttuu räjähdysmäisesti vesihöyryksi. Aiemmin vetyä käytettiin ilmalaivojen ja ilmapallojen täyttökaasuna, mutta räjähdysvaaran vuoksi se on korvattu heliumilla. Räjähdysherkkyydestä on myös hyötyä: nestemäistä vetyä käytetään rakettien polttoaineena ja tulevaisuudessa ehkä myös vetyautoissa. s. 82	Kuva: rakettista, s. 82 (makrotaso) Kuva : ilmalaivasta, s.83 (makrotaso)

Taulukko 4. Polttokennojen ympäristövaikutukset

Kirja	Teksti oppikirjassa	Kuva tai tehtävä
A4	Polttokennoa pidetään yhtenä lupaavimmista uusista vaihtoehdoista nykyisille akkutyypeille. Sen merkittävin etu on jätteitten myrkyttömyys ympäristölle. Jos polttoaineena käytetään vetyä ja happea, reaktiotuotteena syntyy vain vettä. Hiilipitoisista polttoaineista muodostuu veden ohella vain hiilidioksidia. s. 51	
B4	Polttokennon etuna on myös sen saasteettomuus. Kun polttoaineina ovat vety ja happi, lopputuotteena on pelkkä vesi. s. 26	
C4	Pelkällä vedyllä toimivassa polttokennossa ei synny ympäristölle haitallisia savukaasuja ollenkaan, ja muillakin polttoaineilla päästäjä tulee vähän verrattuna muihin energiantuotantotapoihin. Tämän takia polttokenno olisi ihanteellinen energiaratkaisu auton voiman lähteeksi. s. 61	
D4	Kemiallista energiaa on osattu muuntaa sähköksi paristossa, polttokennoissa ja akuissa jo noin kahdensadan vuoden ajan. Viime vuosikymmeninä alan tutkimus- ja kehitystyö on ollut kiivasta, ja kemiallisista energianlähteistä yritetään saada pienempiä, tehokkaampia ja ympäristöä vähemmän kuormittavia. Ratkaiseeko polttokennoteknologian kehittyminen energiantuotannon ympäristöongelmat? s. 7 Eniten on panostettu vety-happipolttokennojen kehittämiseen. Niiden päästönä syntyy vain vettä. s. 39 Vedyn käyttö energiantuotantoon mahdollistaa energijärjestelmän, jossa ei synnyt haitallisia päästöjä missään vaiheessa. Tämä kuitenkin edellyttää, että myös vedyn valmistukseen käytettävä energia tuotetaan päästöttömästi. s. 39	
E4	Vety-happipolttokenno on siis saasteeton, ympäristöystävällinen tapa tuottaa sähköenergiaa. s. 46	
H	Bensiini ja diesel saastuttavat palaessaan ilmakehää, mutta vedyn palaessa muodostuu pelkkää vettä. Tosin liiallinen vesihöyry on myös haitallista ympäristölle. s. 82	

Taulukko 5. Polttokennojen käyttökohteet

Kirja	Teksti oppikirjassa	Kuva tai tehtävä
B4	Polttokennot sopivat erityisen hyvin hajautettuun sähköntuotantoon, jolloin sähköä tuotetaan siellä, missä siellä kulutetaankin. Kyseessä voi olla pienehkö voimala tai vaikkapa kannettava tietokone. Polttokennojen ennustetaan tulevaisuudessa korvaavan jännitelähteinä esimerkiksi akut. polttokennoja on jo pitkään käytetty avaruustekniikassa niiden hyvän suorituskyvyn ja luotettavuuden vuoksi. Polttokennoautot ovat tulevaisuuden sähköautoja. Niissä auton sähkömoottori tai sähkömoottorit saavat energiansa polttokennoista ja siinä käytettävästä vedystä. Polttokennoautojen yleistymiseen vaikuttavat polttokennojen teknisen kehityksen lisäksi sekä vetykaasun tuotantotapa että vetykaasun säilytyksen ja kuljetuksen järjestäminen. s. 27	Kuva: Kuvan sähköauto saa energiansa polttokennosta. Auto on testikäytössä Lontoon bussiliikenteessä. s. 27 (makrotaso)
C4		Kuva: polttokennoauto s. 61 (makrotaso)
D4	2000-luvun suuria haasteita on polttokennoteknologian saaminen laajempaan käyttöön. Polttokennojen odotetaan yleistyvän esimerkiksi kulkuvälineiden voimanlähteinä ja voimalaitossovelluksissa. Polttokennovoimalaitokset eivät vielä ole tehneet läpimurtoa, mutta niitä on koekäytössä eri puolella maailmaa. Suurten perustamiskustannusten lisäksi polttokennojen käyttöä voimalaitoksissa rajoittavat muun muassa polttoaineena käytetyn vedyn korkea hinta ja varastointiongelmät. Polttokennoautojen yleistymistä hidastaa polttoaineen jakeluverkoston rakentaminen. Nopeimmin saataneen suurille markkinoille polttokennojen piensovellukset, kuten kannettavien laitteiden virtalähteet. s. 39 Skootterissa on vedyllä toimiva polttokenno, cd-levyjen musiikki viihdyttää polttokennojen tuottamalla energialla ja kahvinkeitin keittää kahvia vedyn voimalla. Emme vielä elä varsinaisessa vetytaloudessa, mutta erilaisissa piensovelluksissa ja autojen apuenergianlähteinä, kuten elintarvikkeita kuljettavien kuorma-autojen jäähdytysjärjestelmien ylläpidossa vedyllä toimivat polttokennot voivat piankin yleistyä. s. 40 PEM –kennot soveltuvat hyvin esimerkiksi pienten kannettavien laitteiden, kuten kännyköiden ja kannettavien tietokoneiden, jännitelähteiksi. s. 40 ”PEM –tyypin polttokennoja kehitetään myös ajoneuvojen energianlähteiksi. Julkinen liikenne lienee eturintamassa polttokennojen käyttöönotossa, koska niiden ajoneuvot tankataan omilla varikoillaan, mihin voidaan hankkia tarvittavat polttoaineet.” s. 40	Kuva: Autoteollisuus panostaa voimakkaasti polttokennoteknologian kehittämiseen. Lähes kaikki suuret autonvalmistajat ovat mukana polttokennotutkimuksessa. Kuvassa on prototyyppi vetykäyttöisestä Hondasta vuodelta 2005. Tulevaisuuden tavoitteena on saada tällaiset vain vetyä polttoaineenaan käyttävät polttokennoautot laajaan käyttöön. s. 39 (makrotaso)
E4	Vetykaasun reaktiivisuus, kalleus ja huono sopivuus nykyisiin polttoaineiden jakelujärjestelmiin haittaavat polttokennojen käyttöä esimerkiksi autojen voimanlähteenä. Todennäköisemmin metanolia käyttävät polttokennot yleistyvät ensimmäiseksi elektroniikan ja tietokoneiden virtalähteinä. s. 46	
H		Tehtävä: Internet tehtävä, Valitse seuraavista aiheista yksi ja tee siitä pieni tutkielma:

		vetyauto, hapteen perustuvat valkuaisaineet, otsonin käyttö desinfiointissa. s. 84 Tehtävä: Internet tehtävä, a) Mitä akkutyyppejä löydät kotonasi olevista laitteista? b) Mitä eroja näillä akuilla on? c) Mikä on polttokenno? s. 218
I	Osa autonvalmistajista haluaa jo lähivuosina korvata ainakin joidenkin bensiiniautojen laturit polttokennoilla. Syynä on autojen sähkölaitteiden kasvanut sähköntarve. Muutama vuosikymmen sitten noin yhden kilowatin teho riitti suurehkonkin henkilöauton sähkölaitteiden tarpeisiin, mutta nykyauton monimutkainen elektroniikka vaatii kuitenkin jo lähes viiden kilowatin tehon. Tavanomainen laturi n ja akun muodostama sähköjärjestelmä on myös melko epätaloudellinen, koska laturin ja akun häviöt ovat suuria. Pelkän sähköön tuottaminen saattaa kuluttaa jopa 1,5 litraa bensiiniä sadan kilometrin matkalla. s. 148	Tehtävä: Miksi tulevaisuuden autoissa polttokenno korvaa laturin? s. 148.

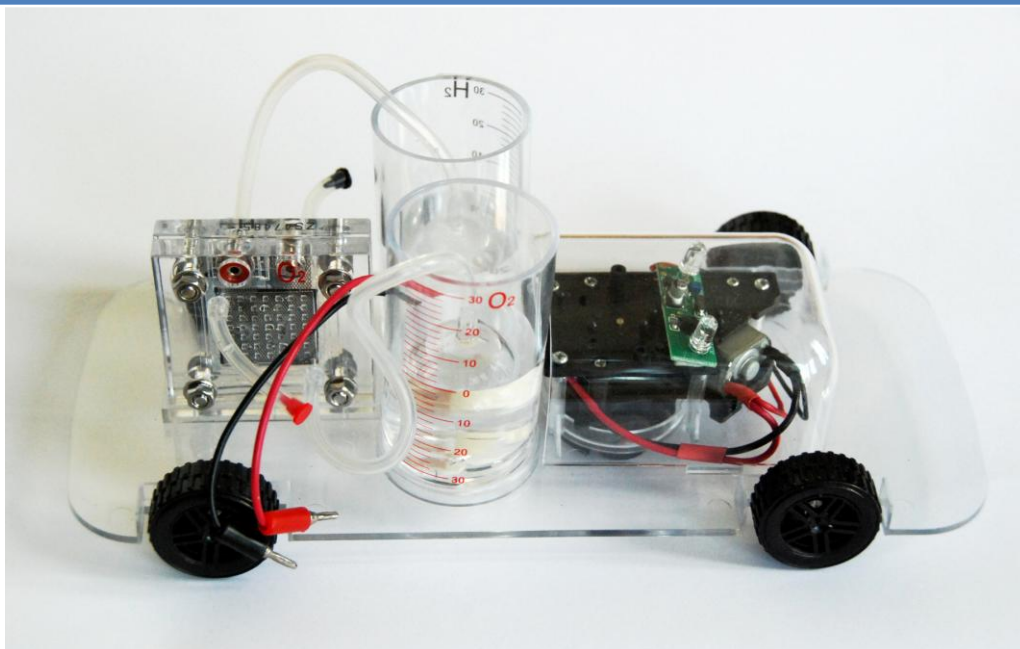
Taulukko 6. Muut maininnat polttokennojen kemiasta

Kirja	Teksti oppikirjassa	Kuva tai tehtävä
A4	Tavallisten polttomoottoreiden hyötysuhde on melko huono (30 – 40 %), sillä suuri osa vapautuneesta lämpöenergiasta katoaa hukkalämpönä mm. kuumien pakokaasujen mukana. Polttokennossa kemiallinen energia muutetaan suoraan sähköenergiaksi, jolloin lämpöhäviötä ei tapahdu. Polttokennojen hyötysuhde onkin huomattavasti parempi (50–80 %) kuin polttomoottorin. s. 51	
B4	Polttokennon hyötysuhde on suuri verrattuna perinteiseen tapaan muuntaa polttoaineen kemiallinen energia ensin lämpöenergiaksi ja siitä edelleen mekaaniseksi energiaksi ja sähköenergiaksi. Polttokennon hyötysuhde voi olla jopa 70 %, ja jos syntyvä lämpöenergia otetaan talteen, se nousee tätäkin suuremmaksi. Esimerkiksi tavallisen polttomoottorin hyötysuhde on vain 20 – 30 %. s. 26	
C4	Itse kenno on äänetön, mutta jäähdytyspuhaltimet aiheuttavat jonkin verran ääntä. Ensimmäisen polttokennon rakensi walesilainen William Groove jo vuonna 1839. Polttokennojen kehitystä vei eteenpäin avaruuden valloitus, sillä avaruusalusten sähkönsaantia varten pyrittiin saamaan aikaan mahdollisimman käyttökelpoisia ratkaisuja. Esimerkiksi Apollo-ohjelman kuulennolla käytettiin noin 200 kg:n painoista vety-happi-polttokennoa, joka tuotti virtaa kuuraketille 11 päivän kuulennon ajan. Kennon tuottama vesi voitiin käyttää astronauttien juomavetenä. s. 61 Polttokennon kehittämistä kilpailukykyiseksi muiden energiantuotantotapojen rinnalle on tutkittu valtavasti.	

	Vieläkin ratkaisemattomia käytännön ongelmia ovat kennon korkea toimintalämpötila, riittävän hyvän sähköisen kosketuksen luominen kolmen eri faasin välille (kaasumainen polttoaine, kiinteät elektrodit ja elektrolyyttiliuos), katalyyttien korkeat hinnat ja kennon osien korroosio. s. 61	
D4	Polttokennoilla on hyvä hyötysuhde ja niistä aiheutuu vain vähän ympäristöpäästöjä, minkä vuoksi niiden tutkimus- ja kehitystyö on ollut hyvin aktiivista viime vuosikymmeninä, mutta toimivan ja taloudellisen kennon kehittäminen on osoittautunut yllättävän vaikeaksi. s. 38 Lundin ryhmän erityistä osaamisaluetta ovat PEM -kennon kosteudenhallinta sekä kennon tuottaminen niin kutsutun avoimen katodin avulla. Kaikissa vety-happipolttokennoissa syntyy toiminnan aikana jatkuvasti vettä, joka on poistettava. PEM -kennoissa kosteudenhallinta on keskeistä myös siksi, että kennon elektrolyytinä toimii protonijohtava polymeerikalvo, jonka sähkönjohtokykyyn kosteustaso vaikuttaa. Protoninjohtavuus tarkoittaa, että kalvon sähkönjohtokyky perustuu H^+ -ionien liikkumiseen. s.40 PEM -kennojen etuja ovat hyvä suorituskyky, nopea käynnistyminen ja reagointi kuorman muutoksiin, vähäinen korroosio ja kiinteän elektrolyytin käytön helppous. s. 40	
E4	Laitteen hyötysuhde on 40–70 %, kun tavallinen lämpövoimala muuttaa lämpöä sähköksi korkeintaan 40 %:n hyötysuhteella. s. 46	
I	Polttokennoilla on melko korkea hyötysuhde, mikä tarkoittaa sitä, että suuri osa sen käyttämästä polttoaineen energiasta muuttuu sähköenergiaksi. s. 148.	

Liite 3: Kehitetty oppimateriaali

OHJEKIRJA



SISÄLLYS

Johdanto	1
Tavoitteet.....	1
Työturvallisuus	1
AURINKOPANEELITUTKIMUS - energiaa aurinkopaneelilla	2
POLTTOKENNOAUTON RAKENTAMINEN	2
POLTTOKENNOAUTON TANKKAUS - polttoainetta vedestä elektrolyysillä.....	4
POLTTOKENNOAUTON AJAMINEN – energiaa polttokennosta.....	6
Ohjeita ongelmatilanteisiin.....	6

Johdanto

Maailman väestö kasvaa jatkuvasti ja sen seurauksena tarvitsemme yhä enemmän energiaa. Kasvava energiantarve johtaa myös saasteiden lisääntymiseen, joka näkyy pitkällä aikavälillä ilmastonmuutoksena. Fossiiliset polttoaineet ovat hupenemassa ja tulevaisuudessa on alettava kehittää uusia energianlähteitä ja tapoja tuottaa energiaa.

Viimeaikoina polttokennojen kehitys on ottanut suuria askeleita kohti tehokasta energian tuotantoa. Polttokennot ovat sähkökemiallisia laitteita, joihin polttoaine, esimerkiksi vety, syötetään ulkopuolelta. Polttokenno tuottaa energiaa niin kauan kuin sinne syötetään polttoaineita.

Polttokennoilla energiaa tuotetaan spontaanilla hapetus-pelkistysreaktiolla. Se on ympäristöystävällinen, hiljainen sekä korkeaan hyötysuhteen omaava tapa tuottaa energiaa. Vety-happi polttokennot tuottavat lopputuotteena vain vettä ja lämpöä.

Tavoitteet

- ymmärtää polttokennojen kemiaa ja niiden merkitystä energiantuotannolle, ympäristölle ja yhteiskunnalle
- ymmärtää vedyn merkitys tulevaisuuden ympäristöystävällisenä polttoaineena
- tutustuu polttokennoihin tutkimuksellisen opiskelun mukaisesti. Opiskelu sisältää yhtenä osana kokeellista työskentelyä.
- Oppimateriaali herättää innostus kemiaa kohtaan sekä tukee kiinnostuksen syntymistä.

Työturvallisuus

- Käytä suojalaseja ja työtakkia.
- Älä ylikuumenna aurinkopaneelia. Käytä vain korkeintaan 120 W pöytälamppua ja pidä lamppua noin 20 cm etäisyydellä paneelistä.
- Älä sulje kaasunkeräyksen sisäsyntereiden pohjalla olevia kaasun ulostuloaukkoja elektrolyysin aikana.
- Käytä varovaisuutta vetykaasun kanssa. Työskentele hyvin ilmastoidussa tilassa.
- Käytä töissä vain tislattua vettä. Hanavesi voi vahingoittaa polttokennon kalvostot.



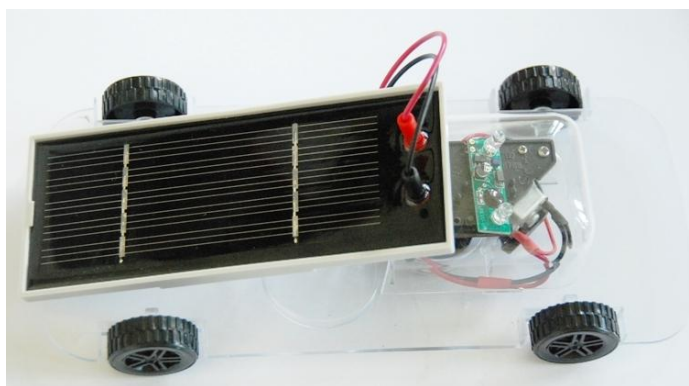
Tällainen suurennuslasimerkki kertoo, milloin kirjataan ylös tutkimusten hypoteeseja, tuloksia ja johtopäätöksiä!

AURINKOPANEELITUTKIMUS - energiaa aurinkopaneelilla



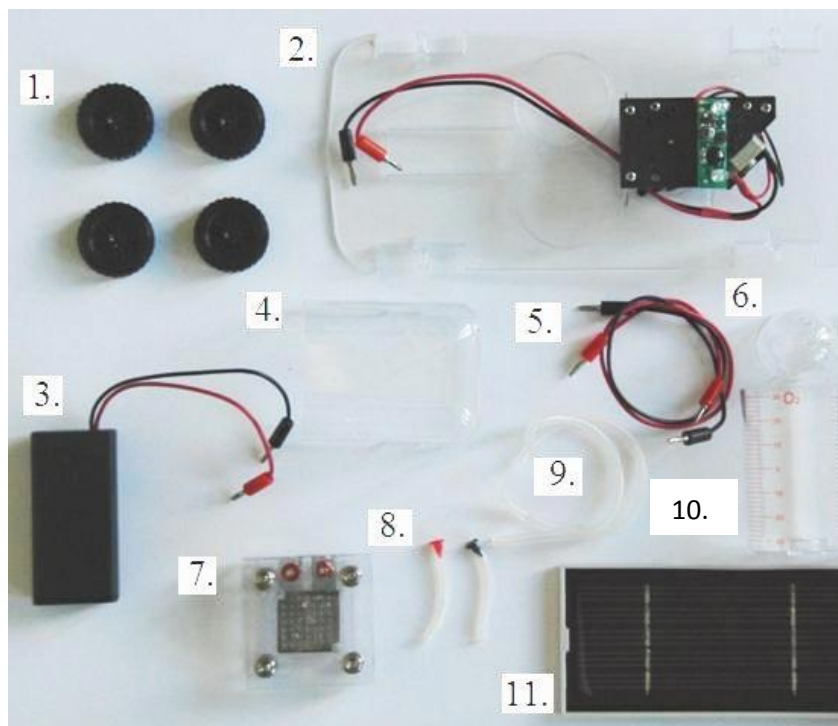
Antaako aurinkopaneeli yksinään riittävästi energiaa auton moottorille? Kirjaa aurinkopaneelitutkimuksen hypoteesi ja havainnot ylös. Pohdi lisäksi aurinkopaneelin hyötyjä, haittoja sekä ratkaisuja ongelmakohtiin.

Aurinkopaneeli yhdistetään suoraan auton moottoriin (Kuva 1.). Musta johdin yhdistetään aurinkopaneelin mustaan ja punainen johdin punaiseen kohtioon.



Kuva 1. Auton moottori on kytketty aurinkopaneeliin.

POLTTOKENNOAUTON RAKENTAMINEN

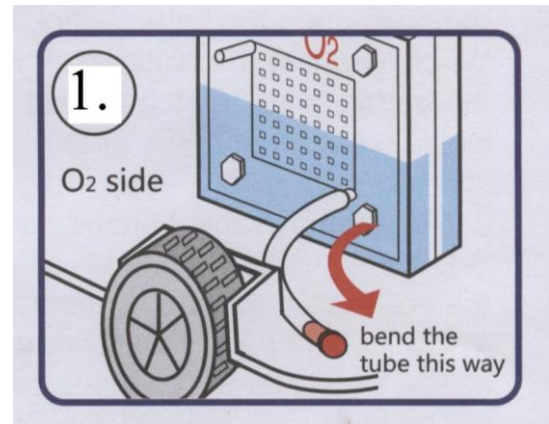
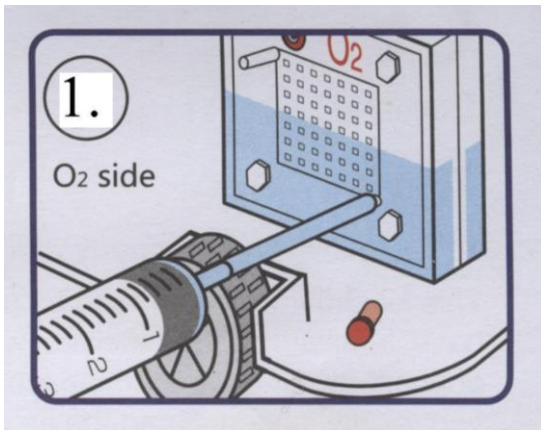


1. Renkaat
2. Runko
3. Paristokotelo
4. Moottorin kansi
5. Johtimet
6. Sisäsylinterit
7. Elektrolyysikenno/
polttokenno
8. Lyhyet kumilekut
9. Pitkät kumilekut
10. Kaasusylinterit
11. Aurinkopaneeli

Kuva 2. Polttokennoauton osat.

1.

Kostuta elektrolyysi-/polttokenno ennen kennon käyttöönottoa ja elektrolyysin aloittamista. Poista kennon happipuolen (O_2) kumiletkusta punainen suojus ja aseta ruisku kiinni kumiletkun päähän. Täytä ruisku ensiksi vedellä ja kiinnitä se kennon muoviletkuun. Ruiskuta vettä kennoon (n. 1 ml), kunnes veden pinta nousee kennon puoliväliin. Poista ruisku ja aseta punainen suojus takaisin.



Kuva: Horizon

2.

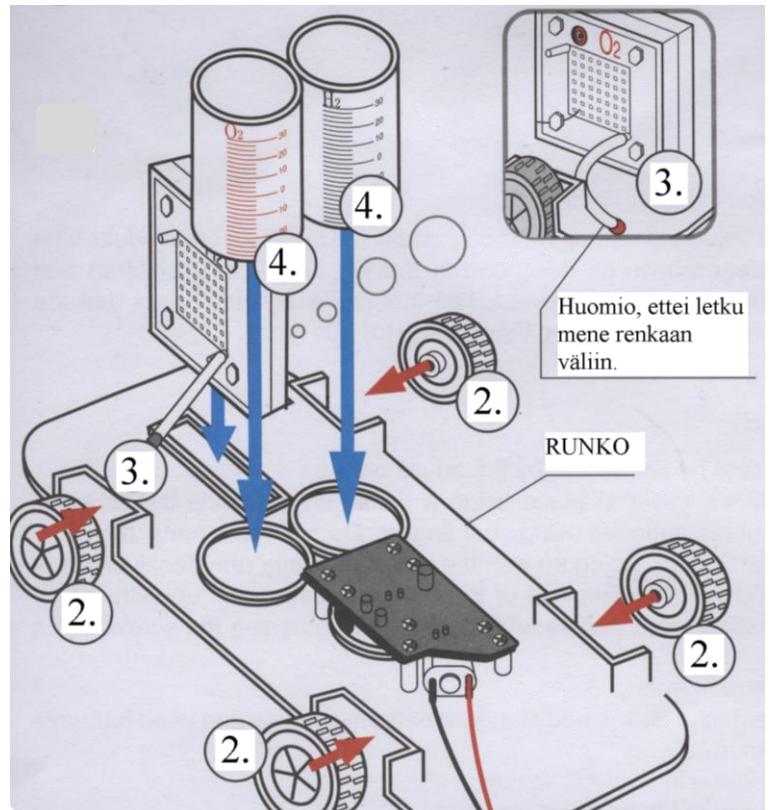
Kiinnitä renkaat auton runkoon.

3.

Aseta elektrolyysi-/polttokenno paikoilleen.

4.

Aseta kaasusylinterit kiinni auton alustassa oleviin ympyrän muotoisiin kohtiin.

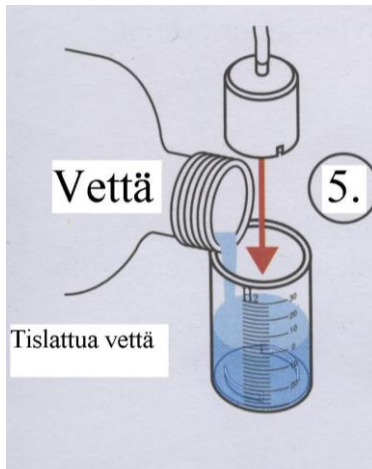


Kuva: Horizon

POLTTOKENNOAUTON TANKKAUS - polttoainetta vedestä elektrolyysillä

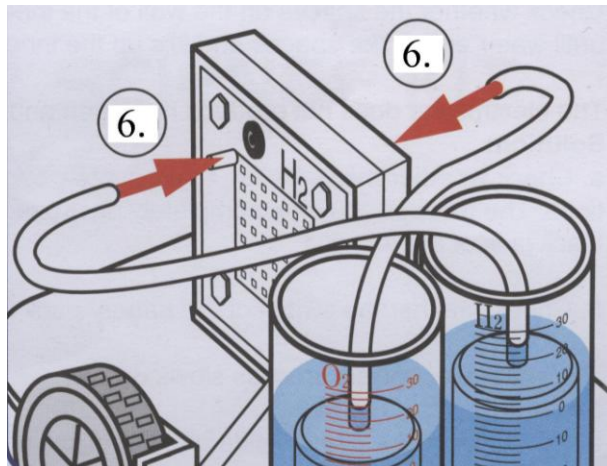
Jos aurinkopaneeli ei yksinään riitä tuottamaan tarpeeksi energiaa autolla ajamiseen, on energiaa saatava jostakin muualta esimerkiksi polttoaineesta. Auringonvalosta saatava energia voidaan sitoa kemialliseen muotoon. Vety toimii energian varastoimismuotona ja sitä pidetään tulevaisuuden polttoaineena. Vetyä voidaan valmistaa vedestä elektrolyysillä. Vesi hajotetaan sähkövirran avulla vety- ja happikaasuiksi. Valmistakaa vetyä ja happea vedestä auton elektrolyysikennon avulla.

5. Kaada vettä molempiin kaasusylintereihin niin, että veden pinta on mitta-asteikon "0" tasalla. Aseta kaasusylintereiden sisään pienemmät sisäsylinterit. Varmista, että pienet raot sisäsylintereiden pohjassa ovat vapaana eivätkä tuki kaasuntuloa ulos sisäsylinteristä. Tarkista vielä uudestaan, että veden yläpinta on mitta-asteikon "0" tasalla ja sisäsylinterit ovat tukevasti kiinni pohjassa sekä täyttyneet vedellä.



Kuva: Horizon

6. Yhdistä sisäsylinteristä lähtevät pitkät kumiletkut kiinni elektrolyysi-/polttookennoon. Vetytankin (H_2) letku kiinnitetään kennon H_2 puolelle ja happitankin (O_2) letku kiinnitetään kennon O_2 puolelle.



Kuva: Horizon

Kummalla tavalla on tehokkaampaa tuottaa kaasuja: aurinkopaneelilla vai pariston avulla? Käytä vaihtoehtoisista tehokkaampaa tapaa.

AURINKOPANEELILLA:

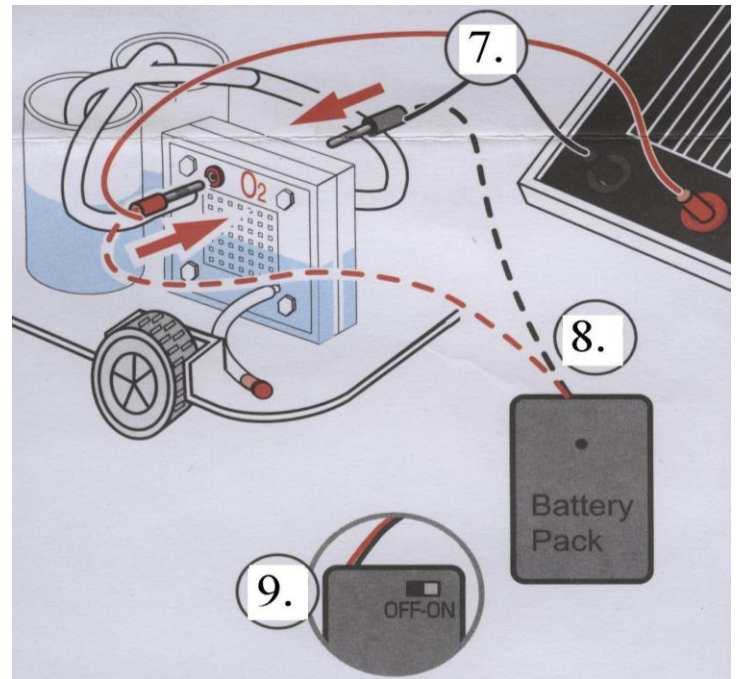
7.

Liitä punainen ja musta johdin kiinni aurinkopaneeliin siten, että musta johdin yhdistetään mustaan ja punainen johdin punaiseen kohtioon.

PARISTOLLA:

8.

Yhdistä paristokotelon punainen johdin kennon punaiseen kohtioon ja musta johdin kennon mustaan kohtioon.



Kuva: Horizon



Veden elektrolyysi alkaa tuottaa vedestä vety- ja happikaasuja tankkeihin. Aseta tutkimukselle hypoteesi: kumpaa kaasua syntyy enemmän vety- vai happikaasua?

Seuraa kaasujen kehitystä ja kirjaa mittaustulokset ylös 20 sekunnin välein. Tulosten kirjaamisen voit lopettaa, kun havaitset **vetytankin (H₂)** sisäsynteristä nousevat vetykaasukuplia.

9.

Aloita vedyn ja hapen tuottaminen laittamalla paristokotelon kytkin "ON" asentoon. Anna elektrolyysin olla käynnissä kunnes havaitset molemmista sisäsynteristä nousevan kaasukuplia.

Poista aurinkopaneelin/paristokotelon johdot elektrolyysi-/polttokennosta. Aseta paristokotelon kytkin "OFF" asentoon.



Kirjaa tutkimuksesi johtopäätökset ylös. Kumpaa kaasua syntyi enemmän? Miksi näin tapahtui? Miksi vetyä pidetään tulevaisuuden polttoaineena?

POLTTOKENNOAUTON AJAMINEN – energiaa polttokennosta

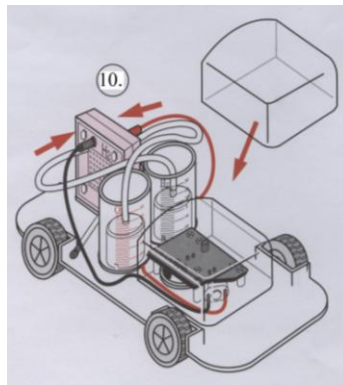
Elektrolyysillä tuotettu vety- ja happikaasu toimivat polttokennoauton polttoaineena. Auton moottori saa energiansa polttokennosta.



Tee ajotesti autolla ja kirjaa tulokset ylös. Mittaa sekuntikellolla auton kulkema aika ja mittaa sen kulkema matka laskemalla ajoradalla kuljetut kierrokset. Pohdi johtopäätöksenä, kuinka polttokennoauto saataisiin kulkemaan paremmin ja mitä hyötyä polttokennoautoa pidetään tärkeänä keksintönä.

10.

Aseta muovinen kansi moottorin suojaksi. Aseta auto ajoradalle! Kytke moottorista lähtevät johtimet kiinni polttokennoon siten, että punainen johdin kytketään kennon punaiseen kohtioon ja musta johdin kytketään kennon mustaan kohtioon.



Kuva: Horizon

Ohjeita ongelmatilanteisiin

- Elektrolyysikemmo ei ala tuottaa vety- ja happikaasuja.

Ratkaisu: Tarkista, että johtimet ovat asennettu kunnolla kiinni. Musta johdin asennetaan aina mustaa kohtioon ja punainen johdin punaiseen kohtioon, muuten elektrolyysikemmo voi vahingoittua lopullisesti.

- Elektrolyysi tuottaa kaasuja hitaasti.

Ratkaisu 1: Aurinkokennolla on hidasta tuottaa kaasuja, etenkin keinovalossa. Valon määrä saattaa olla liian pieni. Kokeile tuottaa energiaa pariston avulla. Laita pariston kytkin "ON" asentoon, jotta elektrolyysi käynnistyy. Jos ongelma jatkuu, siirry ratkaisukohtaan 2.

Ratkaisu 2: Lisää vettä ruiskulla kennon happi (O_2) puolelle ja odota noin 5 minuuttia.

- Auto lakkaa liikkumasta, vaikka vetytankissa on vielä polttoainetta jäljellä?

Ratkaisu 1: Irrota kaasusylinterien sisäsyntierien kumiletkut irti polttokennosta. Laita kumiletkut takaisin paikoilleen ja anna elektrolyysin tapahtua nyt 4-5 minuuttia pariston avulla. Kun vetytankki täyttyy, kytke auton moottori kiinni polttokennoon. Jos ongelma jatkuu, siirry ratkaisukohtaan 2.

Ratkaisu 2: Anna elektrolyysin tapahtua noin 10 minuuttia, jotta ylimääräinen vesi kuluu kennosta.

Selvitys tulevaisuuden autosta

Työskentelet tutkimusryhmässä tehtaassa, jossa valmistetaan komponentteja autoihin. Eilen johtajasi sai seuraavanlaisen sähköpostin Suomen valtionjohdolta.

Lähtettäjä: Suomen valtionjohto

Vastaanottaja: Autoteollisuuden johtajat

Hei,

Suomen valtionjohto on keskustellut ympäristöystävällisimmistä liikennejärjestelmistä. Liikenteen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä (CO₂) tulisi vähentää merkittävästi lähivuosina. Tulevaisuudessa tarvitaan autoihin jokin muu energianlähde kuin polttomoottori sekä jokin uusi polttoaine bensiinin tilalle.

Valtionjohto tekee strategiasuunnitelmia ja tarvitsee tutkimustuloksia mahdollisista ratkaisuista liikenteen päästöjen vähentämiseen.

Kerätkää yrityksenne tutkimusyksikkö tutkimaan tulevaisuuden energianlähteitä ja polttoaineita. Pyydämme lähettämään selvitykset tutkimustuloksista mahdollisimman pian.

Ystävällisin terveisin,

Suomen valtionjohto

Tutkimusryhmäsi tänään saama sähköpostiviesti:

Lähettiläjä: Autotehtaan johtaja

Vastaanottaja: Tutkimusryhmän tutkijat

Tervehdys kaikille,

sain eilen kiireellisen sähköpostin Suomen valtionjohdolta. He pyytävät tutkimustuloksia tulevaisuuden päästöttömästä autosta. Tutkimusryhmänne tulisi toteuttaa tutkimus asiasta ja tehdä siitä kirjallinen selvitys.

Kuten moni teistä tietää, lähden kahden viikon lomalle Mauritiukselle. Teidän on valitettavasti työskenneltävä keskenään. Kirjoitin tähän sähköpostiin kysymyksiä, joilla pääsette tutkimukseenne eteenpäin. Kirjatkaa tutkimustulokset ylös tähän sähköpostiin.

Laboratoriosta löytyy pienoismalliauto, jota käytätte apuna tutkimuksessanne. Ongelmatilanteissa kääntykää auton mukana tulleen ohjekirjan puoleen. Työskennelkää turvallisesti laboratoriossa, käyttäkää suojalaseja ja työtakkeja!

AURINKOPANEELITUTKIMUS - energiaa aurinkopaneelilla

Hypoteesi:

Havainnot:

Mitkä ovat aurinkopaneelilla toimivan auton hyvät ja huonot puolet. Minkä ratkaisun löydät mahdollisiin ongelmakohtiin? Kirjaa pohdintasi taulukkoon.

Aurinkopaneelien hyödyt	Aurinkopaneelien haitat	Ratkaisut ongelmakohtiin

POLTTOKENNOAUTON TANKKAUS - polttoainetta vedestä elektrolyysillä

Hypoteesi: kumpaa kaasua syntyy elektrolyysissä enemmän: vety- vai happikaasua?

Aika	Vedyn (H ₂) tuotanto (ml)	Aika	Vedyn (H ₂) tuotanto (ml)
20		2:20	
40		2:40	
60		3:00	
1:20		3:20	
1:40		3:40	
2:00		4:00	

Aika	Hapen (O ₂) tuotanto (ml)	Aika	Hapen (O ₂) tuotanto (ml)
20		2:20	
40		2:40	
60		3:00	
1:20		3:20	
1:40		3:40	
2:00		4:00	

Johtopäätökset:

Kumpaa kaasua syntyi enemmän? Miksi näin tapahtui?

Miksi vetyä pidetään tulevaisuuden polttoaineena?

POLTTOKENNOAUTON AJAMINEN – energiaa polttokennosta

Polttokennoauton ajotesti:

Kuinka **kauan** auto ajoi yhdellä tankillisella? _____

Kuinka **monta kierrosta/kuinka pitkään** auto kulki? _____

Johtopäätökset:

Kuinka polttokennoauto saataisiin kulkemaan paremmin?

Miksi polttokennoautoa pidetään tärkeänä keksintönä?

Tässä oli tarvittavat tutkimukset toistaiseksi. Suomen valtionjohto odottaa malttamattomana tutkimustuloksianne. Uskon, että löydätte ratkaisun tulevaisuuden ympäristöystävälliselle ajoneuvolle!!

Ystävällisin terveisin,

Johtajanne

Tulevaisuuden auto

Työn tavoitteet:

- Opitaan tuntemaan polttokennojen kemiaa ja niiden merkitystä energiantuotannolle, ympäristölle ja yhteiskunnalle
- Opitaan tuntemaan vedyn merkitys tulevaisuuden ympäristöystävällisenä polttoaineena

Lähettilää: Suomen valtionjohto

Vastaanottaja: Autoteollisuuden johtajat

Hei,

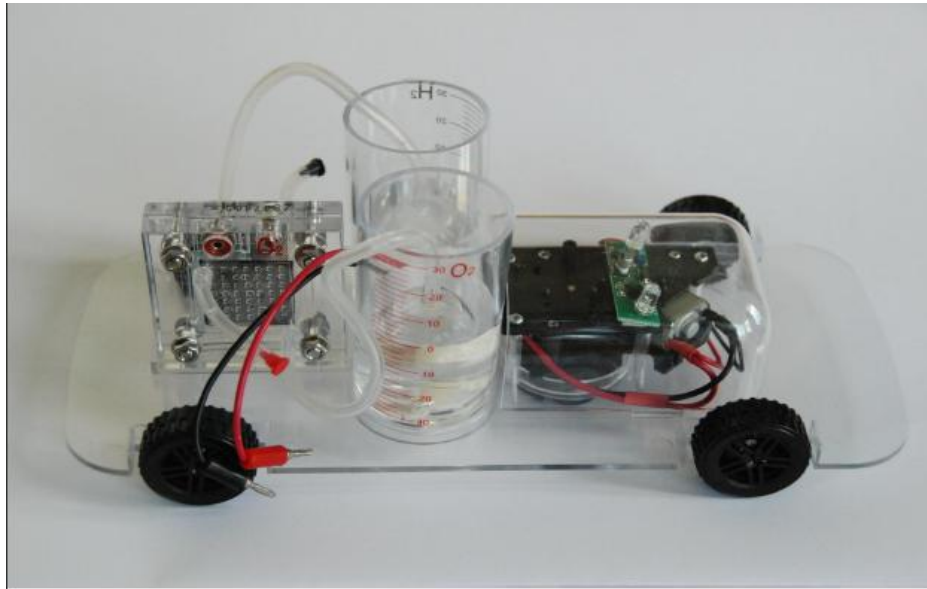
Suomen valtionjohto on keskustellut ympäristöystävällisimmistä liikennejärjestelmistä. Liikenteen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä (CO_2) tulisi vähentää merkittävästi lähivuosina. Tulevaisuudessa tarvitaan autoihin jokin muu energianlähde kuin polttomoottori sekä jokin uusi polttoaine bensiinin tilalle.

Valtionjohto tekee strategiasuunnitelmia ja tarvitsee tutkimustuloksia mahdollisista ratkaisuista liikenteen päästöjen vähentämiseen.

Kerätkää yrityksenne tutkimusyksikkö tutkimaan tulevaisuuden energianlähteitä ja polttoaineita. Pyydämme lähettämään selvitykset tutkimustuloksista mahdollisimman pian.

Ystävällisin terveisin,

Suomen valtionjohto



TULOKSET

AURINKOPANEELITUTKIMUS: Toimiko aurinkopaneeli energian tuottajana autolle?

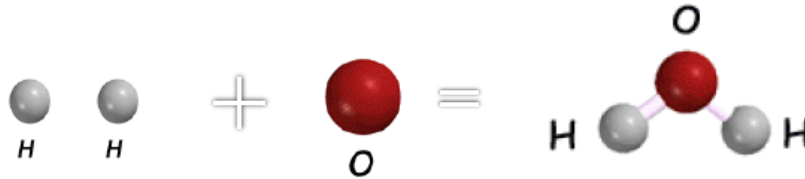
- ▶ Ei.
- ▶ Aurinkopaneelin pinta-ala tulisi olla 360 m² kokoinen, jotta se tuottaisi yksinään riittävästi energiaa henkilöautolle!

Aurinkopaneeli: hyödyt, haitat ja ratkaisut

Hyödyt	Haitat	Ratkaisut
•Ilmaista. •Uusiutuva ja saasteeton energianlähde	•Aurinko ei aina paista. •Aurinkopaneelien hyötysuhde on huono, vain noin 15 %	•Aurinkoenergiaa voidaan varastoida väliaikaiseen varastoon, kuten akkuihin. •Tekniikan kehitystyö: hyötysuhteen parantaminen.

POLTTOKENNOAUTON TANKKAUS

- ▶ Kumpaa syntyi enemmän vety- vai happikaasua? Miksi näin tapahtui?
 - Vetykaasua syntyi kaksi kertaa enemmän kuin happikaasua.
- ▶ Veden kemiallinen kaava:



Miksi vetyä pidetään tulevaisuuden polttoaineena?

- ▶ Vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine.
- ▶ Vety on ympäristöystävällinen polttoaine: palamistuotteena vettä ja lämpöä.
- ▶ Vedyllä on korkein energiatiheys kaikista tunnetuista polttoaineista.

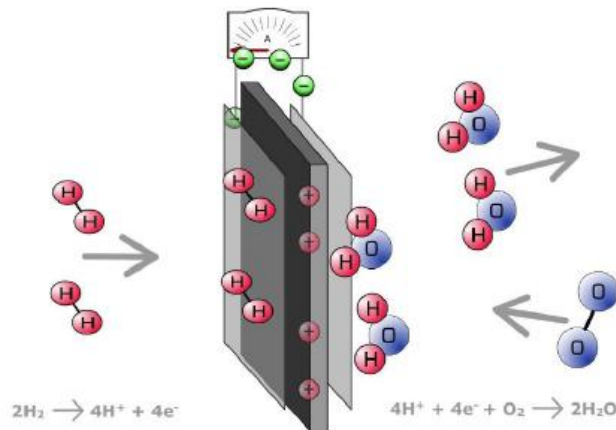
Kuinka polttokennoauto saataisiin kulkemaan kauemmin?

- ▶ Suurempi vetytankki.
- ▶ Enemmän polttokennoja.
 - Kytetään useita kennoja sarjaan kennostoiksi.



Lähde: www.horizonfuelcell.com

Kurkistus polttokennon sisään: kemialliset reaktiot kennossa



Lähde: www.minihydrogen.com

Polttokennoautojen hyödyt

- ▶ Polttokennoauto on saasteeton laite. Se tuottaa reaktiotuotteena vain **vettä ja lämpöä**.
- ▶ Kennossa ei ole liikkuvia osia eli auto toimii **hiljaisesti**.
- ▶ Tehokaita

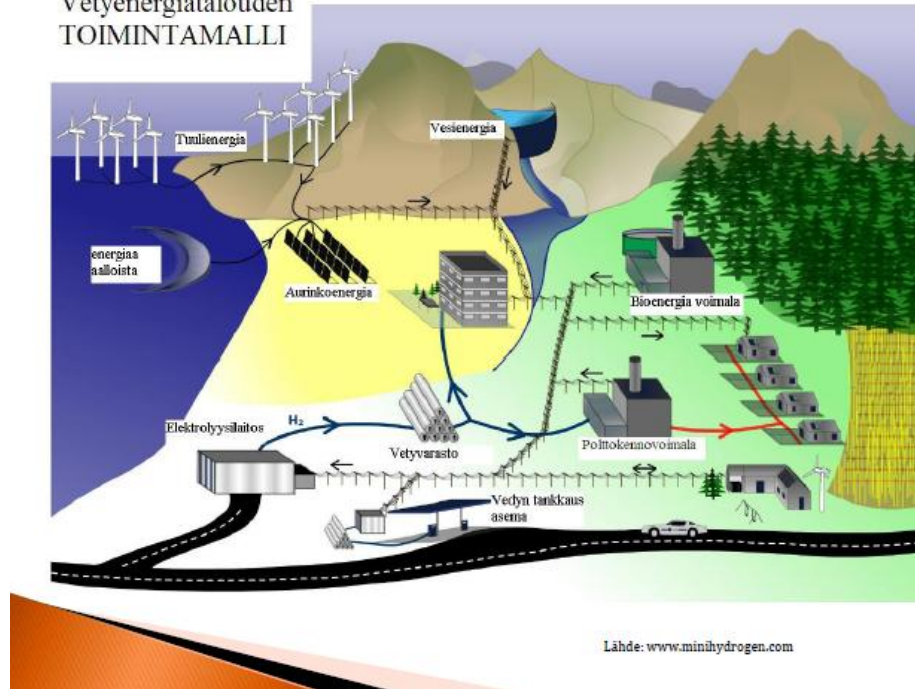


Polttokennoautojen haasteita

- ▶ Polttoaineen varastointi ja jakelujärjestelmä
 - Vety vie kaasuna paljon tilaa
 - Vetytankkausasemia ei ole
- ▶ Kestävyys ja luotettavuus
- ▶ Hintakilpailukykyiseksi
- ▶ Säännökset ja asetukset
- ▶ Käyttäjähyväksyntä
 - Asenteet ja ennakkoluulot



Vetyenergiatalouden TOIMINTAMALLI



[illegible]

III. OPPIMISTEHTÄVIEN SISÄLLÖT

Oppimistehtävien sisällön arvioinnissa käytetään viisiportaista mitta-asteikkoa, jossa 1=välttävä, 2=tyydyttävä, 3=hyvä, 4=kiitettävä ja 5=erinomainen. Perustele vastauksesi ja kirjoita parannusehdotuksia alla oleville viivoille.

1. Arvioi työohjeiden ulkoasua

1 ☐

2 ☐

3 ☐

4 ☐

5 ☐

2. Arvioi ohjekirjan ulkoasua

1 ☐

2 ☐

3 ☐

4 ☐

5 ☐

3. Arvioi työohjeiden selkeyttä

1 ☐

2 ☐

3 ☐

4 ☐

5 ☐

4. Arvioi ohjekirjan selkeyttä

1 ☐

2 ☐

3 ☐

4 ☐

5 ☐

5. Arvioi töiden laajuutta

liian laaja ☐

sopiva ☐

suppea ☐

6. Arvioi töiden kemian vaatimustasoa

vaikea ☐

sopiva ☐

helppo ☐

Perusteluja _____

IV. VAPAA PALAUTE – terveiset tutkijalle

Kiitos vastauksistasi!

Liite 5: Tilastollisten analyysien tulokset

Sukupuoli

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
Mies	72	45,3	45,3
Nainen	87	54,7	100,0
Yhteensä	159	100,0	

Kokeellisen työskentelyn kiinnostavuus

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
en osaa sanoa	8	5,0	5,0
täysin erimieltä	1	,6	5,7
jokseenkin erimieltä	19	11,9	17,6
ei samaa eikä eri mieltä	23	14,5	32,1
jokseenkin samaa mieltä	78	49,1	81,1
täysin samaa mieltä	30	18,9	100,0
Yhteensä	159	100,0	

Kemian kiinnostavuus

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
en osaa sanoa	6	3,8	3,8
täysin erimieltä	14	8,8	12,7
jokseenkin erimieltä	35	22,0	35,0
ei samaa eikä eri mieltä	44	27,7	63,1
jokseenkin samaa mieltä	48	30,2	93,6
täysin samaa mieltä	10	6,3	100,0
Yhteensä	157	98,7	

Aurinkopaneelin toiminnan tutkiminen

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
en osaa sanoa	14	8,8	8,8
ei lainkaan kiinnostava	16	10,1	18,9
vähän kiinnostava	41	25,8	44,7
Neutraali	58	36,5	81,1
jokseenkin kiinnostava	24	15,1	96,2
erittäin kiinnostava	6	3,8	100,0
Yhteensä	159	100,0	

Polttokennoauton rakentaminen

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
en osaa sanoa	5	3,1	3,1
ei lainkaan kiinnostava	6	3,8	6,9
vähän kiinnostava	16	10,1	17,0
Neutraali	34	21,4	38,4
jokseenkin kiinnostava	63	39,6	78,0
erittäin kiinnostava	35	22,0	100,0
Yhteensä	159	100,0	

Polttokennoauton tankkaaminen vedyllä

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
en osaa sanoa	7	4,4	4,4
ei lainkaan kiinnostava	10	6,3	10,8
vähän kiinnostava	24	15,1	25,9
Neutraali	43	27,0	53,2
jokseenkin kiinnostava	56	35,2	88,6
erittäin kiinnostava	18	11,3	100,0
Yhteensä	158	99,4	

Polttokennoauton ajaminen

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
en osaa sanoa	4	2,5	2,6
ei lainkaan kiinnostava	6	3,8	6,4
vähän kiinnostava	9	5,7	12,2
Neutraali	24	15,1	27,6
jokseenkin kiinnostava	55	34,6	62,8
erittäin kiinnostava	58	36,5	100,0
Yhteensä	156	98,1	

Tulosten kirjaaminen

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
en osaa sanoa	12	7,5	7,5
ei lainkaan kiinnostava	36	22,6	30,2
vähän kiinnostava	46	28,9	59,1
Neutraali	43	27,0	86,2
jokseenkin kiinnostava	18	11,3	97,5
erittäin kiinnostava	4	2,5	100,0
Yhteensä	159	100,0	

Pohdintakysymyksiin vastaaminen

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
en osaa sanoa	15	9,4	9,4
ei lainkaan kiinnostava	26	16,4	25,8
vähän kiinnostava	41	25,8	51,6
Neutraali	58	36,5	88,1
jokseenkin kiinnostava	16	10,1	98,1
erittäin kiinnostava	3	1,9	100,0
Yhteensä	159	100,0	

Vetyenergiatalous

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
en osaa sanoa	17	10,7	10,8
ei lainkaan kiinnostava	15	9,4	20,3
vähän kiinnostava	35	22,0	42,4
Neutraali	51	32,1	74,7
jokseenkin kiinnostava	31	19,5	94,3
erittäin kiinnostava	9	5,7	100,0
Yhteensä	158	99,4	

Polttokennot ja sen sovellukset

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
en osaa sanoa	13	8,2	8,3
ei lainkaan kiinnostava	17	10,7	19,1
vähän kiinnostava	31	19,5	38,9
Neutraali	47	29,6	68,8
jokseenkin kiinnostava	43	27,0	96,2
erittäin kiinnostava	6	3,8	100,0
Yhteensä	157	98,7	

Aiheen ajankohtaisuus

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
en osaa sanoa	14	8,8	8,9
ei lainkaan kiinnostava	15	9,4	18,4
vähän kiinnostava	28	17,6	36,1
Neutraali	46	28,9	65,2
jokseenkin kiinnostava	41	25,8	91,1
erittäin kiinnostava	14	8,8	100,0
Yhteensä	158	99,4	

Työohjeiden ulkoasu

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
välttävä	4	2,5	2,5
tyydyttävä	17	10,7	13,2
hyvä	52	32,7	45,9
kiitettävä	60	37,7	83,6
erinomainen	26	16,4	100,0
Yhteensä	159	100,0	

Ohjekirjan ulkoasu

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
välttävä	3	1,9	1,9
tyydyttävä	16	10,1	11,9
hyvä	59	37,1	49,1
kiitettävä	56	35,2	84,3
erinomainen	25	15,7	100,0
Yhteensä	159	100,0	

Työohjeiden selkeys

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
välttävä	3	1,9	1,9
tyydyttävä	14	8,8	10,7
hyvä	51	32,1	42,8
kiitettävä	57	35,8	78,6
erinomainen	34	21,4	100,0
Yhteensä	159	100,0	

Ohjekirjan selkeys

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
Välttävä	2	1,3	1,3
Tyydyttävä	13	8,2	9,4
Hyvä	45	28,3	37,7
Kiitettävä	66	41,5	79,2
Erinomainen	33	20,8	100,0
Yhteensä	159	100,0	

Töiden laajuus

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
liian laaja	2	1,3	1,3
sopiva	151	95,0	96,2
suppea	6	3,8	100,0
Yhteensä	159	100,0	

Kemian vaatimustaso

	Frekvenssi	Prosenttiosuus	Kumulatiivinen prosenttiosuus
vaikea	6	3,8	3,8
sopiva	131	82,4	86,7
helppo	21	13,2	100,0
Yhteensä	158	99,4	

Kysylylomakkeessa kysytyt asia (keskiarvot, keskihajonnat ja varianssit).

	N	Keskiarvo	Keskihajonta	Varianssi
Kokeellisen työskentelyn kiinnostavuus	151	3,7748	,93218	,869
Kemian kiinnostavuus	151	3,0331	1,09189	1,192
Aurinkopaneelin toiminnan tutkiminen	145	2,7448	,99847	,997
Polttokennoauton rakentaminen	154	3,6818	1,05845	1,120
Polttokennoauton tankkaaminen vedyllä	151	3,3179	1,08549	1,178
Polttokennoauton ajaminen	152	3,9868	1,06719	1,139
Tulosten kirjaaminen	147	2,3741	1,06765	1,140
Pohdintakysymyksiin vastaaminen	144	2,5069	,98234	,965
Vetyenergiatalous	141	2,8865	1,06966	1,144
Polttokennot ja sen sovellukset	144	2,9306	1,07517	1,156
Aiheen ajankohtaisuus	144	3,0764	1,13483	1,288
Työohjeiden ulkoasu	159	3,5472	,97239	,946
Ohjekirjan ulkoasu	159	3,5283	,94005	,884
Työohjeiden selkeys	159	3,6604	,97325	,947
Ohjekirjan selkeys	159	3,7233	,92717	,860
Töiden laajuus	159	2,0252	,22360	,050
Kemian vaatimustaso	158	2,0949	,40361	,163

Kyselylomakkeessa kysytyt asiat analysoitu sukupuolen mukaan.

	Sukupuoli	N	Keskiarvo	Keskihajonta
Kokeellisen työskentelyn kiinnostavuus	Mies	69	3,7971	,90065
	Nainen	82	3,7561	,96303
Kemian kiinnostavuus	Mies	69	3,1304	1,04196
	Nainen	82	2,9512	1,13205
Aurinkopaneelin toiminnan tutkiminen	Mies	66	2,8030	1,04100
	Nainen	79	2,6962	,96549
Polttokennoauton rakentaminen	Mies	69	3,7101	1,05860
	Nainen	85	3,6588	1,06405
Polttokennoauton tankkaaminen vedyllä	Mies	69	3,2754	,96838
	Nainen	82	3,3537	1,17979
Polttokennoauton ajaminen	Mies	68	3,9265	1,05542
	Nainen	84	4,0357	1,08046
Tulosten kirjaaminen	Mies	67	2,1642	1,00901
	Nainen	80	2,5500	1,08965
Pohdintakysymyksiin vastaaminen	Mies	66	2,3636	,88815
	Nainen	78	2,6282	1,04582
Vetyenergiatalous	Mies	64	2,7969	1,02632
	Nainen	77	2,9610	1,10551
Polttokennot ja sen sovellukset	Mies	68	3,1471	1,02600
	Nainen	76	2,7368	1,08773
Aiheen ajankohtaisuus	Mies	66	2,8939	,99427
	Nainen	78	3,2308	1,22658

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
		Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower
aurinkopaneelin toiminnan tutkiminen	Equal variances assumed	,086	,770	,640	143	,523	,10683	,16685	-,22298	,43664
	Equal variances not assumed			,636	134,225	,526	,10683	,16799	-,22541	,43907
polttokennoauton rakentaminen	Equal variances assumed	,253	,616	,298	152	,766	,05132	,17203	-,28855	,39119
	Equal variances not assumed			,298	145,858	,766	,05132	,17193	-,28848	,39112
polttokennoauton tankkaaminen vedyllä	Equal variances assumed	5,077	,026	-,440	149	,660	-,07830	,17781	-,42965	,27305
	Equal variances not assumed			-,448	148,917	,655	-,07830	,17483	-,42376	,26717
polttokennoauton ajaminen	Equal variances assumed	1,076	,301	-,626	150	,532	-,10924	,17444	-,45392	,23543
	Equal variances not assumed			-,628	144,785	,531	-,10924	,17401	-,45317	,23468
tulosten kirjaaminen	Equal variances assumed	,977	,325	-2,211	145	,029	-,38582	,17450	-,73071	-,04093
	Equal variances not assumed			-2,226	143,512	,028	-,38582	,17331	-,72840	-,04325
pohdintakysymyksiin vastaaminen	Equal variances assumed	1,222	,271	-1,619	142	,108	-,26457	,16337	-,58752	,05838
	Equal variances not assumed			-1,642	141,997	,103	-,26457	,16116	-,58316	,05402
vetyenergiatalous	Equal variances assumed	,391	,533	-,907	139	,366	-,16416	,18105	-,52213	,19380
	Equal variances not assumed			-,913	137,274	,363	-,16416	,17981	-,51971	,19138
polttokennot ja sen sovellukset	Equal variances assumed	1,817	,180	2,320	142	,022	,41022	,17678	,06075	,75968
	Equal variances not assumed			2,328	141,593	,021	,41022	,17621	,06188	,75855
aiheen ajankohtaisuus	Equal variances assumed	7,254	,008	-1,788	142	,076	-,33683	,18836	-,70917	,03551
	Equal variances not assumed			-1,820	141,757	,071	-,33683	,18511	-,70277	,02911

Liite 6: Kyselylomakkeen avointen kysymysten vastaukset

- 6: "Töitä oli ihan sopivasti!"
- 11: "en ole oikeen kiinnostunut aiheesta."
- 19: "Hyvätyö oli"
- 20: "Eipä tässä mitään."
- 24: "No comments..."
- 25: "Juu Juu."
- 26: "Työ oli helppo tehdä koska oli hyvät ohjeet."
- 27: "Kiva tunti oli"
- 28: "Näin on"
- 29: "Ihan rento oli"
- 30: "Ei ollu mitenkään vaikeeta ja oli ihan kiinnostavaa"
- 31: "Kiinnostava ja hyvin selkeä"
- 32: "Ohjeet olivat tarpeeksi hyvät ja työ oli sopivan helppo."
- 33: "Oli todella mukava tunti, ystävällistä porukkaa ☺"
- 34: "Pienemmälle lapselle ehkä haastavampi, mutta hyvää ajan viettoa."
- 37: "Kiva tunti"
- 38: "Ohjeet oli selkeät, joten työ oli helppo ja aika kiva."
- 40: "Hyvä, kiva li tehdä jotain erilaista kuin normaalisti"
- 48: "Mukavaa oli. ☺"
- 49: "Oli kivaa ja mukava ja gur nau ☺!"
- 51: "Ihan ok. Oli mukavampi kuin normaali tunti."
- 52: "Ihan ok"
- 62: "Emt ei ole"
- 63: "Ei ole."
- 64: "Emt"
- 66: "Työ oli vaikea siksi, koska koulussa emme tee vastaavanlaisia kokeita. Koe oli vaikea, mutta KIINNOTAVA."
- 69: "Ei paha"
- 70: "Vähän enemmän kuviahan olisi voinut olla... mutta niin on."
- 71: "Näin on"
- 72: "Ei mulla oo mitään perusteltavaa...?"
- 73: "Helppo lukea ja selkeät vastaustaulukot"
- 74: "Ihan oli helppo lukea ohjeita."
- 79: "Ei ole perusteluja"
- 81: "Hyvä. Oli kiva tunti."
- 82: "Vety polttoaineena ei ole tylsä aihe vaan jokseenkin kiinnostava"
- 85: "Työ oli helppo, kun oli hyvät ohjeet."
- 86: "Työ sujui hyvin, koska hyvät ohjeet ym."
- 87: "Työ onnistui hyvin, mutta ohjekuvissa olisi voinut olla selkeyttä enemmän."
- 88: "Ei muuta hihhi..."
- 90: "moi ☺"
- 91: "No nii se oli iha kivaa, mut kivat ko meil meni vaa yks min mut muil enemmän IoIZ"
- 97: "Emt"

98: "Emt"
 99: "ku oli ne ohjeet ni se ei ollu kovin vaikeeta"
 101: "ohjeet oli selvät"
 102: "oli hauskaa rakentaa toimiva auto vedystä ja ohjeet olivat helppolukuiset"
 104: "ohjekirjan ja työohjeiden ulkoasu oli tavallinen eli selkeä ja hyvin toteutettu."
 107: "En tiedä"
 108: "Sai tarpeesi neuvoja ohjaajilta, se oli kiva"
 109: "Ohjeet olivat selkeitä ja saimme tarvittaessa neuvoja."
 110: "ohjeet selkeitä, tarvittaessa saimme neuvoja ohjaajilta"
 112: "En osaa perustella edellä mainittuja asioita."
 119: "Ohjeet olivat selkeitä ja töitä ei ollut liian vaikeaa tehdä."
 120: "Oheet oli tosi selkeät ja ne ymmärs hyvin"
 125: "En osaa perustella"
 126: "Ohjeet oli ymmärrettävät"
 128: "Ei ollut liian vaikea tehdä ja ohjeet ymmärrettiin"
 129: "Ohjeet olivat aika selkeät ja laajuus sopivan helppo."
 130: "Auton rakentaminen oli melko helppoa ja oli mukavaa katsella auton kulkua"
 131: "Ohjeista sai selvää helposti ja oli helppoja tehdä."
 132: " Ohjekirjasta ymmärsi hyvin, että mitä pitää tehdä."
 133: "Ohjeet olivat helppoja luettavaksi"
 134: "Ohjeet olivat tarpeeksi selkeät seurattavaksi"
 135: "Ei ollut lainkaan ongelmia"
 139: "hihihi"
 141: "Ei perusteluja"
 145: "Ei ollut liian helppo muttei myöskään liian vaikea. Kiva tehtävä!"
 146: "Ihan hyvä, kivempaa kuin normaalilla oppitunnilla"
 147: "Ihan kiva oli"
 152: "Pidempi ajoaika olisi hyvä"
 153: "Kaikki oli hyvää ja ymmärrettävissä"
 158: "No kaikki osasi tehdä työn."

Vapaa palaute

1: "Hyvät tehtävät."
 2: "moi"
 3: "Tunti kului mukavasti"
 4: "Tunti kului mukavasti"
 6: "Kivempaa oli, kun normaali kemia 8 luokalla..."
 9: "Terve ☺"
 17: "Hyviä tutkimuksia! ☺"
 18: "Oli kivaa ☺"
 20: "Kiitos kivasta tunnista! ☺"
 21: "Olitte kivoja ☺"
 28: "moro moro"
 30: "Kiva paja oli ☺ Onnea ja menestyst- ^^"
 31: "Hyvin kerrottu ja hyvin kiinnostava ja selkeää. Oli kiinnostavaa. Kiitoksia tunnista."

34: "OK. Hyvin menee. ☺ Hiljaisuus erinomainen. Varastoinnissa on parannettavaa."

38: "Oli mielenkiintoista."

39: "Kivaa oli."

47: "Ihan kivaa ☺"

48: "Oli kivaa ☺"

49: "Oli kivaa!"

52: "Oli ihan kiva tunti"

53: "Oli mielenkiintoisaa ja hauskaa ja katotaan mitä tulevaisuudella tapahtuu bensiinin sijaan jne"

54: "Hyvää opetusta! ☺ kiinnostava työ oli! Kiitos! ~~"

58: "Oli ihan kiva tunti"

59: "Oli kivaa ja olet todella KIVA ☺"

60: "Olet kiva ja oli mukavaa ☺"

64: "palautteet on jänniä"

66: "Kiitos ☺"

67: "Wazzuuu"

68: "Terve"

69: "Moro!"

70: "Oikein kivaa oli! Kiitos!"

71: "Ihan kivaa matskuu tällä tunnilla"

72: "Kiva kun kävitte. Ei tarvinnu tehdä tylsiä tehtäviä"

73: "Kivaa oli!"

74: "Oli hauska työ ☺"

80: "Oli mukava tunti"

81: "Oli kiva tunti"

83: "Oli hyvää vaihtelua kemiantunneille"

84: "Kiva kemian tunti. Vähän erilainen kuin yleensä."

88: "hihi kek kek"

90: "Hehhee ☺"

92: "Terve vaan! Lykkyä tykö"

97: "emt"

98: "emt"

99: "no jaa ☺"

101: " Oli kivaa"

108: "Oli hauskaa ☺"

109: "Hauskaa oli"

110: "loiset ohjaajat! ☺"

129: "Oli hauskaa!!! Vois kokeilla toistekki."

131: "Oli ihan kiinnostava tunti"

138: "Hauskaa oli ☺ Kiitos. Thanks. Gracias. Tack. Grazi"

139: "Oli tosi kiva tunti ☺ Kiitos"

140: "moi ☺"

141: "Onnea"

142: "Oli tosi kiva tehdä tätä!"

145: "Kivaa oli ☺"

146: "Olet viisas, mä en tajuu mitään kemiasta."

147: "Kivaa vaihtelua ja ihan mielenkiintoista ja ajankohtaista"