

KATALYYSI LUKION KEMIAN OPETUKSESSA

Pro gradu- tutkielma

Jyväskylän yliopisto

Kemian laitos

17.6.2019

Henna Kleemola

Tiivistelmä

Tässä pro gradu- tutkielmassa tarkoituksena oli selvittää, miten katalyyssi ja katalyytit ovat esillä lukion uudessa opetussuunnitelmassa sekä uudistetussa oppimateriaalissa. Lisäksi analysoitiin Opetus.tv:n materiaali sekä tutkittiin, millaisia kysymyksiä katalyyseistä ja katalyyteistä ylioppilaskirjoituksissa on esitetty vuosina 2008-2018. Opetussuunnitelman ja oppimateriaalien analysoinnissa käytettiin aineistolähtöistä sisällönanalyysiä ja oppimateriaalin kehittämiseen kehittämistutkimusta.

Sisällönanalyysin mukaan katalyyssi sisältyy sekä opetussuunnitelman yleisiin oppimistavoitteisiin, että kemian oppimistavoitteisiin. Sen sijaan analyysiin valittu oppimateriaali ei käsittele katalyysejä yksittäisiä mainintoja lukuun ottamatta. Katalyytit olivat esillä sekä opetussuunnitelmassa että analysoiduissa oppimateriaaleissa. Mooli-sarjan kirjoissa katalyyteistä kerrotaan määritelmä ja että siirtymämetallit ovat hyviä ja tärkeitä teollisuuden katalyyttejä. Opetus.tv:ssä esitetään katalyyteistä vain määritelmä. Oppimateriaalit eivät esittele katalyyttien ominaisuuksia tai metallien lisäksi muita katalyytteinä käytettäviä materiaaleja. Ylioppilaskirjoitusten katsaus vuosille 2008-2018 osoitti, että katalyyseistä on esitetty ainoastaan kolme kysymystä kymmenen vuoden aikana. Kaikki tehtävät olivat jokeritehtäviä ja liittyivät ammoniakksynteesiin. Katalyyteistä oli esitetty yksi kysymys kymmenen vuoden aikana.

Sisällönanalyysin pohjalta syntyi tarve kehittää sekä katalyyseistä kertovaa materiaalia, että suomalaista katalyytitutkimusta esittelevää materiaalia lukion kemian opetukseen. Lisäksi analyysin perusteella täydennettiin oppimateriaalien tietoja katalyyteistä. Laadittujen materiaalien tarkoituksena on helpottaa katalyyseihin sisällyttämistä osaksi lukion kemian opetusta ja kertoa yhteiskunnan, ympäristön sekä talouden kannalta merkittävästä ilmiöstä. Materiaalien tarkoituksena on myös innostaa hakeutumaan kemianteollisuuden opintoihin, koska tulevaisuudessa alalla tarvitaan osaajia.

Esipuhe

Aloittaessani tämän pro gradu- tutkielman tekemistä, oli katalyysi minulle kohtalaisen vieras ilmiö. Päätin ottaa aiheen vastaan, koska sain mahdollisuuden tutustua ilmiöön, johon en opintojeni aikana ollut törmännyt. Motivaattorina aiheen valinnassa toimi myös ohjaajan vinkki aiheen liittyvän lukion kemian syventäville kursseille. Tutkielman tekemisen ohessa sain siis samalla mahdollisuuden tutustua syventävien kurssien sisältöihin, joista opetusharjoittelun aikana ei ehtinyt muodostua kokonaiskuvaa. Aiheen sain ohjaajaltani professori Jan Lundellilta.

Tutkielman kokeellisessa osassa laadittiin katalyysistä kertovaa oppimateriaalia lukion kemian opetukseen helpottamaan katalyysin sisällyttämistä osaksi kemian opintoja sekä innostamaan opiskelijoita hakeutumaan kemianteollisuuden opintoihin. Pyyntö materiaalin tuottamiseen tuli Suomen Katalyysiseuran hallitukselta, jossa ollaan huolestuneita alan opiskelijoiden vähydestä. Tutkielman tiedonhakuun käytettiin ensisijaisesti tietokantoja ERIC ja JYKDOK, hakupalvelu Google Scholaria sekä Googlea. Tutkielma tehtiin Jyväskylän yliopiston kemian laitoksen opettajankoulutuslinjalle vuosien 2017-2019 aikana.

Tämän tutkielman aihe oli todella mielenkiintoinen ja kiitän ohjaajiani Jan Lundellia ja Karoliina Honkalaa aiheen tarjoamista tutkielmani aiheeksi. Kiitokset myös materiaaleista sekä ohjauksesta liittyen tutkielman sisältöön. Katalyysiseuran hallituksen yhteistyökumppanit Neste Oy ja Dinex Finland Oy sekä yliopistojen tutkimusryhmät Jyväskylän, Itä-Suomen ja Oulun yliopistoista, Aalto-yliopistosta, Åbo Akademiasta sekä Teknologian tutkimuskeskus VTT:ltä osallistuivat oppimateriaalin tuottamiseen ja heille erityiskiitokset siitä. Oppimateriaaliin saatiin hyviä esimerkkejä katalyysin sovelluksista ja suomalaisista katalyysitutkimuksista.

Tutkielman tekeminen työnohessa oli aikataulullisesti pitkä ja haastava prosessi, joten kiitän ohjaajiani kärsivällisyydestä. Suuret kiitokset myös rakkaimmilleni, perheelleni ja ystävilleni, ymmärryksestä, tuesta ja kannustuksesta.

Jyväskylässä 17.6.2019

Henna Kleemola

1 JOHDANTO	1
2 KATALYYSIN HISTORIA	2
3 KATALYYSI ILMIÖNÄ	3
3.1. Katalyydin yleiset periaatteet.....	4
3.2. Katalyyttinen kierto	5
3.3. Katalyyssityypit	6
3.3.1. Homogeeninen katalyyssi	6
3.3.2 Heterogeeninen katalyyssi.....	7
3.3.3. Biokatalyyssi	7
4 KATALYYSI YHTEISKUNNASSA	7
5 KATALYTTI	8
5.1. Homogeeninen katalyytti	8
5.2. Heterogeeninen katalyytti.....	8
5.3. Katalyytin tärkeitä ominaisuuksia	9
5.3.1. Aktiivisuus.....	9
5.3.2 Valikoituvuus.....	9
5.3.3 Uusiokäyttö.....	10
5.4. Erilaisia katalyyttejä	11
5.5. Kantaja.....	11
6 KEMIAN OPPIMINEN	12
6.1. Metakognitiiviset taidot.....	12
6.2. Bloomin taksonomia.....	13
6.3. Metakognitiiviset taidot kemian oppimisessa	15
6.4. Johnstonen kolmitasomalli	15
6.5. Mahaffyn nelitasomalli.....	17
7 KONTEKSTISIDONNAINEN OPETUS JA OPPIMINEN	18
7.1. Kontekstisidonnaisen oppimisen historia.....	19
7.2. Kontekstisidonnaisen oppimisen vaikutus kemian oppimiseen	20
8 TUTKIMUKSELLIN OPETUS JA OPPIMINEN	21
9 KATALYYSIN OPETUS	22
10 TUTKIMUKSEN TARKOITUS JA TUTKIMUSKYSYMYKSET	24
11 TUTKIMUSMENETELMÄT	24
11.1. Laadullinen tutkimus	24
11.2. Sisällönanalyysi.....	25

11.2.1. Aineistolähtöinen sisällönanalyysi	26
11.3. Laadullisen tutkimuksen luotettavuus	26
11.4. Laadullisen tutkimuksen eettisyys.....	29
11.5. Kehittämistutkimus	30
11.5.1 Kehittämistutkimuksen toteuttaminen	31
11.5.2. Kehittämistutkimuksen raportointi	32
11.5.3. Kehittämistutkimuksen luotettavuus	32
12 TUTKIMUSAINEISTO	34
13 LUKION OPETUSSUUNNITELMAN PERUSTEET.....	35
13.1. Katalyyysi ja katalyytit lukion uudessa opetussuunnitelmassa.....	37
13.1.1. Kemiaa kaikkialla	37
13.1.2. Ihmisen ja elinympäristön kemiaa	37
13.1.3. Reaktiot ja energia	38
13.1.4. Materiaalit ja teknologia	39
13.1.5. Reaktiot ja tasapaino.....	39
14 KATALYYSI JA KATALYYTIT OPPIMATERIAALEISSA.....	40
14.1. Mooli 3	40
14.2. Mooli 4	41
14.3. Mooli 5	42
14.4. Opetus.tv.....	44
14.5. Kemian ylioppilaskirjoitukset 2008-2018.....	45
14.6. Yhteenveto sisällönanalyysistä.....	47
15 OPPIMATERIAALIN KEHITTÄMINEN	50
15.1. Ongelma-analyysi.....	50
15.2. Kehittämissuunnitelma.....	51
15.3. Kehittämisprosessi.....	51
15.4. Kehittämistuotokset.....	52
16 TUTKIMUKSEN EETTISYYS JA LUOTETTAVUUS.....	52
17 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	54
17.1. Jatkotutkimukset.....	59
18 KIRJALLISUUS	60
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Katalyyysi on ilmiö, jossa kemiallista reaktiota nopeutetaan katalyytillä, aineella, joka osallistuu reaktioon siinä itse kulumatta tai muuttumatta. Katalyytin avulla reaktion aktivoitumisenergia pienenee ja siten katalyytti tarjoaa reaktiolle energeettisesti suotuisamman reitin.¹ Katalyyttien avulla useat teollisuuden prosessit tapahtuvat matalammassa lämpötilassa ja paineessa kuin ilman katalyyttiä, joten katalyyysiä hyödyntämällä prosessit saadaan taloudellisemmiksi ja vähemmän energiaa kuluttaviksi.²

Katalyyysillä on merkittävä rooli kemianteollisuuden prosesseissa, koska valtaosa, noin 90% hyödyntää katalyyysiä.^{3,4,5} Katalyyysiä hyödyntävä kemianteollisuus jakautuu kolmeen ryhmään: öljynjalostus, vihreä kemia sekä kemikaalien tuotanto. Suurin sektori on öljynjalostus, joka hyödyntää katalyyysiä polttoaineiden valmistamiseen.⁶ Vihreä kemian sektorilla tavoitteena on vähentää ja eliminoida ympäristölle haitallisten aineiden käyttöä ja syntymistä niin suunnittelussa, tuotannossa kuin sovelluksissakin.⁷ Kemianteollisuus edustaa noin viidesosaa Suomen viennistä, joten katalyyysi on myös Suomen talouden kannalta merkityksellinen ilmiö.⁸

Tulevaisuudessa katalyyysin odotetaan tuovan ratkaisuja esimerkiksi ilmastonmuutoksen torjumisessa ja kestävien ja ympäristöystävällisten materiaalien valmistuksessa. Ilmastonmuutos sekä raaka-aineiden ehtyminen pakottavat vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä sekä tulevaisuudessa myös luopumaan niiden käytöstä, jonka vuoksi biomassojen ja kierrätysmateriaalien jalostus polttoaineiksi ja uusiksi materiaaleiksi tulevat olemaan kemianteollisuuden lähitulevaisuuden keskeisimmät tavoitteet.⁶ Yhteiskunnan muokkaaminen kohti kestäväää kehitystä on mahdollista kiertotalouden kehittämisen ja toteuttamisen avulla. Kemia tarjoaa kiertotalouden kehittämiseen molekyylytason osaamista⁹ ja myös näissä prosesseissa tullaan hyödyntämään katalyyysiä. Näin ollen katalyyysi on äärimmäisen merkittävä ilmiö maailmantaloudelle, ympäristölle ja ihmiskunnalle.⁶

Edellä mainittujen syiden perusteella yhteiskunta tarvitsee kemian ja katalyyysin osaajia. PISA 2015-tutkimuksessa suomalaisnuorten kiinnostus kemiaa ja muita luonnontieteitä kohtaan on kuitenkin todettu vähäiseksi. Samoin suomalaisten nuorten motivaation ja arvostuksen luonnontieteitä kohtaan todettiin olevan heikompaa kuin muiden tutkimukseen osallistuvien maiden nuorten keskuudessa.

Seurauksena on, että kemian ja muiden luonnontieteiden alalle hakeutuu yhä vähemmän motivoituneita opiskelijoita.¹⁰ Siten kemian ja muiden luonnontieteiden opetuksessa on olennaista kiinnittää huomiota laadukkaaseen, innostavaan ja motivoivaan opetukseen.¹¹ Kemian opetuksessa on myös syytä huomioida, että opiskelijan, joka on kiinnostunut urasta kemianteollisuudessa tai kemian alan tuotekehityksessä, pitäisi olla tietoinen millainen ilmiö katalyyysi on.²

2 KATALYYSIN HISTORIA

Ihmiskunta hyödynsi katalyysejä tietämättään jo kauan ennen katalyytin varsinaista keksimistä muun muassa oluen ja viinin valmistuksessa.^{3,12} Varhainen katalyyzin historia ulottuu alkemian aikakaudelta aina vuoteen 1834. Tuona aikana ymmärrys kemiallisista reaktioista perustui pääosin kokeellisuuteen ja kemistit työskentelivät itsenäisesti tietämättä toistensa kokeista.¹² Ensimmäinen virallinen katalyyzin määritelmä syntyi 1835 ruotsalaisen kemistin Jöns Jacob Berzeliuksen ideoimana. Myöhemmin saksalainen Wilhelm Ostwald määritteli katalyyzin vuonna 1895 kemiallisen reaktion kiihdyttämiseksi aineella, joka ei kulu reaktiossa. Ostwald sai keksinnöstään Nobelin palkinnon 1909.⁴

Katalyyssi nähtiin aluksi tieteenä, joka oli syntynyt yksilöiden luomana ja akateeminen maailma yritti saada perusteellisen ymmärryksen katalyyssi-reaktiosta.³ Tiedemiehet tavoittelivat katalyyzin perusteellista ymmärtämistä 1800-luvun lopulta lähtien ensin itsenäisesti ja myöhemmin muodostaen tutkimusryhmiä. Lopulta tutkimukset johtivat katalyyysiin perustuvan kemianteollisuuden syntymiseen. Rikkihappoa oli mahdollista valmistaa katalyyttisesti huomattavia määriä vuodesta 1898 alkaen.¹³ 1900-luvun alussa käynnistyi myös typpihapon sekä ammoniakkin teollinen valmistus. Näiden kemikaalien kulutus oli määrällisesti suurta, koska maatalouden lannoiteteollisuuteen tarvittiin isoja määriä ammoniakkia ja rikki- ja typpihappoja räjähteisiin ensimmäisen maailmansodan aikaan.³

Ammoniakin katalyyttisen synteysin keksimistä vuonna 1908 pidetään 1900-luvun mullistavimpana keksintönä. Fritz Haber keksi menetelmän, jonka avulla ammoniakki voidaan syntetisoida alkuaineistaan typestä ja vedystä raudan toimiessa katalyyttinä. Carl Bosch jatkoi Haberin työtä kehittämällä menetelmän teolliselle tuotannolle sopivaksi ja reaktio tunnetaankin nykyisin Haber-Boschin reaktiona. Reaktion avulla saatiin tuotettua huomattavia määriä ammoniakkia maatalouden lannoitteita varten, joka taas sai aikaan dramaattisen maatalouden tuottavuuden nousemisen ympäri

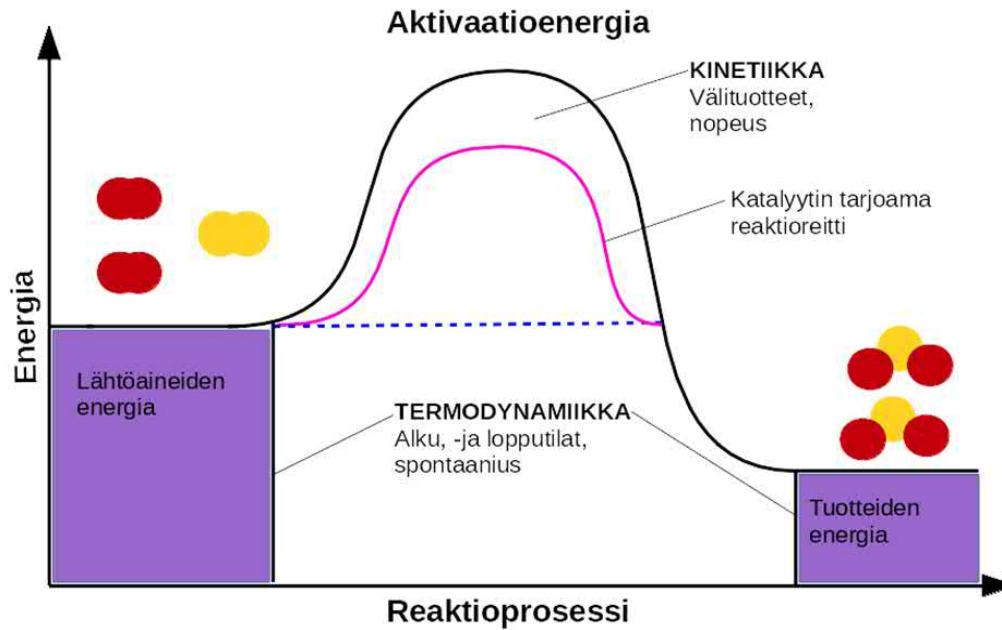
maailman. Valtava kasvava ruoan tuotannon tarve saatiin ratkaistua ja lähes miljardille ihmiselle oli mahdollista ruokkia Haber-Boschin reaktion ansiosta.¹⁴

Petrokemianteollisuuden syntyminen ajoittuu ensimmäisen ja toisen maailmansodan väliseen ajanjaksoon. Tuona aikana keksittiin useita merkittäviä katalyysireaktioita. Franz Fischer ja Hans Tropsch keksivät hiilivetyjen synteessin hiilimonoksidista ja vedystä ja Eugene Houdry kehitti maaöljyn katalyyttisen pilkkomisen.¹³ Petrokemian kehittämisellä oli tärkeä merkitys ihmisten elämänlaadun parantumiselle, kun yhteiskuntaan saatiin muun muassa muovituotteita ja farmaseuttisia valmisteita.³ Toisen maailmansodan jälkeen räjähdeteollisuuteen ei tarvittu enää valtavia määriä rikki- ja typpihappoa ja samaan aikaan Euroopassa alkoi räjähdysmäinen autoteollisuus, joten petrokemianteollisuus näytteli tärkeää roolia sodan jälkeisessä Euroopassa.¹³

Osa teollisuusyrityksistä rakensi tutkimuslaboratorioita 1940-1970-luvuilla tutkiakseen uusia kemikaaleja. Samaan aikaan hallitukset tukivat akateemisten tutkimuslaboratorioiden perustamista ja valtion laboratoriot kokosivat yhteen akateemisen ja teollisen katalyysitutkimuksen jäseniä 1970-luvulta lähtien. Ensimmäinen kansainvälinen katalyysikongressi pidettiin Philadelphiassa vuonna 1950 ja lisäksi kaksi alan lehteä alkoi ilmestyä, Journal of Catalysis (1962) sekä Catalysis Review (1967). Maantieteellisesti tarkasteltuna katalyysin tutkimus ja teollisuus alkoivat Euroopasta ja siirtyivät USA:n kautta Aasian ja Tyynenmeren alueelle.³

3 KATALYYSI ILMIÖNÄ

Ilmiöitä, jossa kemiallista reaktiota nopeutetaan pienellä määrällä ainetta, joka ei ole reaktion raaka-aine, kutsutaan katalyysiksi.⁴ Kyseessä on tapahtuma, jossa katalyytti nopeuttaa kemiallista reaktiota muodostamalla sidoksia reagoivien aineiden kanssa tarjoten niille energeettisesti suotuisamman reitin reagoida tuotteiksi. Katalyytti ei kykene vaikuttamaan reaktion termodynaamiseen tasapainoon eli reaktiossa vapautuvan tai sitoutuvan energian sekä syntyvien lopputuotteiden määrään. Kemiallisessa reaktiossa vapautuva tai sitoutuva energiamäärä on reaktion lähtöaineista riippuvainen. Katalyysi on kineettinen prosessi, jolloin katalyytin vaikutus kohdistuu vain reaktionnopeuteen sekä välituotteisiin (Kuva 1).^{1,4}

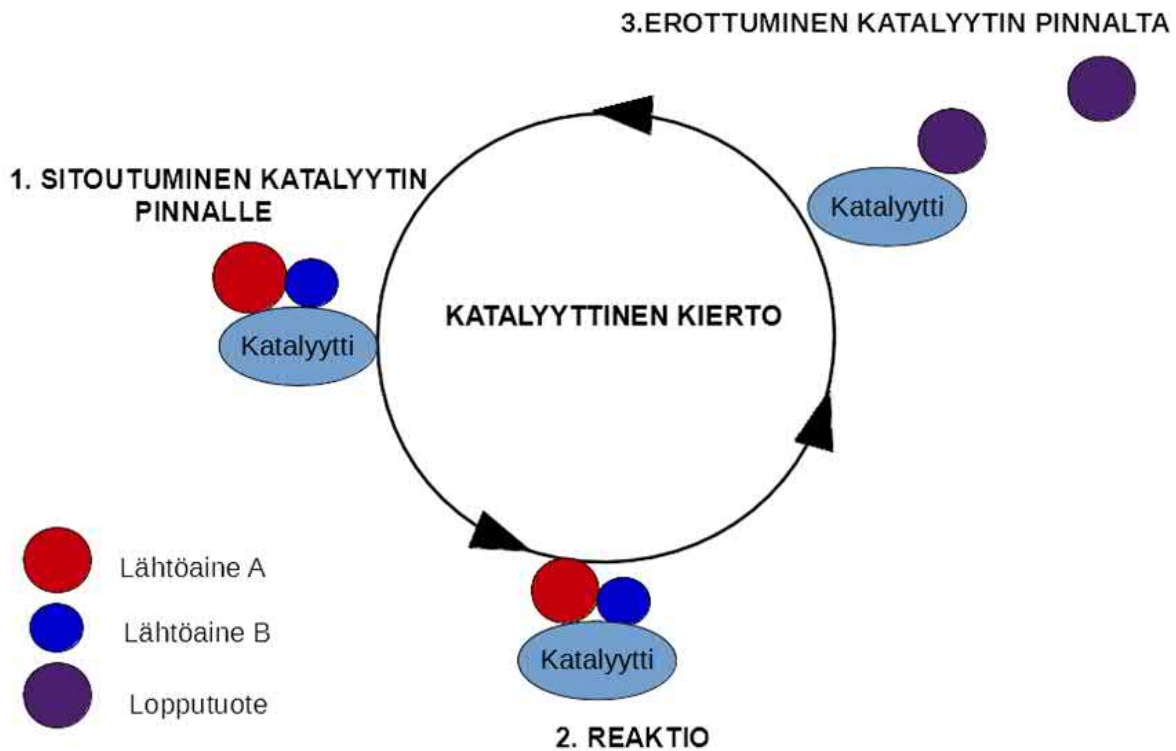


Kuva 1: Katalyytin vaikutus reaktion aktivaatioenergiaan, mukailtu lähteestä 1.

Katalyyysi on elämälle tärkeä ja välttämätön ilmiö. Elämän mahdollistavat reaktiot elimistössämme katalysoidaan entsyymeillä eli biologisilla katalyyteillä. Entsyymit osallistuvat lähes kaikkiin elimistömme reaktioihin.⁶ Entsyymit huolehtivat muun muassa ruoansulatuksesta, DNA:n rakentamisesta ja ovat tärkeässä roolissa infektioiden torjumisessa. Entsyymit myös avustavat hengitystä ja toimivat lihasten liikuttamisessa ja hermojen stimuloimisessa. Katalyyysin avulla valmistetaan myös ruokaa sekä materiaaleja vaateteollisuudelle.⁵

3.1. Katalyyysin yleiset periaatteet

Katalyyysi-ilmiön selittämiseen ei ole olemassa yhtä yleispätevää teoriaa, jonka avulla voitaisiin ottaa huomioon kaikki reaktio-olosuhteet ja nopeudet. Katalyyttinen reaktio (Kuva 2) on syklinen prosessi, josta käytetään myös termiä katalyyttinen kierto. Ensimmäisessä vaiheessa lähtöaine tai -aineet muodostavat kompleksin katalyytin kanssa. Kompleksin muodostuminen aloittaa ketjureaktion, jossa reaktio etenee vaihe vaiheelta loppuun ja tämän jälkeen katalyytti vapautetaan uuteen reaktiosykliin. Katalyyttisen reaktion tulee olla keskeytyksetön ja toistettava ollakseen sekä mahdollinen että hyödyllinen prosessi.⁴



Kuva 2: Katalyyttinen reaktio on syklinen ja jatkuva, mukailtu lähteestä 2.

3.2. Katalyyttinen kierto

Kaikki katalyysireaktiot käyvät läpi katalyyttisen kierron, jossa toistuvat tyypillisesti vaiheet: kemisorptio, dissosiaatio, diffuusio, rekombinaatio ja desorptio. Katalyyttinen reaktio on monivaiheinen prosessi mutta yksinkertaistettuna kierto voidaan jakaa näihin viiteen perusvaiheeseen.⁵

Molekyylit tai atomit voivat kiinnittyä kiinteään aineeseen, adsorbenttiin, pinnalle joko kemiallisesti ja fysikaalisesti.¹⁵ Kemisorptioissa muodostuu kemiallisia sidoksia reagoivan aineen ja adsorbenttien välille eli tällöin tapahtuu kemiallinen reaktio. Fysikaalisessa kiinnittymisessä on kyseessä fysisorptio, jolloin reagoivan aineen ja adsorbenttien välille muodostuu heikkoja van der Waalsin vuorovaikutuksia.^{15,16} Kemisorptio on perusta heterogeeniselle katalyyysille.¹⁶

Kemisorption jälkeen katalyyttisessä kierrossa tapahtuu mahdollisesti dissosiaatio, jossa reagoiva aine hajoaa pienempiin yksiköihin. Todellisuudessa alkuperäisen reagoivan aineen tai aineiden sisäiset sidokset alkavat heiketä jo kemisorption aikana, kun katalyytti ja reagoivan aineen välillä

tapahtuu kemiallinen reaktio. Dissosiaation jälkeen edetään diffuusioon, joka on ilmiö, jossa molekyylit liikkuvat väkevämmästä pitoisuudesta laimeaan tasoittaen systeemin pitoisuuserot. Katalyysireaktioissa diffuusiolla tarkoitetaan reaktiotuotteen tai- tuotteiden liikkumista katalyytin pinnalla.⁵

Rekombinaatiovaiheessa dissosiaation aikana syntyneet välituotteet tuhotaan, jotta katalyytti vapautuu jatkamaan kierron loppuun.⁵ Desorptio on adsorptiolle vastakkainen tapahtuma.⁶ Katalyytti vapautetaan reaktion lopputuotteesta ja katalyyttinen kierto päättyy. Tämän jälkeen katalyytti aloittaa uuden kierron.²

3.3. Katalyysityypit

Katalyysi jaotellaan usein kolmeen kategoriaan: homogeeniseen, heterogeeniseen ja biologiseen katalyysiin. Katalyytit määriteltiin aiemmin joko homogeenisiksi tai heterogeenisiksi. Mikäli katalyytti on samassa faasissa reagoivaan aineeseen tai aineisiin nähden, on kyseessä homogeeninen katalyytti ja tällöin myös katalyysireaktio on homogeeninen. Heterogeenisessä katalyysireaktiossa katalyytin faasi on eri kuin lähtöaineiden ja biologisessa katalyysissa katalyytteina toimivat entsyymit.²

3.3.1. Homogeeninen katalyysi

Homogeeninen katalyysi ei ole teollisuuden kannalta yhtä merkittävä kuin heterogeeninen katalyysi. Homogeeninen katalyysi on tärkeässä roolissa useimpien lääkeaineiden, polymeerien ja maatalouskemikaalien valmistuksessa. Homogeenisista katalyyseista suurin osa tapahtuu liuosfaasissa mutta myös kaasufaasin reaktioita käytetään.¹⁷

Homogeenisella katalyysin etuja ovat muun muassa katalyytin käyttäytymisen ennustaminen, jolloin käyttäytyminen voidaan selittää ja ymmärtää molekyylitasolla. Ennustettavuus on mahdollista, koska homogeeniset katalyytit ovat yhden reaktiopinnan katalyyttejä. Lisäksi homogeeniset katalyytit ovat hyvin selektiivisiä, jonka vuoksi homogeenisessa katalyysissä ei synny suuria määriä ei-toivottuja sivutuotteita ja reaktion saanto paranee. Selektiivisyytensä ansiosta homogeeniset katalyytit ovat hyviä valintoja lääkeaineiden ja hienokemikaalien valmistuksessa.¹⁷

3.3.2 Heterogeeninen katalyysi

Heterogeeninen katalyysi näyttelee merkittävää roolia energiateollisuudessa, erilaisten kemikaalien ja materiaalien valmistuksessa sekä vihreä kemian prosesseissa. Heterogeeninen katalyysi on kemianteollisuudelle välttämätön prosessi, koska suurin prosesseista on riippuvaisia heterogeenisesta katalyysistä.¹⁷ Heterogeenisessä katalyysissä käytetään yleensä kiinteää katalyyttiä, joka kiihdyttää kaasu- tai liuosmuotoisten aineiden reaktiota.²

3.3.3. Biokatalyysi

Biokatalyysissä entsyymit huolehtivat elämälle välttämättömistä reaktioista. Entsyymien avulla rakennetaan muun muassa DNA:ta, pilkotaan makromolekyylejä ja varastoidaan niiden sisältämä energiaa.^{2,5} Entsyymit ovat äärimmäisen spesifisiä ja tehokkaita.^{2,6}

4 KATALYYSI YHTEISKUNNASSA

Nykyisin katalyysin pohjautuva kemianteollisuus voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: öljynjalostukseen, kemikaalien valmistukseen sekä vihreää kemiaan.⁶ Näistä öljynjalostus on suurin katalyysia hyödyntävä sektori, jonka tärkeimmät tuotteet ovat erilaiset polttoaineet. Lisäksi tälle sektorille sisältyvät myös tuotteet, joiden valmistukseen tarvitaan öljystä peräisin olevia raaka-aineita kuten hiilivetyjä. Esimerkiksi farmaseuttiset valmisteet, polymeerit ja torjunta-aineet valmistetaan katalyysia hyödyntäen.⁵

Vihreällä kemialla tarkoitetaan sellaisten periaatteiden hyödyntämistä suunnittelussa, tuotannossa sekä sovelluksissa, jotka joko vähentävät tai eliminoivat ympäristölle haitallisten aineiden käyttöä. Katalyyttien avulla kontrolloidaan prosesseissa syntyviä päästöjä ja jätteitä sekä pyritään huomioimaan raaka-aineiden rajallisuus.⁷ Vihreän kemian prosesseissa hyödynnetään heterogeenista katalyysia ja yksi vihreän kemian tavoitteista on löytää uusia katalyyttejä energiaa kuluttaville prosesseille.^{2,5}

Tulevaisuudessa katalyysitutkimukselta odotetaan paljon. Katalyysista toivotaan löytyvän ratkaisu kemiallisten sekä öljynjalostusprosessien muokkaamiseen saasteettomiksi tai ainakin merkittävästi

vähentämään saasteita. Tavoitteena on myös löytää uusia katalyyttejä energiaa kuluttaville reaktioille kuten esimerkiksi maaöljyn jalostukseen ja ammoniakksynteesiin. Molemmat tapahtuvat korkeissa lämpötiloissa tuottaen suuren määrän palamistuotteita. Katalyyseistä toivotaan ratkaisua merkittäviin ilmaston lämpenemis- ja saastumisongelmiin, uusiutuvan energian tuottamiseen sekä ruoan riittävyyden takaamiseksi maapallon kymmenelle miljardille ihmiselle.⁵

Lähtulevaisuudessa nykyiset prosessit kemikaalien valmistuksessa ja energiantuotannossa alkavat tulla tiensä päähän raaka-aineiden ehtymisen ja niiden aiheuttamien ympäristöongelmien vuoksi. Biomassan hyötykäyttö, jonka tavoitteena on hyödyntää biopohjaisia uusiutuvia ja ympäristöystävällisiä raaka-aineita ja tuottaa niistä kemikaaleja ja polttoaineita, tulee olemaan kemianteollisuuden mielenkiinnon kohteena.⁵

5 KATALYyttI

Katalyytti on aine, joka nopeuttaa kemiallista reaktiota itse kulumatta reaktiossa.^{1,2} Katalyytti ei myöskään muutu reaktion aikana.² Katalyytti alentaa kemiallisen reaktion aktivaatioenergiaa eli energiaa (Kuva 1), joka tarvitaan reaktion käynnistymiseen. Kemiallinen reaktio tapahtuu tietyllä nopeudella ja reaktion nopeuteen voidaan vaikuttaa säätelemällä olosuhteita ja muita nopeuteen vaikuttavia tekijöitä.¹ Kemianteollisuudesta noin 90 % hyödyntää erilaisia katalyyttejä, joten katalyyttien käytöllä on merkittävä rooli yhteiskunnallisesti.^{3,4,5}

5.1. Homogeeninen katalyytti

Katalyyttejä on sekä homogeenisia että heterogeenisiä. Katalyytti määritellään homogeeniseksi, jos katalyytin faasi on sama kuin reaktion lähtöaineilla. Yksi tunnetuimmista homogeenisista katalyysireaktioista on otsonin hajoaminen hapeksi kloorin katalysoimana. Reaktiossa sekä kloori että otsoni ovat kaasufaasissa.^{1,2}

5.2. Heterogeeninen katalyytti

Toisin kuin homogeeninen katalyytti, heterogeeninen katalyytti on lähtöaineisiin nähden eri faasissa.¹ Suurin osa kemian teollisuuden katalyysireaktioista tapahtuu heterogeenisen katalyytin avulla.⁶

Esimerkiksi auton katalysaattorissa tapahtuu heterogeeninen katalyysireaktio, kun polttoaineiden palamisessa syntyvät kaasumaiset aineet reagoivat kiinteän katalyytin kuten platinan, rhodiumin tai palladiumin kanssa. Lähtöaineet ovat siis eri faasissa katalyyttiin verrattuna.¹

5.3. Katalyytin tärkeitä ominaisuuksia

Katalyytin valintaan vaikuttavat monet asiat, mutta tärkeimpiä ominaisuuksia ovat katalyytin aktiivisuus, valikoituvuus sekä uusiokäyttö.¹⁷ Katalyytin valinnalla pyritään optimoimaan kyseessä oleva reaktio mahdollisimman tuottavaksi ja kustannustehokkaaksi. Katalyytin valinnalla voidaan vaikuttaa myös merkittävästi reaktiossa syntyvien haitallisten sivutuotteita määrään. Moni ei-katalyyttinen reaktio saadaan katalyytin avulla olosuhteiltaan toteuttamiskelpoiseksi paineen ja lämpötilan suhteen ja siten katalyytin käytöllä on merkittävä vaikutus reaktioiden energiankulutuksessa.² Seuraavassa kappaleessa tarkastellaan katalyytin ominaisuuksia tarkemmin.

5.3.1. Aktiivisuus

Katalyytin aktiivisuudella tarkoitetaan syntyneiden molekyylien määrää yhtä katalyyttimolekyyliä kohden. Katalyytin aktiivisuus voidaan määritellä usealla tavalla. Reaktion nopeus mooleina katalyyttimassaa kohden tietyssä aikayksikössä, nopeus katalyyttipintaa kohden ja muuntumisnumero ja -frekvenssi (TON, turnover number; TOF, turnover frequency) ovat esimerkkejä aktiivisuuden määritelmistä. Reaktion nopeus voidaan mitata eri suureiden kuten massan, tilavuuden, katalyytin pinta-alan tai katalyyttipintojen lukumäärän perusteella. Vertailtaessa katalyyttien aktiivisuuksia on tärkeää, että reaktio-olosuhteet ovat samat, kun aktiivisuutta määritetään. Vertailukelpoisin aktiivisuuden mittari on muuntumisluku tai -frekvenssi,⁶ koska se on yksiköistä riippumaton.

5.3.2 Valikoituvuus

Reaktiolle pyritään valitsemaan mahdollisimman valikoiva katalyytti. Katalyyttisissä reaktioissa syntyy aina useampia tuotteita ja valikoiva katalyytti tuottaa eniten tai nopeimmin haluttua tuotetta.⁶ Valikoituvuudella voidaan siten oleellisesti vähentää reaktiossa syntyvien ei-toivottuja sivutuotteiden

määrää.^{4,6} Valikoituvuus voi olla esimerkiksi kemo-, regio eli alue-, diastereo- tai enantioselektiivistä.¹⁷

5.3.3 Uusiokäyttö

Kemianteollisuus perustuu 90 % katalyysiin⁵ ja yksi tärkeimmistä katalyytteinä käytettävistä materiaaleista ovat metallit, erityisesti siirtymämetallit.¹⁸ Metallien eristäminen malmeista on aikaa vievää ja kallista, etenkin jos malmi sisältää metallia vain pieniä määriä.¹⁹ Lisäksi maailman mineraalivarat eivät riitä loputtomiin, joten metallien uusiokäyttö ja kierrätys ovat äärimmäisen tärkeitä asioita.¹⁸

Uusiokäyttö liittyy olennaisena asiana uuteen talousmalliin, kiertotalouteen, jonka tavoitteena on säästää luonnonvaroja ja hyödyntää materiaalit tehokkaasti ja kestävästi. Kiertotalouden ideana on vähentää uusien tavaroiden tuottamista ja siirtää kulutusta enemmän palveluiden käyttämiseen, jakamiseen ja vuokraamiseen. Kiertotaloudessa talouskasvu ei ole sidoksissa luonnonvarojen kulutukseen ja tuotteet suunnitellaan siten, että ne pysyvät käytössä mahdollisimman pitkään.²⁰ Lisäksi kiertotaloudessa jätteet ja sivuvirrat pyritään hyödyntämään raaka-aineina uusissa prosesseissa.⁹ Esimerkiksi Teknologian tutkimuskeskuksen, VTT:n, katalyysitutkimuksissa pyritään selvittämään, miten kierrätysmateriaaleista ja biomassasta voitaisiin valmistaa kemikaaleja ja polttoaineita.²¹

Kemianteollisuus on yksi kiertotalouden edelläkävijöistä ja tuottaa kaikille toimialoille materiaaleja ja ratkaisuja. Kemiassa kiertotalous liittyy sekä uusiutuviin, fossiilisiin että mineraaliin aineisiin ja alan asiantuntijat ovat avainasemassa molekyyli-tason osaamisessa. Kemian avulla voidaan luoda lisäarvoa lähes mille tahansa raaka-aineelle ja kemian tavoitteena onkin kehittää kiertotaloudelle arvoa nostavaa kierrätystä (upcycling).

Kiertotalouden yhteydessä puhutaan myös biotaloudesta, jolla tarkoitetaan, että kiertotalous keskittyy biologisten materiaalien ympärille. Esimerkkinä biotaloudesta toimii Nesteen valmistama uusiutuva diesel. Neste valmisti vuonna 2016 uusiutuvaa dieseliä erilaisista jäte- ja tähderaaka-aineista 1,6 miljardia litraa, joka vastaa määrällisesti 1,7 miljoonan henkilöauton polttoaineen kulutusta vuodessa.⁹ Uusiokäyttö on kierrätyksen, jätteet minimoivan tuotannon, korjauksen ja kunnostamisen

ohella kiertotalouden tärkeitä toimintamalleja²², joiden toteuttamisella kiertotalous tarjoaa mahdollisuus kestävämpään kehitykseen.⁹

5.4. Erilaisia katalyyttejä

Katalyytit voivat olla muun muassa atomeja, molekyyliä ja kiinteitä pintoja. Katalyytit ovat hyvin kirjava joukko erilaisia aineita ja muotoja. Katalyytteinä käytetään esimerkiksi metalleja, eri aineryhmiä ja happoja ja emäksiä. Katalyytit voivat reagoida erilaisissa ympäristöissä, niin liuoksessa, kaasun ympäröimänä kuin kiinteän materiaalin pinnalla.²

5.5. Kantaja

Metallinanopartikkelit ovat yleisimpiä katalyyttimateriaaleja. Katalyyttisten reaktioiden vaatimissa korkeissa lämpötiloissa metallinanopartikkeleilla on taipumus sintrautua.² Sintrautumisessa partikkelit kasaantuvat isommiksi yksiköiksi lämpötilan vaikutuksesta. Sintrautuminen aiheuttaa katalyytin pinta-alan pienenemistä, mikä puolestaan oleellisesti hidastaa reaktion etenemistä.⁶ Metallinanopartikkelit ovat myös epästabiileja korkeissa lämpötiloissa. Epästabiiliutta ja sintrautumista voidaan estää käyttämällä apuna kantajia, jotka ovat kemiallisesti inerttejä ja lämpötilastabiileja materiaaleja.²

Useimmiten katalyyttisissä reaktioissa käytetään kantajina aluminaa, silikaa tai hiiltä. Zeoliitit ovat myös yleisesti käytetty kantajamateriaali. Alumina (Al_2O_3) kestää hyvin sekä korkeita lämpötiloja että mekaanista rasitusta, mikä tekee siitä loistavan kantajan ja on siksi käytetyin kantajamateriaali. Silikan (SiO_2) ominaisuudet kuten huokoisuus ja partikkelikoko sekä pinta-ala ovat helppo muokata prosesseihin sopiviksi. Silikaa käytetään prosesseissa, joissa on suhteellisen alhaiset lämpötilat. Hiilen soveltuvuus kantajaksi perustuu kemialliseen stabiiliuteen. Erityisesti hiiltä käytetään jalometallien kantajina orgaanisten yhdisteiden hydrogenoinnissa. Zeoliitit koostuvat kiteisistä ja huokoisista alumiinisilikaateista eli sisältävät sekä (SiO_4) että (AlO_4).² Zeoliitit voivat olla joko luonnosta peräisin olevia tai synteettisesti valmistettuja.⁶

6 KEMIAN OPPIMINEN

Kemian oppiminen perustuu vallitsevaan konstruktivistiseen oppimiskäsitykseen, jonka mukaan oppija nähdään aktiivisena tiedonrakentajana. Kyseessä on useista suuntauksista muodostunut oppimiskäsitys, joka sai alkunsa 1960-luvulla. Konstruktivistisessa oppimiskäsityksen suuntaukset tarkastelevat oppimista eri näkökulmista ja karkeasti suuntaukset eroavat toisistaan sen suhteen, painotetaanko yksilöllistä vai sosiaalista tiedon rakentamista.²³

Viimeisten tutkimusten myötä alettu ymmärtää psykologian vaikutusta oppimiseen yhä paremmin. Kun konstruktivistisen oppimiskäsityksen mukaan oppija on aktiivinen tiedonrakentaja, edellyttää oppiminen kykyä prosessoida ja analysoida tietoa. Oppiminen edellyttää sekä kognitiivisia taitoja kuten ajattelemista, ymmärtämistä ja muistamista, mutta sen lisäksi oppimisessa korostuvat oppijan sisäiset mentaaliset säätelyprosessit. Näitä kutsutaan metakognitiivisiksi taidoiksi.²³

6.1. Metakognitiiviset taidot

Etsittäessä määritelmää sanalle metakognitio, löytyy kirjallisuudesta useita eri määritelmiä.²⁴ Kirjallisuudessa käytetyt eri tulkinnat osoittavat metakognition olevan vaikeasti määriteltävä käsite. Yksinkertaisuudessaan metakognition voidaan kuitenkin ajatella olevan “ajattelemisen ajattelemista”.^{25,26}

Metakognitio viittaa korkeampaan ajatteluun ja siihen sisältyy kognitiivisten prosessien kuten ajattelun, muistin, ymmärtämisen ja ongelmaratkaisutaidon aktiivista kontrollointia. Esimerkiksi suunnittelu, kuinka lähestyä opeteltavaa asiaa tai oman ymmärtämisen arviointi ovat metakognitiivisia aktiviteetteja. Tunnetun amerikkalaisen psykologin, John Flavellin, vuoden 1979 määritelmän mukaan metakognitio käsittää sekä metakognitiiviset tiedot että metakognitiiviset kokemukset ja niiden säätelyn.²⁵

Metakognitiivisilla tiedoilla Flavell tarkoittaa yleisesti käsitystä ihmisen oppimisesta sekä tietoa henkilön yksilöllisestä oppimisprosessista. Hän sisällyttää metakognitiivisiin tietoihin ymmärryksen asian tai kohteen luonteesta sekä sen millainen prosessi vaaditaan kyseisen asian selvittämiseksi, esimerkiksi oppimiseksi. Metakognitiiviset tiedot sisältävät tiedon sekä kognitiivisista että metakognitiivisista strategioista ja lisäksi informaation, milloin ja missä tilanteessa niitä on

tarkoituksenmukaista käyttöä. Metakognitiiviset kokemukset puolestaan sisältävät Flawelin mukaan aina metakognitiivisten strategioiden tai säätelyn käyttöä. Esimerkiksi opiskelijan ennakoajatukset opiskeltavan asian helppoudesta tai vaikeudesta, tai luottamus omaan oppimiseen ovat metakognitiivisia kokemuksia.²⁵

Oppimisen tiedollisia tasoja käsittelevässä kirjassa metakognitio määritellään Flawelin tapaan tietoisuudeksi kognitiosta eli oppimisesta, muistamisesta ja ymmärtämisestä. Määritelmässä metakognitio kattaa lisäksi kognitiivisten prosessien kontrolloinnin, tarkkailun ja säätelyn. Yleisimmin kognitiivisten prosessien säätelyä voidaan kutsua itsesäätelyksi ja etuliitteellä meta tarkoitetaan metakognition olevan kognition yläpuolella, keskittyen kognition säätelyyn ja tarkkailuun.²⁴

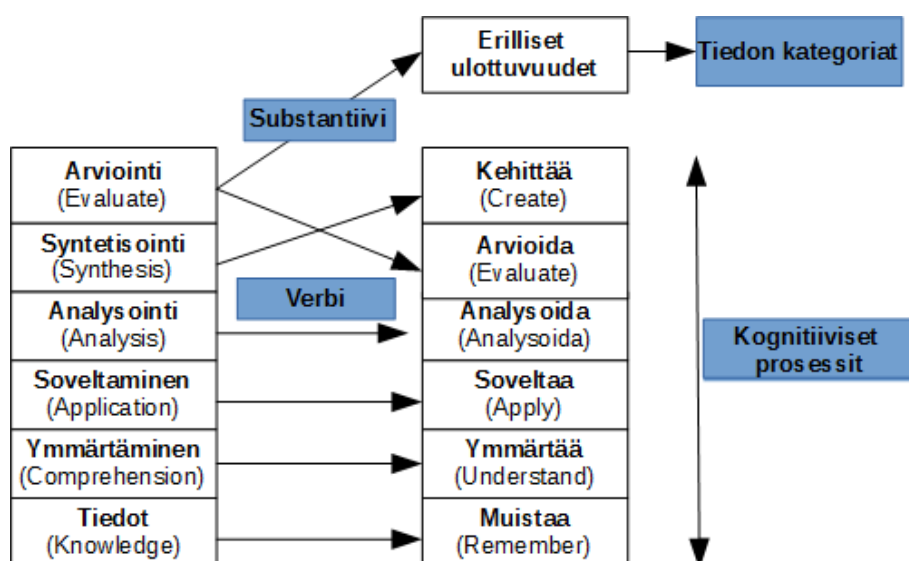
6.2. Bloomin taksonomia

Opetuksessa tulee aina määritellä oppimisen tavoitteet.²⁷ Mikäli tavoitteena on oppia luettelemaan tai kategorioimaan asioita, on opetustapa erilainen kuin esimerkiksi tavoiteltaessa kokonaisuuden arviointia tai tutkielman laatimista.²⁴ Asetettu oppimistavoite vaikuttaa opetustavan valintaan. Oppimistavoitteissa käytetään usein sanontoja asian sisäistäminen, oikea ymmärtäminen ja ytimeen tarttuminen. Mitä eroa näillä on? Miten näiden tavoitteiden toteutumista voidaan testata? Idea opetuksen tiedollisten tasojen luokittelusta syntyi psykologien tapaamisessa Bostonissa 1948. Oppimistavoitteiden tulkinnanvaraisuus sekä arvioinnin vaikeus olivat taustatekijöinä opetuksen tiedollisten tasojen luokittelun kehittämisessä.²⁸ Nykyisin opetuksen ja arvioinnin suunnittelussa käytetään Benjamin Bloomin taksonomiaan perustuvaa uudistettua versioita oppimisen tiedollisten tasojen luokitteluun.²⁴

Bloomin taksonomia syntyi 1956. Taksonomia luokittelee oppimisen tiedolliset tavoitteet kuuteen eri tasoon, jotka ovat muistaminen, ymmärtäminen, soveltaminen, analysoiminen, syntetisoiminen ja arvioiminen. Näistä kaksi ensimmäistä eli muistaminen ja ymmärtäminen luokitellaan taksonomiassa matalamman ajattelun prosesseiksi ja loput neljä korkeamman ajattelun prosesseiksi. Taksonomiassa kategoriat muistaminen ja ymmärtäminen ovat edellytys korkeamman tason ajattelua vaativille kognitiivisille prosesseille. Bloomin taksonomian soveltamisessa apuna käytetään verbejä, joiden tarkoituksena on kuvata opiskelijan ajattelun ja tiedollisen toiminnan tasoa (kuva 3). Verbejä käytetään myös tavoitteiden muotoilemiseen ja erityisesti verbeillä voidaan tukea korkeamman ajattelun vaatia kognitiivisia prosesseja.²⁸

Bloomin taksonomian uudistettu versio, *A Taxonomy for Learning, Teaching and Assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives*, ilmestyi vuonna 2001. Uudistettu taksonomia on kaksiulotteinen muodostuen tiedon ja kognitiivisen prosessin kategorioista. Uudistetussa versiossa oppimisen tavoitteisiin on sisällytetty sekä tiedollinen että kognitiivinen prosessi. Tieto luokitellaan neljään osaan, jotka ovat: faktatieto, käsitetieto, tiedot menettelytavoista sekä metakognitiiviset tiedot. Kognitiiviset prosessit uudistettu taksonomia luokittelee kuuteen kategoriaan: muista, ymmärrä, sovelta, analysoi, arvio ja kehitä. Verbeistä neljä viimeisintä ovat korkeamman ajattelun prosesseja.²⁴

Uudistettu versio eroaa alkuperäisestä taksonomiasta siten, että oppimisen tavoitetta kuvaava substantiivi on erotettu verbiksi ja substantiiviksi, jotka muodostavat uudistetun version 2-ulotteisuuden. Uudistettu versio kuvataan usein taulukon muotoon, jossa tiedon kategoriat eli substantiivit ovat riveillä ja kognitiivista prosessia tarkoittavat verbit sarakkeessa. Verbin tarkoitus on kuvata opiskelijan kognitiivista prosessia ja verbiä vastaavan substantiivin sitä, mitä opiskelijan odotetaan tekevän tai oppivan. Lisäksi uudistetussa versiossa vaativimmat kognitiiviset prosessit eli arvio ja kehitä ovat päinvastaisessa järjestyksessä alkuperäiseen taksonomiaan verrattuna ja alkuperäisen taksonomian sana ymmärrys (comprehension) on vaihdettu sanaksi ymmärtää (understand). Johdonmukaisuuden vuoksi myös alkuperäisen taksonomian alin tiedollisen tason luokittelu tiedot (knowledge) on muutettu verbiksi muistaa (remember). Alla kuva alkuperäisestä ja uudistetusta taksonomiasta, johon on merkitty oleelliset eroavaisuudet.²⁴



Kuva 3: Bloomin taksonomia (1956) ja Andersonin ja Krathwohlin uudistettu taksonomia (2001), mukailtu lähteestä 24.

6.3. Metakognitiiviset taidot kemian oppimisessa

Kemian oppiminen on haastava prosessi oppijalle, johtuen oppiaineen luontaisesta monimutkaisuudesta.^{29,30} Oppimisprosesseissa opiskelija joutuu muodostamaan mielikuvia tapahtumista ja abstrakteista käsitteistä, koska mikrotason tapahtumia ei kyetä näkemään. Perusteellinen kemian oppiminen edellyttää kuitenkin taitoa yhdistää makrotason tapahtumat mikrotasoon sekä taitoa esittää kyseisen ilmiön tapahtuma kemian symbolein. Ilman metakognitiivisia taitoja mielikuvien muodostaminen sekä makrotason yhdistäminen mikrotasoon ja symboliseen kieleen ei onnistu. Metakognitiivisilla taidoilla on merkittävä vaikutus oppimisessa.³⁰

Oppimisen tutkimukset ovat osoittaneet metakognitiivisten taitojen olevan tärkeässä roolissa syvemmälle oppimiselle. Tietoisuuden omasta ajattelusta ja kyvyn säädellä ajatteluaan on todistettu auttavan ideoiden sekä yleisesti luonnontieteiden käsitteiden ymmärtämisessä. Ongelmanratkaisutaitoa sekä näiden taitojen kehittymisestä metakognitiiviset taidot parantavat olennaisesti. Koska tutkimukset osoittavat metakognitiivisten taitojen parantavan oppimistuloksia ja olevan edellytys syvemmälle oppimiselle, kaikessa opetuksessa tulisi saada aikaan metakognition aktivaatio. Oppimisen ja oppimistulosten parantuessa oppijat saavat näin samalla mahdollisuuden käyttää sekä kehittää metakognitiivisiä taitojaan.²

6.4. Johnstonen kolmitasomalli

Kemian opetuksessa metakognition aktivointiin käytetään ensisijaisesti kahta erilaista mallia: kolmi- ja nelitasomallia. Kolmitasomallin teki tunnetuksi vuonna 1991 englantilainen kemian opetuksen professori Alex Johnstone.³¹ Kolmitasomallissa (kuva 3) on nimensä mukaisesti kolme kulmaa tasokolmion tai triangelin kulmissa kuvaten kemian oppimistasoja. Kolmion yhdessä kulmassa sijaitsee makrotaso, jolle sijoittuu asiat ja ilmiöt, jotka voidaan silmin havaita. Tätä tasoa kutsutaan joskus myös empiiriseksi tasoksi. Kolmion kahdessa muussa kulmassa sijaitsevat mikrotaso sekä symbolinen taso. Mallien ideana on sijoittaa tarkasteltavan kemian ilmiön asiat oikeille tasoille ja

yhdistää tasot toisiinsa. Tasojen yhdistäminen vaatii oppijalta metakognitiivisia taitoja, koska hän joutuu rakentamaan mielikuvia tapahtumista, joita ei voi nähdä.³⁰



Kuva 3: Kolmitasomalli (Johnstone, 1991), mukailtu lähteestä 33.

Kolmitasomallin tausta sijoittuu 1960-luvulle, jolloin herättiin tarkastelemaan luonnontieteiden opetusta. Kimmokkeena tarkasteluun toimivat luonnontieteiden oppimisvaikeudet. Kautta aikojen luonnontieteiden opiskelu on koettu vaikeaksi ja haasteellisuuden on ajateltu johtuvan luonnon monimutkaisuudesta sekä opetusmetodeista, joilla luonnontieteitä on opetettu. Tarkastelun yhteydessä pohdittiin myös luonnontieteiden koulutuksen merkitystä sekä roolia yhteiskunnassa.²⁹

Johnstone korostaa, että suurin virhe, mitä opetustilanteessa voidaan tehdä, on käyttää kaikkia kolme tasoa yhtä aikaa. Tällöin tapahtuu työmuistin ylikuormittuminen ja oppiminen vaikeutuu huomattavasti. Hän ohjaa aloittamaan opetuksen sieltä, missä opiskelijoiden ymmärrys ja käsitys opetushetkellä on. Näin opiskelijoilla on mahdollisuus yhdistää uudet opittavat asiat omiin olemassa oleviin tietorakenteisiin, jolloin tiedot voivat rekisteröityä pitkäaikaismuistiin. Ellei uusilla tiedoilla ole opiskelijan tietorakenteissa kohtaa, minne ne voisivat kiinnittyä, oppiminen jää pinnalliseksi. Pahimmillaan irralliset tiedot voivat aiheuttaa jopa naiivien käsityksien syntymisen.³²

Yhteenvedona Johnstonen kolmitasomallin ideana on hyödyntää oppimisen tutkimusten tuottamaa tietoa, jossa korostetaan metakognition vaikutusta oppimistuloksiin. Kolmitasomallilla voidaan yhdistää oppimisen psykologia ja loogisuus³², mallia soveltamalla opiskelija saa mahdollisuuden

käyttää metakognitiivisia taitojaan liittämällä makroskooppisen tason ilmiön mikroskooppiseen ja symboliseen tasoon.

6.5. Mahaffyn nelitasomalli

Johnstonen kolmitasomallilla on ollut merkittävä vaikutus kemian opetussuunnitelman muokkaamisessa ja suunnittelussa toisen ja kolmannen asteen koulutuksessa. Kolmitasomallia on sovellettu myös muun muassa oppikirjojen sekä laboratoriotöiden ohjeiden muokkaamiseen ja oppimateriaalin visualisointiin. Kolmitasomallin myötä kemian opetuksessa ymmärrettiin kemian oppimisen edellyttävän kaikkien kolmen tason ymmärtämistä sekä kykyä yhdistää tasot toisiinsa. Kolmitaso on ollut aktiivisessa käytössä aina 2000-luvulle saakka, mutta vuosituhannen vaihteessa huomattiin, että kemian opetus ei tarjoa riittäviä taitoja ymmärtää luonnontieteitä käsitteleviä tekstejä. Opiskelijoilla todettiin myös olevan hyvin suppea näkemys kemian roolista jokapäiväisessä elämässä. Lisäksi yhteiskunnan haastaviin ongelmiin kuten ilmastonmuutos ja energiapula sekä ympäristön suojelun pariin tarvittiin luonnontieteen osaamista.³³

Vuonna 2003 kanadalainen kemian professori Peter Mahaffy³⁴ laajensi hyviä oppimistuloksia antanutta Johnstonen kolmitasomallia uudella ulottuvuudella, jolla hän tarkoitti yksilön ominaisuuksia ja sosiaalista ympäristöä. Kolmitasomallin muoto laajeni neljä ulottuvuutta käsittäväksi nelitasomalliksi (kuva 4).³³



Kuva 4: Nelitasomalli (Mahaffy, 2003), mukailtu lähteestä 33.

Neljännellä ulottuvuudella Mahaffy halusi tuoda kemian opetukseen vahvasti näkökulman, joka osoittaa kemian liittyvän arkielämään. Mahaffyn malli ottaa huomioon ihmisen oppijana sekä kemian oppijana. Lisäksi Mahaffyn nelitasomalli sisältää monipuolisen yhteiskunnallisen näkökulman muun muassa ympäristöllisiä, sosiaalisia, poliittisia ja taloudellisia huolen aiheita, jotka liittyvät kemian käsitteisiin, reaktioihin ja prosesseihin. Esimerkkejä olivat ja ovat edelleen muun muassa energia- ja vesivarojen riittämättömyys sekä ympäristökysymykset.³³

Mahaffy kehitti nelitasomallin vastaamaan opetuksellisiin haasteisiin sekä laajemmassa mittakaavassa vastaamaan myös yhteiskunnallisiin haasteisiin.³³ Toteutuessaan oppimistilanteessa nelitasomalli aktivoi metakognitiivisia taitoja, jolloin oppiminen helpottuu ja tulokset paranevat.²⁶ Nelitasomallin käyttö voi myös helpottaa opiskelijoita yhdistämään opettavan asia sisällön niihin liittyviin konteksteihin.³³ Helsingin yliopiston kemian professori Maija Aksela osoitti väitöskirjassa että tutkimuksellinen oppiminen aktivoi opiskelijoiden metakognitiivisia taitoja heidän joutuessaan yhdistämään kemian prosesseja ja luonnontieteen tietoihinsa. Väitöskirjan tutkimus osoitti lisäksi, että erityisesti hyvin suunniteltu tutkimuksellinen laboratoriotyöskentely kehittää sekä opiskelutaitoja että metakognitiivisia taitoja.³⁵

7 KONTEKSTISIDONNAINEN OPETUS JA OPPIMINEN

Kontekstisidonnainen oppiminen perustuu konstruktivistiseen oppimiskäsitykseen, jossa oppiminen on oppijan aktiivista toimintaa, tiedon rakentamista. Konstruktivisen oppimiskäsityksen mukaan oppiminen on myös sosiaalinen tapahtuma, vuorovaikutuksen tulos.³⁶ Kontekstisidonnainen oppimisessa oppiminen on sidoksissa kontekstiin eli asiayhteyteen. Kontekstin yhdistäminen opetukseen sitoo kemian ja muiden luonnontieteiden käsitteitä ja teorioita lähemmäksi arkielämää ja siten parantaa opiskelijoiden mielenkiintoa luonnontieteitä kohtaan.³⁷

Konteksti voidaan määritellä usealla tavalla.³⁸ Kemian professori John Gilbert on määritellyt kontekstin seuraavasti: konteksti antaa uudelle tarkasteltavalle asialle yhtenäisen rakenteellisen merkityksen laajemmassa perspektiivissä tarkasteltuna. Opetuksen näkökulmasta kontekstin määritelmä perustuu siihen, minkä roolin kontekstin käytöllä ajatellaan opetuksessa olevan. Konteksti tarjoaa opiskelijoille perusteluja opiskella kemiaa, kun kontekstin avulla opiskelijat kokevat kemian opiskelun olevan relevanttia oman elämänsä sekä yhteiskunnan kannalta.³⁹

Kemian professori Onno de Jong on puolestaan esittänyt kontekstin määrittelemiseksi neljä pääluokkaa. Ensimmäisessä luokassa, henkilökohtaisessa kontekstissa, on ideana sitoa kemia opiskelijoiden elämään henkilökohtaisella tasolla. Esimerkiksi tutkittaessa aineiden myrkyllisyyttä voidaan aiheita tarkastella asiaa oman terveyden kannalta. Toisessa luokassa, sosiaalisen tai yhteisön kontekstissa, ajatuksena on ohjata opiskelijoita vastuullisiksi kansalaisiksi. Tällöin esimerkiksi voidaan pohtia ilmiötä happamoituminen ympäristön kannalta.³⁸

Ammattilaisten töiden ja taitojen mukainen konteksti, kolmas luokka, auttaa opiskelijoita ymmärtämään mahdollisten tulevien ammattien työnkuvaa ja vaikutusta yhteiskunnallisesti. Opiskeltaessa esimerkiksi aineiden kuten lääkkeiden, ruoan tai veden laatua, voidaan asia opettaa kertomalla analyyttisen kemian osaajien työtehtävistä. Viimeisessä eli neljännessä luokassa, joka on tieteen ja teknologian konteksti, pyritään kehittämään opiskelijoiden kykyä lukea ja omaksua tieteellistä ja teknologista kirjallisuutta. Koululaboratorioissa tehtävät tutkimukset voidaan liittää tähän kontekstiin kertomalla asiasta laajemmin, miten tehdään tieteellinen tutkimus.³⁸

De Jongin mukaan tietyt kontekstit voidaan valita monesta eri näkökulmasta tilanteen mukaan. Hän esittää kontekstin valinnalle seuraavat kriteerit:

- Kontekstin pitäisi olla hyvin tunnettu ja relevantti sekä tytöille että pojille
- Konteksti ei saa viedä opiskelijoiden huomiota aiheeseen liittyviltä käsitteiltä
- Konteksti ei saa olla liian monimutkainen
- Konteksti ei saa sekoittaa opiskelijoiden ajatuksia³⁸

7.1. Kontekstisidonnaisen oppimisen historia

Kemiassa kontekstisidonnainen oppiminen sai alkunsa 1980-luvulla Iso-Britanniassa. Ryhmä luonnontieteen opettajia halusivat kemian houkuttelevammaksi oppiaineeksi ja kehittivät Salterin kurssiperheenä tunnetut kurssit kattaen biologian, kemian ja fysiikan yläkoululaisille ja lukiolaisille. Salterin kurssien ideana oli ja on edelleen osoittaa, miten opiskeltava aihe näkyy elinympäristössä ja kemistien työssä. Näin kemian opiskelu pyritään muokkaamaan houkuttelevammaksi osoittamalla sen vaikutus ihmisten elämässä. Kurssien avulla tavoiteltiin myös laajempia opetus- ja oppimismenetelmiä.⁴⁰

Salterin lähestymistavan mukaan kontekstisidonnaisessa opetuksessa lähtökohtana pidetään asiayhteyttä, johon opetettava teoria liittyy. Kontekstin pitää olla kytköksissä oppilaiden elämään tai ympäröivään elämään. Teoriaa esitetään vain periaatteella tärkeää tietää eli vain sen verran teoriaa sisällytetään opetukseen, kun on tarpeellista ja välttämätöntä kontekstissa esitetyn kemian oppimiseksi.⁴⁰

7.2. Kontekstisidonnaisen oppimisen vaikutus kemian oppimiseen

Kontekstiin sidonnaisella opetuksella on osoitettu olevan positiivinen vaikutus opiskelijoiden asenteisiin kemian ja luonnontieteiden opiskelua kohtaan.^{37,38,41} Nuoremmille oppilaille innostavin konteksti on henkilökohtainen mutta vanhemmat oppilaat ja lukiolaiset ovat kiinnostuneita myös globaaleista sekä yhteiskunnallisista konteksteista.³⁷

Kontekstiin sidonnaisen opetustavan vaikutus kemian käsitteiden ymmärtämisessä on tuottanut tutkimuksissa ristiriitaisia tuloksia. Ramsdenin⁴¹ tutkimus osoitti, ettei kontekstisidonnaisella opetusmenetelmällä ole vaikutusta käsitteiden ja teorioiden ymmärtämisen parantumisessa verrattuna perinteisiin opetustapoihin. Myös Barkerin ja Millarin tutkimus (2000) osoitti ettei kontekstisidonnaisella ja perinteisellä opetustavalla ole kokonaisuutena merkittäviä eroja kemian käsitteiden ymmärtämisessä. Kontekstisidonnaisen opetustavan todettiin kuitenkin olevan hieman parempi opetustapa kemiallisten sidosten ja termodynamiikan oppimisessa. Sen sijaan Gutwill-Wisen (2001) tutkimus osoitti kontekstisidonnaisen opetustavan parantavan kemian ymmärtämistä.⁴¹

Uusimmat, 2018 julkaistut tutkimustulokset ovat osoittaneet kontekstiin sidottujen työtapojen ja tehtävien parantavan kemian käsitteiden ymmärtämistä sekä ongelmanratkaisukykyä. Käsitteiden ymmärtäminen parani enemmän oppilailta, jotka ovat luonnostaan kiinnostuneita kemiasta ja luonnontieteistä. Tutkimuksissa on myös todettu, että kontekstiltaan sopivat tieteelliset tekstit aktivoivat opiskelijoiden metakognitiivisia taitoja. Opettajien kannattaa sisällyttää opetukseensa myös tieteellisten tekstien lukemista, koska metakognitiivisten taitojen aktivointi on olennainen asia oppimisprosessissa.⁴²

8 TUTKIMUKSELLIN OPETUS JA OPPIMINEN

Lukion opetussuunnitelman mukaan opetuksen ja opetusmenetelmien tarkoituksena on tukea aktiivista työskentelyä sekä kehittää yhteistyötaitoja. Erityisesti tutkimuksellisten menetelmien on osoitettu parantavan opiskelutaitoja ja kehittävän kriittistä ajattelua.⁴⁴ Aktiiviseen työskentelyyn liittyy käsite aktiivinen oppiminen. Yleisesti hyväksytyn määritelmän mukaan aktiiviseksi oppimiseksi voidaan kutsua kaikki ohjaavia menetelmiä, jonka avulla oppijat saadaan sitoutettua oppimisprosessiin, mikä on aktiivisen oppimisen keskeisin tavoite.⁴⁵

Aktiivinen oppiminen vaatii oppijalta merkityksellisiä oppimisaktiviteetteja ja erityisesti oman tekemisensä ajattelemista. Tiedon rakentaminen edellyttää kirjoittamista, lukemista ja erityisen tärkeää opetukseen on sisällyttävä myös keskusteluita ja ryhmätöitä,⁴⁵ koska aktiivisen oppimisen menetelmät pohjautuvat vallitsevaan oppimiskäsitykseen, sosiaaliseen konstruktivismiin, jonka mukaan oppiminen tapahtuu sosiaalisissa tilanteissa. Aktiivinen oppiminen on osoitettu parantavan asennetta oppimista kohtaan sekä kehittävän ajattelu- ja kirjoitustaitoa.⁴⁶

Tutkimuksellisuudella tarkoitetaan kiinnostavan asian lähestymistapaa ja voi käytännössä olla esimerkiksi tutkimista, oppimista, työskentely- tai ajattelutapa.⁴⁷ Tutkimuksellinen oppiminen (eng. inquiry-based learning) on yksi aktiivisen oppimisen muoto, jossa painottuvat tiedon analysointi, kysymysten muodostaminen sekä kriittinen ajattelu. Opiskelijat vastaavat tutkimuskysymyksiin analysoimalla tietoa.⁴⁸ Tutkimuksellinen opetus on tällä hetkellä luonnontieteiden opetuksessa käytetyin menetelmä, opetuksen kulmakivi.⁴⁹

Tutkimukselliselle oppimiselle on määritelty neljä tasoa: vahvistettu, jäsenelty, ohjattu sekä avoin. Ensimmäisellä tasolla opiskelijoille annetaan opettajan laatimat tutkimuskysymykset, vaiheittaiset työohjeet sekä tulos, jonka he vahvistavat työohjetta noudattamalla. Toisella tasolla opiskelijat noudattavat vaiheittaista työohjetta ja vastaavat opettajien esittämiin tutkimuskysymyksiin mutta lopputulosta ei ole etukäteen ilmoitettu. Sen sijaan vaativammalla, ohjatulla tasolla, opettajat esittävät tutkimusta ohjaavia kysymyksiä, joiden avulla opiskelijat työstävät annettua ongelmaa.

Ohjatulla tasolla opiskelijalta edellytetään itsenäisiä työskentelymenetelmiä sekä lopputuloksen tuottamista. Vaativimmalla, avoimella tasolla, opiskelijat suunnittelevat työtavat, muodostavat tutkimuskysymykset ja esittävät lopputuloksen itsenäisesti. Tutkimuksellisessa opetuksessa

olennaista on edetä tasolta tasolle aloittaen alimmilta tasoilta, koska opiskelijat tarvitsevat ajattelun ja toiminnan harjoitusta kyetäkseen vaativimpien tasojen edellyttämiin aktiviteetteihin.⁴⁸

Kang Jingoo tutki väitöskirjassaan (2017) tutkimuksellisen oppimisen vaikutuksia luonnontieteiden oppimisessa suomalaisissa kouluissa. Luonnontieteissä tutkimuksellinen oppiminen osallistuttaa ja innostaa kokeilemaan ja käsillä tekemiseen sekä auttaa kehittymään käsitteiden ymmärtämisessä. Tutkimuksen mukaan erityisesti ohjattu tutkimuksellinen opetus lisää opiskelijoiden mielenkiintoa sekä luonnontieteitä, että luonnontieteen ammatteja kohtaan. Mielenkiinnon lisääntymisen myötä opiskelijat saavuttavat myös parempia oppistuloksia.⁴⁹

Tutkimuksellisessa oppimisessa opiskelijat saavat mahdollisuuden kokeilla tutkijoiden ja luonnontieteen alalla työskentelevien työtehtäviä, kuten laboratoriotyöskentelyä, tiedonhakua sekä kollegiaalista keskustelua. Lisäksi tutkimuksellisella opetustavalla opiskelijat joutuvat käyttämään metakognitiivisia taitojaan yhdistäessään prosesseja luonnontieteen tietoihinsa. Erityisesti hyvin suunnitellun tutkimuksellisen laboratoriotyöskentelyn on osoitettu kehittävänsä sekä opiskelutaitoja että metakognitiivisia taitoja.³⁵

9 KATALYYSIN OPETUS

Katalyysi on äärimmäisen merkittävä ilmiö maailmantaloudelle, ympäristölle sekä yhteiskunnalle.⁶ Ala tarvitsee osaajia ja se on mahdollista vain laadukkaan koulutuksen avulla. Avainasemassa laadukkaan koulutuksen tarjoamisessa ovat luonnontieteen opettajat,¹¹ ja katalyysin opetuksen sisällyttämiseksi lukion kemian opetukseen, on ensiarvoisen tärkeää, että lukion opettajat ovat tietoisia katalyysin merkityksestä.⁵⁰ Ilman laadukasta ja mielenkiintoa herättävää opetusta, alalle ei hakeudu opiskelijoita, jolloin tulevaisuudessa yhteiskunnasta ei löydy kemian osaajia ja tutkijoita kehittämään uusia kemian alan ratkaisuja.¹¹

Katalyysin opettaminen edellyttää aiheen merkittävyyden tuntemisen lisäksi hyviä teoretietoja sekä katalyysistä että katalyyteistä.⁵⁰ Hyvän opettajan tulee hallita opetettava asiansa perusteellisesti.¹¹ Opetuksen tutkimuksissa innostavaksi opetuksen lähestymistavaksi on todettu ilmiöiden esittäminen sopivissa konteksteissa.⁴¹ Tärkeää on valita konteksti siten, että se on relevantti opiskelijoille mutta myös selkeästi yhteydessä opetettavan ilmiön kanssa.^{38,40} Ilmiöiden lähestyminen sopivilla

konteksteilla on uusimpien tutkimusten mukaan osoitettu myös parantavan käsitteiden ymmärtämistä sekä ongelmaratkaisukykyä.⁴² Katalyyysiä hyödynnetään hyvin monenlaisissa kemian prosesseissa,^{3,4,5} joten monipuoliset kontekstit ovat sovellettavissa ilmiön opetuksessa.

Lukion opetussuunnitelman mukaan kestävä kehitys ja globaali vastuu on yksi kaikkia oppiaineita koskeva aihekokonaisuus.⁴⁴ Koulutuksen tehtävänä on valmistaa opiskelijoita ymmärtämään kestävä kehityksen edellyttämiä tulevaisuuden päätöksiä ja tekoja. Koulutuksen tulee myös ohjata opiskelijoita ottamaan osaa yhteiskunnan kehittämisessä kestävä tulevaisuuden mukaisesti.³⁹ Katalyyysillä on nyt ja tulee olemaan merkittävä rooli kestävämmän tulevaisuuden rakentamisessa⁵ esimerkiksi kiertotalouden kehittämisessä, ja on siten erityisen tärkeä ilmiö myös kestävä kehityksen opettamisessa.

Opetuksen tutkimuksen mukaan opetuksessa käytettävien menetelmien tulee olla tutkimuksiin perustuvaa. Opetuksen tutkimuksen tavoitteena on informoida opettajia uusista opetusmenetelmistä sekä motivoida heidät soveltamaan niitä opetuksessaan. On kuitenkin havaittu, ettei tutkimustieto tavoita kohdettaan eli opettajia. Syitä tutkimustiedon tavoittamattomuudelle ovat muun muassa julkaisujen vaikeaselkoinen kielenkäyttö sekä se etteivät opettajat ole tietoisia kaikista opetusmenetelmistä, joista julkaisuissa kerrotaan. Lisäksi ajanpuute on yksi merkittävimmistä estävistä tekijöistä uusiin menetelmiin perehtymisessä sekä ja niiden soveltamisessa.¹¹

Yksi olennainen tapa parantaa opetustaan kuitenkin seurata opetuksen tutkimuksen tuottamaa tietoa, perehtyä uusien opetusmenetelmien käyttöön ja sen jälkeen soveltaa niitä. Opetuksen parantamiseksi on myös tärkeää tarkastella omaa opetustaan kriittisesti. Lisäksi opetuksessa on hyvä käyttää monipuolisia opetusmetodeja, koska ne auttavat opiskelijoiden motivoimisessa, oppimisvaikeuksien kohtaamisessa sekä virheellisten käsitteiden syntymistä.¹¹

Avainasemassa tutkimustulosten käytäntöön ottamisessa ovat opettajat ja heidän asenteensa. Opetuksen tutkimuksen tuottamaa tietoa opetusta parantavista toimintatavoista voidaan saada käytäntöön tekemällä yhteistyötä opettajien kanssa, tuottamalla opetukseen selkeitä ja valmiita materiaaleja sekä esittelemällä opettajille uusia materiaaleja ja opetusmenetelmiä.¹¹

10 TUTKIMUKSEN TARKOITUS JA TUTKIMUSKYSYMYKSET

Tutkielmassa selvitettiin, miten uusi lukion opetussuunnitelma, LOPS 2015, ja uusi oppimateriaali käsittelevät katalyysia ja katalyyttejä. Tutkimuksessa perehdyttiin myös, mitä opetus.tv aiheista kertoo ja millaisia kysymyksiä katalyysista ja katalyyteistä on esitetty kemian ylioppilaskirjoituksissa vuosina 2008-2018.

Tutkimuskysymykset:

1. Miten katalyyssi ja katalyytti esiintyvät uudessa lukion opetussuunnitelmassa?
2. Miten katalyyssi ja katalyytti esiintyvät uuden opetussuunnitelman mukaisissa oppimateriaaleissa?
3. Miten opettajia voitaisiin tukea katalyysin opetuksessa?

11 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä tutkimuksessa lukion opetussuunnitelman ja oppimateriaalien analyysimenetelmänä käytettiin sisällönanalyysiä. Lisäksi analyysin sekä katalyysin kirjallisuuteen perehtymisen perusteella laadittiin katalyysiaiheista opetusmateriaalia lukion kemian syventäville kursseille. Opetusmateriaalin laatimiseen käytettiin kehittämistutkimusta.

11.1. Laadullinen tutkimus

Laadullinen tutkimuksen määritelmä on monitulkinnallinen ja laadullisen tutkimuksen piiriin kuuluukin useita erilaisia laadullisia tutkimuksia.⁵¹ Tutkimuksen tarkoitusta tai tehtävää pohdittaessa voidaan miettiä esimerkiksi kysymyksiä: onko tutkimus luonteeltaan kartoittava tai pyrkiikö tutkimus kuvaamaan jonkin ilmiön vaihtelevia ilmentymiä? Mikäli kyseessä on kartoittava, kuvaileva, selittävä tai ennustava tutkimus, voidaan tutkimus määritellä laadulliseksi.⁵²

Laadulliseen tutkimukseen liittyy myös pohdinta, onko tutkimus luonteeltaan teoreettista vai empiiristä eli kokemusperäistä. Koska laadullisessa tutkimuksessa perustelut pohjautuvat havaintojen teoriapitoisuuteen, eikä mikään tieteellinen tutkimus voi olla teoriatonta, voidaan sanoa laadullisen tutkimuksen olevaan teoriapitoinen.⁵¹

Teoreettisen ja empiirisen tutkimuksen erot liittyvät havaintoaineiston tarkasteluun ja argumentointiin ja ne eroavat toisistaan kahdella tavalla. Empiirisessä tutkimuksessa analyysi keskittyy kuvaamaan aineiston keräämis- ja analyysimetodeja. Sen sijaan teoreettisen tutkimuksen analyysillä ei ole metodia. Yksi tapa tehdä teoreettisen tutkimuksen analyysi on käyttää kolmivaiheista analyysirunkoa, jonka vaiheet ovat problematisointi, eksplikaatio ja argumentaatio. Problematisoinnissa herätetään tutkimusongelma ja eksplikoinnilla tarkoitetaan epäselvien näkemysten selventäminen, erittely ja muotoileminen.⁵¹

Teoreettisessa tutkimuksessa argumentoinnilla on keskeinen rooli tutkimuksen uskottavuuden kannalta, tutkimuksessa käytettyjen lähteiden täytyy olla relevantteja. Teoreettisessa tutkimuksen analyysissä korostuu kysymysketju kuka, mitä ja milloin. Empiirisen tutkimuksen analyysissä lähdeaineiston tuottavien tiedonantajien yksilöllisyys puolestaan häivytetään. Laadullinen tutkimus on luonteeltaan empiiristä ja laadullisessa tutkimuksessa havaintoaineiston tarkastelu ja argumentointi toteutetaan empiirisen analyysin tavoin.⁵¹

11.2. Sisällönanalyysi

Sisällönanalyysi on yksi laadullisen tutkimuksen perusanalyysimenetelmistä. Sisällönanalyysin avulla aineistoa, joka voi olla esimerkiksi kirja, artikkeli, haastattelu, puhe, tai lähes mikä tahansa kirjallisessa muodossa oleva tai kirjalliseen muotoon saatettu materiaali, voidaan analysoida systemaattisesti ja objektiivisesti. Sisällönanalyysin avulla aineisto pyritään järjestämään tiiviiseen ja selkeään muotoon raportointia ja johtopäätösten tekoa varten.⁵¹

Kirjallisuudessa laadullisen tutkimuksen aineiston sisällönanalyysi mielletään usein joko induktiiviseksi tai deduktiiviseksi päättelyksi. Induktiivinen päättely etenee yksilöstä yleiseen ja deduktiivinen päinvastoin eli yleisestä yksittäiseen. Nykyisin sisällönanalyysiä kuvataan myös nimillä aineisto- ja teorialähtöisellä sekä teoriaohjaavalla sisällönanalyysianalyysillä.⁵¹

11.2.1. Aineistolähtöinen sisällönanalyysi

Aineistolähtöisen eli induktiivisen sisällönanalyysin prosessi on kolmivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa aineisto pelkistetään eli redusoidaan ja toisessa vaiheessa klusteroidaan eli ryhmitellään. Lopuksi kolmannessa vaiheessa aineisto abstrahoidaan eli käsitteellistetään. Analyysi aloitetaan analyysiyksikön määrittelyllä. Analyysiyksikkö voi olla esimerkiksi sana, lause tai useista lauseista koostuva ajatuskokonaisuus. Perustelut analyysiyksikön valinnalle nojaavat tutkimustehtävään ja aineiston laatuun.⁵¹

Aineiston pelkistämistä eli redusointia on esimerkiksi analyysiyksikköjen etsiminen ja listaaminen auki kirjoitetusta aineistosta. Ryhmittelyssä tutkitaan pelkistämässä löydettyt ilmaisut ja analyysiyksiköt ja ryhmitellään samankaltaiset yhteen. Ryhmittelyn jälkeen nimetään ryhmät luokiksi. Ensin muodostetaan alaluokat sisältöä kuvaavalla käsitteellä kuten esimerkiksi tutkittavan ilmiön ominaisuus, piirre tai käsitys. Luokittelua jatketaan muodostamalla yläluokkia alaluokkien yhdistämällä ja yläluokista muodostetaan edelleen pääluokkia. Luokittelu tiivistää aineistoa, kun yksittäiset ilmaisut ja analyysiyksiköt saadaan sisällytetyksi luokkien käsitteiden alle. Klusterointi antaa tutkimukselle pohjan tutkimuksen perusrakenteelle sekä kuvauksia tutkittavasta ilmiöstä.⁵¹

Abstrahoinnissa muodostetaan teoreettisia käsityksiä aineiston olennaisista tiedoista, jotka redusoinnin ja klusteroinnin avulla on aineistosta löydetty. Abstrahoinnissa luokituksia edelleen yhdistetään, aineiston sisällön mahdollistamissa rajoissa ja lopuksi teoreettiset käsitykset yhdistetään empiriseen aineistoon. Käsitteitä yhdistelemällä aineistolähtöinen sisällönanalyysi antaa vastauksen tutkimustehtävään.⁵¹

11.3. Laadullisen tutkimuksen luotettavuus

Arvioitaessa laadullisen tutkimuksen luotettavuutta tärkeimmät kysymykset suuntautuvat totuuteen ja objektiivisuuteen. Epistemologian eli tietoteorian mukaan totuusteorioita tunnetaan neljä erilaista. Teoriat ovat nimeltään korrespondenssi- ja koherenssiteoriat, pragmaattinen totuusteoria sekä konsensukseen perustuva totuusteoria. Tutkimuksen taustalla oleva totuusteoria vaikuttaa tutkimuksen luotettavuuden arvioitiin.⁵¹

Korrespondenssiteoria myöntää todeksi vain sen mikä vastaa todellisuutta kuten esimerkiksi väite ”ikkuna on auki” on totta vain ikkunan ollessa oikeasti auki. Korrespondenssiteoriassa väitteet ovat aistein todistettavissa. Koherenssiteorian väitteet ovat tosia, kun ne ovat yhtäpitäviä muiden väitteiden kanssa eikä niiden välille synny ristiriitaa. Pragmaattinen totuusteorian mukaan väite on tosi, jos se on hyödyllinen ja toimiva. Pragmaattinen totuusteoriassa on siten kyse tiedon käytännöllisistä seurauksista. Konsensukseen perustuvassa totuusteoriassa ihmisten keskuudessa luodaan kollektiivisia totuuksia. Tappaminen on rikos ja tuomittavaa, kun niin on yhdessä päätetty, toimii esimerkkinä totuudesta konsensukseen perustuvasta totuusteoriasta.⁵¹

Mahdollisuus objektiiviseen tietoon pohjautuu edellä mainittuihin totuusteorioihin ja näistä ainoastaan korrespondenssiteorian mukaan on olemassa ehdotonta objektiivista tietoa. Kun tarkastellaan laadullisen tutkimuksen objektiivisuutta, totuusteorian lisäksi havaintojen luotettavuus ja puolueettomuus on hyvä huomioida erillisinä kohtina. Onko mahdollista, että esimerkiksi tutkimuksen tekijän sukupuoli, ikä, uskonto tai jokin muu vastaavanlainen asia eivät vaikuta tutkimuksen havaintoihin. Käytännössä tutkijan tulkintaa on mahdotonta sivuuttaa ja tämä on laadullisissa tutkimuksissa myönnetty ja otettava huomioon arvioitaessa tutkimuksen luotettavuutta.⁵¹

Laadullinen tutkimus pohjautuu seitsemään erilaiseen perinteeseen, jonka vuoksi tutkimusperinne ei ole yhtenäinen ja tästä syystä laadullisen tutkimuksen tekijöillä on erilaisia käsityksiä luotettavuudesta. Käsitteet reliabiliteetti eli toistettavuus, jolla arvioidaan, onko tutkimustulokset toistettavissa sekä validiteetti eli pätevyys, jolla arvioidaan, kohdistuuko tutkimus siihen, mitä oli aikomuksena tutkia, ovat syntyneet määrällisen tutkimuksen mukaan eivätkä siksi sovellu laadullisen tutkimuksen luotettavuuden arviointiin.⁵¹

Laadullisen tutkimuksen luotettavuuden arvioinnissa suositellaan käytettäväksi seuraavia käsitteitä, mikäli tutkimuksen analyysimenetelmänä on käytetty sisällönanalyysiä. Käsitteet ovat uskottavuus, vastaavuus, siirrettävyys, luotettavuus, tutkimustilanteen arviointi, varmuus, riippuvuus ja vakiintuneisuus. Yleisesti laadullisen tutkimuksen luotettavuutta arvioitaessa on hyvä käydä läpi seuraavat kohdat:⁵¹

Tutkimuksen kohde ja tarkoitus: mitä ollaan tutkimassa ja miksi.

Tutkijan sitoutuminen kyseiseen tutkimukseen: miksi tämä tutkimus on tärkeä, mitä tutkimusta aloittaessa on oletettu ja ovatko ajatukset muuttuneet.⁵¹

Aineiston keruu: miten aineiston keruu on menetelmänä tapahtunut (esimerkiksi haastattelu) ja tekniikkana (esimerkiksi nauhoitus), aineiston keruuseen liittyvät erityispiirteet (esimerkiksi onko tutkija haastatellut tiedonantajat yksin tai kaksin, oliko kyseessä valmisaineisto tai oliko kyseessä yksilö-, vai ryhmähaastattelu).⁵¹

Tutkimuksen tiedonantajat: millä perusteella tutkimuksen tiedonantajat valittiin, miten heihin otettiin yhteyttä ja montako tiedonantajaa tutkimukseen osallistui. Tutkimuksen tekijän on huolehdittava, ettei tiedonantajien henkilöllisyys paljastu.⁵¹

Tutkija-tiedonantaja-suhde: arvio siitä, miten kyseinen suhde toimi. Lukivatko tiedonantajat tutkimuksen tulokset ennen niiden julkaisua ja muuttivatko heidän kommenttinsa tuloksia. Mikäli tiedonantaja lukivat ja kommentoivat tuloksia, on perusteltava, miksi näin meneteltiin.⁵¹

Tutkimuksen kesto: millaisella aikataululla tutkimus on tehty.

Aineiston analyysi: miten aineisto analysoitiin, miten tuloksiin ja johtopäätöksiin päästiin.

Tutkimuksen luotettavuus: on arvioitava, miksi tutkimus on eettisesti korkeatasoinen, miksi tutkimusraportti on luotettava.

Tutkimuksen raportointi: miten tutkimusaineisto on koottu ja analysoitu.⁵⁰

Menneen vuosikymmenen aikana laadullisen tutkimuksen luotettavuus on parantunut erilaisten tekniikoiden myötä, koska sekä aineiston keruuseen liittyviä tekniikoita, että analyysimenetelmiä on kehitetty huomattavasti. Yksi luotettavuuteen liittyvä kysymys on tutkimuksen julkisuus, jolla tarkoitetaan sitä, että sekä tutkija raportoi tutkimuksen teon tarkasti ja sitä, että myös tutkijakollegat arvioivat tutkimusprosessia. Lisäksi tutkimuksen julkisuuteen liittyy face-validiteetiksi kutsuttu prosessi, jossa tutkimuksen tiedonantajat arvioivat tutkimuksen tulosten ja johtopäätösten osuvuutta.⁵¹

Triangulaatio on käsite, jolla tarkoitetaan erilaisten metodien, tutkijoiden, tiedonlähteiden ja teorioiden yhdistämistä tutkimuksessa. Osassa laadullisen tutkimuksen kirjallisuudessa triangulaatiota pidetään hyvänä validiteettikriteerinä. Triangulaation käyttö ei ole kuitenkaan ongelmatonta, tutkijan on oltava hyvin perehtynyt triangulaation mahdollisuuksiin ja rajoituksiin.

Denzinin (1978) mukaan triangulaatioissa on neljä päätyyppiä: tutkimusaineistoon, tutkijaan ja teoriaan liittyvä triangulaatio sekä metodinen triangulaatio.⁵¹

Tutkimusaineistoon liittyvä triangulaatio tarkoittaa tiedon keräämistä monelta eri tiedonantajaryhmältä. Tutkijaan liittyvässä triangulaatioissa tutkijoina on mahdollisimman monta henkilöä ja useiden teoreettisten näkökulmien huomioiminen tutkimuksen näkökulman laajentamiseksi on ideana teoriaan liittyvässä triangulaatioissa. Metodinen triangulaatio yhdistelee useita eri metodeja.⁵¹

Näiden neljän triangulaation päätyypin mukaan on olemassa myös monitriangulaatio, jolloin tutkimuksessa käytetään vähintään kahta triangulaation päätyyppiä. Metodologista triangulaatiota käytettäessä on huomioitava, että laadullisen tutkimuksen taustalla on seitsemän perinnettä ja perinteen valinta vaikuttaa metodeihin, jolloin myös metodinen triangulaatio on eri vivahteinen ja painotteinen riippuen laadullisen tutkimuksen taustalla olevasta perinteestä.⁵¹

11.4. Laadullisen tutkimuksen eettisyys

Laadullista tutkimuksessa ensimmäinen eettinen tarkastelu liittyy aiheen valintaan. Valitessaan aiheen, tutkija tekee myös eettisen valinnan. Kalkas (1995) avasi aiheen eettisyyttä esimerkillään hoitomyöntyvyydestä. Hoitomyöntyvyys voidaan määritellä niin, että potilas noudattaa tai pyrkii noudattamaan lääkäriltä saamia ohjeita. Mikäli potilas toimii ohjeiden vastaisesti, hän ei ole hoitomyönteinen. Tässä Kalkas tarkoittaa tutkimusasetelmalla sitä, että lääkärin ohjeistukset ovat oikeita ja asiakkaan toimiessa lääkärin ohjeiden vastaisesti hän leimautuu hoitokielteiseksi. Tutkimusasetelma ei siis huomioi lääkärin ohjeiden mahdollisia haasteita, kuten että potilas ei välttämättä kykene noudattamaan ohjeita. Aiheen eettisyyttä pohdittaessa on hyvä huomioida, miksi tutkimukseen ryhdytään ja kenen ehdoilla.⁵¹

Nykyisin tieteen ei enää voida ajatella olevan pelkästään uuden tiedon saavuttamista vaan uuteen tieteelliseen tietoon liittyy hyvin usein esimerkiksi taloudellisuus. Rahan myötä tieteen tavoitteena on tuottaa käytännöllisiä tuloksia suurten totuuksien etsimisen sijaan. Tieteestä on tullut vallankäytön väline ja asia on syytä huomioida kaikkien tieteellisten tutkimusten eettisyyttä pohdittaessa. Laadullisen tutkimuksen tiedonhankintakeinot voivat olla hyvin vapaamuotoisia ja ovat siten usein lähellä arkielämän vuorovaikutustilanteita. Vapaamuotoiset tiedonhankintakeinot ovat kuitenkin haasteellisia tutkimusasetelman eettisyyden näkökulmasta, koska tutkimuksen alussa on vaikea

arvioida mahdollisia eettisiä kysymyksiä etukäteen. Lisäksi ihmisiä tutkittaessa, tutkija on instituutionaalaisessa asemassa tutkittaviin nähden ja käyttäessään asemaansa vahingoittamiseen tai huonoon kohteluun, on tutkijan toiminta eettisesti kyseenalaista.⁵¹

Laadullisia tutkimuksia koskevat kaikkien tieteellisten tutkimusten tavoin myös tutkimuseettisen neuvottelukunnan määrittelemät hyvän tieteellisen käytännön mukaiset toimintatavat. Tutkimuseetiikalla neuvottelukunta tarkoittaa eettisesti vastuullisten toimintatapojen noudattamista ja epärehellisyyden sekä loukkausten tunnistamista ja ehkäisemistä tieteenalasta riippumatta. Laadullisissa tutkimuksen eettisyyttä pohdittaessa on myös tärkeää huomioida, että tutkimusperinteet tarkastelevat eettisyyttä eri tavoin huolimatta siitä, että tutkimuseettisen neuvottelukunnan ohjeet on asetettu eri perinteissä määritettyjen etiikan kysymysten yläpuolelle.⁵¹

11.5. Kehittämistutkimus

Kehittämistutkimus on tutkimusmenetelmä, joka on syntynyt halusta kehittää opetustilanteita. Opetuksen tutkimukseen on kohdistunut kritiikkiä, joissa on arvosteltu, ettei tutkijoiden tuottamaa tietoa voida hyödyntää käytännön työssä ja opetuksen tutkimukseen kohdistunut kritiikki onkin toiminut promootorina menetelmän kehittämisessä. Kehittämistutkimusta on alettu hyödyntää opetuslalla 1990-luvulla ja tullut tunnetummaksi vasta 2000-luvulla. Vuosituhannen alku on osoittanut, että menetelmä on vakiinnuttanut paikkansa opetuksen tutkimuksessa ja nykyisin menetelmästä ollaan yhä kiinnostuneempia.⁵³

Kehittämistutkimus mielletään koostuvan kolmesta ominaispiirteestä Juuli ja Lavosen (2006) ehdotuksena. Ominaispiirteet ovat: 1) iteratiivinen eli toistuva kehittäminen syntyy muutoksen tarpeesta, 2) kehittäminen johtaa käytettävään tuotokseen ja 3) kehittäminen tuottaa opetusta edistävää tietoa. Endelsonin (2002, 2006) mukaan kehittämistutkimuksella on mahdollista tavoitella vastauksia kysymyksiin seuraaviin kysymyksiin. Miten kehittämisessä edetään? Millaisia tarpeita ja mahdollisuuksia kehittämisellä on? Millaiseen tuotokseen kehittäminen johtaa? Kysymykset jakavat kehittämistutkimuksen kehittämispäätökset kolmeen kategoriaan, jotka ovat:⁵³

1. Kehittämisprosessi
2. Ongelma-analyysi
3. Kehittämistuotos

Kehittämispäätöskategoriat tuottavat erityyppistä teoriaa. Kehittämisprosessikategoriassa on ideana tarkastella kehittämistutkimusta kokonaisuutena ja kehittämisprosessikategoria tuottaa sekä toimintaa että ajattelua ohjaavia teorioita. Kategoria selvittää tutkimuksen vaiheet, yksilöiden toiminnan kokonaisuuden osana ja millaisia asiantuntemuksen lajeja valitussa kehittämiskontekstissa tarvitaan.⁵³

Ongelma-analyysikategorian avulla saadaan tietoa oppimisesta ja opetuksesta valitussa kontekstissa eli toisin sanoen ongelma-analyysikategoriassa saadaan kontekstisidonnaista teoriaa. Lisäksi tuotetaan myös teorioita, joiden avulla kuvaillaan, miten lopputulokseen on päädytty.⁵³

Kehittämistuotuskategoria on kontekstisidonnaisten mallien, kuten esimerkiksi tutkittavan ilmiön opettamiseen soveltuva konkreettinen opetusmateriaali, tuottaja. Tällä kategorialla tuotetaan toimintaa ja ajattelua ohjaavia malleja.⁵³

Päätavoitteena kehittämistutkimuksessa pidetään teorian luomista ja olennaisinta kehittämistutkimuksessa onkin perustaa kehitys teoriaan sekä tuottaa teoriaa kehittämisestä. Kehittämistutkimus on avoin, jolloin muuttujia on useita kvantitatiiviseen tutkimukseen verrattuna. Kehittämistutkimuksen kohteena olevaa ilmiötä tarkastellaan autenttisessa ympäristössä ja tutkimustietoa on tärkeää voida verrata aikaisempaan tutkimustietoon.⁵³

11.5.1 Kehittämistutkimuksen toteuttaminen

Tutkimus aloitetaan kartoittamalla tutkimuksen tarpeet, mahdolliset syyt sekä haasteet. Kartoitusta kutsutaan kehittämistutkimuksessa ongelma-analyysiksi ja analyysi voi olla joko empiirinen, teoreettinen tai niiden yhdistelmä. Teoreettisella ongelma-analyysillä tarkoitetaan esimerkiksi tutkimustiedon kirjallisuusanalyysia. Ongelma-analyysin jälkeen tutkimuksessa toteutetaan kehittämissyklejä, jonka vaiheet sisältävät kehittämisen, arvioinnin ja raportoinnin. Kehittämissyklissä syntyneet tuotokset läpikäyvät uuden kehittämissyklin ja kehittämistutkimuksen aikana tehdään jatkuvaa arviointia sen hetkisestä tuotoksesta. Kehittämissykliin kuuluu myös tuotoksen testaaminen.⁵³

11.5.2. Kehittämistutkimuksen raportointi

Tieteellisten tutkimusten julkaisuissa on totuttu muotoon, jotka sisältävät tiivistelmän, johdannon, teoreettisen viitekehyksen, tutkimusmenetelmät, tuloksen ja pohdinnan. Kehittämistutkimuksen raportti poikkeaa perinteisestä tieteellisen julkaisun mallista. Kehittämistutkimuksen raportin tulee sisältää seuraavat osiot (Collins 2004):

- 1) Teoriaan ja kontekstiin kytketyt kehittämistavoitteet
- 2) Tutkimusasetelman tarkka kuvaus, jolloin pystytään arvioimaan syklittäistä muutosta
- 3) Syklittäiset kehittämiskuvaukset, joista käy ilmi, miksi ja millaisia muutoksia kehittämisessä tehtiin
- 4) Syklittäiset kehittämistulokset
- 5) Pohdintaosuus, jossa otetaan kantaa kehittämisen mahdollisuuksiin ja haasteisiin.⁵³

Mikäli kehittämisselitys käytetään pro gradun menetelmänä, raportista käytetään nimitystä kehittämisselitys. Jotta menetelmä voidaan tieteellisesti luotettavana, on raportin oltava riittävän yksityiskohtainen. Collins, Joseph ja Bielaczycyn (2004) mukaan kehittämisselityksen raportissa olisi hyvä olla seuraavat osiot:

- Teoriaan ja kontekstiin kytketyt kehittämistavoitteet
- Tutkimusasetelman tarkka kuvaus, jolloin pystytään arvioimaan syklittäistä muutosta
- Syklittäiset kehittämiskuvaukset, joista käy ilmi, miksi ja millaisia muutoksia kehittämisessä tehtiin.
- Syklittäiset kehittämistulokset
- Pohdintaosuus, jossa otetaan kantaa kehittämisen mahdollisuuksiin ja haasteisiin.⁵⁴

11.5.3. Kehittämisselityksen luotettavuus

Suurta tietomäärää on vaikea analysoida objektiivisesti. Menetelmää on myös kritisoitu tutkimuskäytäntöjen määrittelemättömyydestä. Kehittämisselityksessä syntyy usein paljon tietoa ja tästä aiheutuu haasteita tutkimuksen tekijälle. Edellä mainituista syistä tutkimuskirjallisuus on usein kyseenalaistanut menetelmän luotettavuuden.⁵³

Kehittämistutkimuksen luotettavuutta arvioidaan luokittelulla, jonka Lincoln ja Guban (1985) ovat kehittäneet. Luokittelun neljä luokkaa ovat: uskottavuus, siirrettävyys, luotettavuus ja vahvistettavuus. Määrällisen tutkimuksen arvioinnin mittarit validiteetti eli pätevyys, jolla arvioidaan, kohdistuuko tutkimus siihen, mitä aiottiin tutkia ja toinen määrällisen tutkimuksen arvioinnin mittari, reliabiliteetti eli luotettavuus, eivät ole sovellettavissa kehittämistutkimuksen luotettavuuden arviointiin. Validiteetti ja reliabiliteetti ovat määrällisen tutkimuksen arviointiin kehitettyjä mittareita, eivätkä siksi sovellu sellaisenaan laadullisia osioita sisältävän kehittämistutkimuksen luotettavuuden arviointiin.⁵³

Kehittämistutkimusta pidetään haastavana tutkimusmenetelmänä luotettavuuden arvioinnin näkökulmasta. Luotettavuuden arvioinnissa Lincolnin ja Gubanin luokittelua voidaan verrata Design-Based Research Collectiven (2003) määrittelemiin yleisiin laadukkaan kehittämistutkimuksen kriteereihin. Nämä kriteerit ovat:

- Kehittämisen tulee olla kokonaisvaltaista, jolloin kehittämistuloksena saadaan sekä ohjaavia malleja ja teorioita että kuvailevia teorioita (uskottavuus, luotettavuus ja vahvistettavuus).
- Kehittämisen tulee edetä sykleittäin ja sisältää jatkuvaa kehittämistä ja arviointia (uskottavuus, luotettavuus ja vahvistettavuus).
- Kehittämisessä tulee pyrkiä teorioihin, jotka ovat siirrettävissä kentälle opettajien tai muiden opetusalan ammattilaisten käyttöön (siirrettävyys).
- Kehittämisprosessiin tulee sisältyä testaamista autenttisissa olosuhteissa (siirrettävyys, luotettavuus ja vahvistettavuus).
- Kehittämistutkimuksen kaikki syklit tulee dokumentoida tarkasti (luotettavuus ja vahvistettavuus).⁵³

Kehittämistutkimuksen luotettavuutta arvioinnissa oleellisia asioita ovat avoimuus ja monimutkaisuus, joten tutkimuksen rajaaminen ja raportointi ovat haasteellisia vaiheita tutkimuksen teossa. Myös yleistysten teko on vaikeaa tutkimuksen avoimuuden ja monimutkaisuuden vuoksi. Arvioijat pitävät menetelmän heikkoutena sitä, että tutkimuksia tehdään pienillä otoksilla, jolloin otos ei riitä kuvaamaan perusjoukkoa kvantitatiivisen tutkimuksen tavoin.⁵³

Kehittämistutkimuksen vahvuutena pidetään mahdollisuutta hyödyntää molempia, määrällistä ja laadullista tutkimusmenetelmää yhtä aikaa. Tällaisessa monimenetelmäisessä

tutkimusmenetelmässä, joka on esimerkki triangulaatiosta, laadullisia havaintoja voidaan tukea määrällisten mittausten avulla. Monimenetelmäinen tutkimus tuottaa tutkittavasta ilmiöstä kokonaisvaltaisen kuva, jolloin tutkimuksen luotettavuus luonnollisesti paranee. Vahvuudeksi katsotaan myös kehittämistutkimuksen käytännönläheisyys. Menetelmällä saadaan käytäntöön siirrettävää tietoa tutkimuksen jokaisessa vaiheessa.⁵³

Kehittämistutkimuksen luotettavuutta parantavat triangulaation lisäksi kehittämissykkien ja testausten määrät sekä standardoitujen mittarien käyttäminen. Olennainen luotettavuutta parantava tekijä on myös tutkimuksen huolellinen dokumentointi ja raportointi. Lähtökohta tasokkaalle kehittämistutkimukselle on kokonaisvaltainen ongelma-analyysi.⁵³

Kehittämistutkimus on menetelmänä nuori ja se tulee ottaa huomioon luotettavuutta arvioidessa. Nuoruutensa vuoksi kehittämistutkimukselle ei ole ehtinyt syntyä vahvaa tutkimusperinnettä ja menetelmän käyttöön liittyvät ainakin seuraavat ratkaisemattomat kysymykset:

Mihin epistemologiaan kehittämistutkimus pohjautuu?

Miten kvantitatiiviset ja kvalitatiiviset tutkimusmenetelmät sovitetaan mielekkäästi yhteen?

Miten löydetään tasapaino käytännön ja teorian välillä?

Miten kehittämisessä määritellään yhteisymmärryksen taso?

Miten vältytään tutkijan vaikutukselta tutkimuksen aikana ja raportoidessa?

Miten yksittäisistä tutkimuksista saadut tulokset saadaan siirrettyä yleiseen käyttöön?⁵³

12 TUTKIMUSAINEISTO

Analyysiin valittiin lukion kemian kirjasarjoista uuden opetussuunnitelman mukainen Mooli, koska sarja on ainoa, josta on ilmestynyt kirjat kaikille syventäville kursseille. Tutkimuksen aihe keskittyi kursseille Reaktiot ja energia (Mooli 3), Materiaalit ja teknologia (Mooli 4), joten oppikirjojen tarkastelussa keskityttiin näihin kursseihin. Kurssilla Reaktiot ja tasapaino (Mooli 5) käsitellään reaktion nopeuteen vaikuttavia tekijöitä, kuten katalyytti, joten Mooli 5 otettiin mukaan analyysiin. Oppimateriaalin analyysiin sisällytettiin myös Opetus.tv ja lisäksi perehdyttiin, miten katalyytti ja katalyyysi ovat näkyneet kemian ylioppilaskirjoituksissa vuosina 2008-2018.

13 LUKION OPETUSSUUNNITELMAN PERUSTEET

Lukion opetussuunnitelmalla tarkoitetaan suunnitelmaa lukioiden opetuksen järjestämisestä. (LOPS 2015) Suomessa opetussuunnitelman perusteet laatii Opetushallitus. Opetussuunnitelma pohjautuu lukiolakiin -ja asetukseen, oppilas- ja opiskelijahuoltolakiin sekä valtioneuvostoon asetukseen tuntijaosta ja valtakunnallisista tavoitteista. Lukiokoulutusta järjestävien organisaatioiden on järjestettävä opetuksensa opetussuunnitelman mukaisesti. Lukion opetussuunnitelma 2015 otettiin käyttöön 1.8.2016 alkaen ja tämän tutkimuksen oppimistavoitteita tarkastellaan nykyisen opetussuunnitelman mukaisesti.⁴⁴

Opetussuunnitelma asettaa kaikille oppiaineille yhteiset oppimistavoitteet, joita kutsutaan aihekokonaisuuksiksi. Ne ovat yhteiskunnan merkittäviä kasvatus- ja koulutushaasteita ja aihekokonaisuuksiin sisältyy myös ajankohtaisia arvokannanottoja. Käytännössä aihekokonaisuuksilla tarkoitetaan teemoja, jotka ylittävät oppiainerajat. Lisäksi aihekokonaisuus käsittää laaja-alaisia osaamisalueita.⁴⁴

Kaikille lukioille yhteisiä aihekokonaisuuksia ovat:

- aktiivinen kansalaisuus, yrittäjyys ja työelämä
- hyvinvointi ja turvallisuus
- kestävä elämäntapa ja globaali vastuu
- kulttuurien tuntemus ja kansainvälisyys
- monilukutaito ja mediat
- teknologia ja yhteiskunta⁴⁴

Nämä aihekokonaisuudet tulee olla osallisena kaikkien oppiaineiden opetuksessa. Aihekokonaisuuksien lisäksi opetussuunnitelmassa oppiaineilla on omat tarkemmat oppimistavoitteensa.⁴⁴

Kestävä elämäntapa ja globaali vastuu- aihekokonaisuuden tarkoituksena on kannustaa ja ohjata lukiolaisia kestävään elämäntapaan. Tällä tavoitellaan hyvän elämän turvaamista nykyisille ja tuleville sukupolville ulottuen paikalliselta tasolta aina globaalille tasolle asti. Aihekokonaisuudella pyritään kasvattamaan lukiolaisia vastuullisiksi toimijoiksi, joilla on taito ja tahto toteuttaa kestävä kehityksen mukaista elämäntapaa. Tavoitteena on, että opiskelija tuntee ilmastonmuutokseen, luonnonmonimuotoisuuteen, ympäristön kantokykyyn ja luonnonvarojen rajallisuuteen vaikuttavia

tekijöitä. Näillä puolestaan tavoitellaan, että opiskelija ymmärtää perusasiat kestävä elämäntavan ekologisesta, taloudellisesta sekä sosiaalisesta ja kulttuurisesta sektorista ja ymmärtää, että näiden on oltava tasapainossa, jotta kestävä elämäntapa olisi mahdollista.⁴⁴

Katalyysireaktiot ovat nykyisin merkittävässä roolissa yhteiskunnan ympäristö- ja energiakysymyksissä, ruoan tuotannossa sekä veden puhdistamisessa.⁶ Katalyysireaktioita käytetään esimerkiksi polttoaineiden valmistuksessa ja auton katalysaattoreissa vähentämään haitallisia päästöjä.⁵ Tulevaisuudessa katalyysireaktioiden avulla pyritään muokkaamaan nykyisiä tuotantoprosesseja saasteettomiksi tai ympäristöystävällisemmiksi sekä minimoimaan tuotantoprosessien energiankulutus.⁶ Katalyysireaktiosta toivotaan ratkaisua myös maailman ruoka- ja vesipulaan sekä uusien kestävien, kierrätettävien ja turvallisten materiaalien ja energiamuotojen tuottamiseen.⁵ Siten katalyysi-ilmiö liittyy tärkeänä asiana globaaliin vastuuseen ja kestäväan elämäntapaan ja on edellä mainituista syistä tärkeää sisällyttää lukion kemian opetukseen.

Sana teknologia määritellään tiedoksi työstä ja määritelmään kuuluu ainakin kolme näkökulmaa: työvälineet, työtavat sekä asiantuntemus.⁵⁵ Teknologia ja yhteiskunta- aihekokonaisuus tarkoittaa teknologian ja yhteiskunnan välistä vuorovaikutusta. Aihekokonaisuuden tarkoituksena on tarjota lukiolaiselle mahdollisuus syventää ymmärrystään teknologian ja yhteiskunnan suhteesta ja miten ihminen rakentaa maailmaa teknologian avulla.⁴⁴

Ammoniakin katalyyttinen synteesi toimii oivana esimerkkinä siitä, miten ihminen on rakentanut maailmaa teknologian avulla. Historian saatossa keksittiin katalyysireaktiot, joista yksi merkittävimmistä on katalyyttinen ammoniakkisynteesi alkuaineistaan vedystä ja typestä raudan toimiessa katalyyttinä. Reaktion avulla saatiin lannoiteteollisuus kasvamaan ja sitä kautta maatalouden tuotto nousemaan. Tämä taas merkitsi huomattavaa ravinnonsaannin lisääntymistä ympäri maailman.¹⁴ Katalyysiä on hyödynnetty teollisessa mittakaavassa 1900-luvulta lähtien¹³ ja nykyisin katalyysi on mukana lähes kaikissa kemian teollisuuden prosessissa.⁵ Siten kemian opetuksen näkökulmasta, katalyysi ja katalyytit ovat tärkeitä aiheita liittää mukaan kemian opetukseen.

13.1. Katalyyysi ja katalyytit lukion uudessa opetussuunnitelmassa

Kemian opetuksen tavoitteiden mukaan lukiolaisen tulisi saada mahdollisuuksia perehtyä kemian soveltamiseen monipuolisissa tilanteissa kuten esimerkiksi luonnossa ja elinkeinoelämässä. Lukion kemian oppimäärän suorittaneen oppimistavoitteena on osata arvioida kemian ja siihen liittyvän teknologian merkitystä yksilön ja yhteiskunnan kannalta.⁴⁴ Näiden oppimistavoitteiden perusteella katalyytti ja katalyysireaktiot voidaan laskea kuuluvaksi tärkeinä asioina lukion kemian opetukseen.

13.1.1. Kemiaa kaikkialla

Kemiaa kaikkialla on pakollinen kurssi lukion uudessa opetussuunnitelmassa, LOPS 2015:ssa. Kurssin tavoitteisiin on asetettu, että kurssi kehittää valmiuksia osallistua kemiaan liittyvään yhteiskunnalliseen keskusteluun. Kurssin aikana lukiolaisen tulisi saada kokemuksia, jotka herättävät ja syventävät kiinnostusta kemiaa ja sen opiskelua kohtaan. Lisäksi kurssin keskeisiin sisältöihin kuuluu kemian merkitys nykyaikana, jatko-opinnoissa ja työelämässä.^{44,56} Kaikissa edellä mainituissa katalyyysi on tärkeä ilmiö.

Kurssin tavoitteena on, että opiskelija

- saa kokemuksia, jotka herättävät ja syventävät kiinnostusta kemiaa ja sen opiskelua kohtaan
- kehittää valmiuksia osallistua kemiaan liittyvään yhteiskunnalliseen keskusteluun
- osaa käyttää ja soveltaa tietoa aineiden ominaisuuksista jokapäiväisen elämän ja ympäristön ilmiöissä
- osaa tutkia kokeellisesti ja erilaisia malleja käyttäen erilaisia kemian ilmiöitä sekä ottaa huomioon työturvallisuusnäkökohdat
- osaa käyttää aineen ominaisuuksien päättelyssä aineen rakenteen malleja, jaksollista järjestelmää ja tietolähteitä.⁴⁴

13.1.2. Ihmisen ja elinympäristön kemiaa

Oppimistavoitteiden perusteella ensimmäinen syventävä kurssi, Ihmisen ja elinympäristön kemiaa, ei suoranaisesti edellytä katalyytin ja katalyyysin esittämistä opetuksessa. Kurssin yksi keskeinen sisältö on kemian merkitys hyvinvoinnin ja terveyden kannalta.^{44,57} Kurssin tarkoituksena on ensisijaisesti tutustua kemian hyvinvointia tuottaviin tuotteisiin eikä niiden valmistukseen. Joten

vaikka katalyyssiä hyödynnetään esimerkiksi ihmisen hyvinvointia ja elämänlaatua parantavien tuotteiden kuten hienokemikaalien ja farmaseuttisten valmisteiden valmistukseen,^{3,17} kurssien oppimistavoitteiden perusteella katalyyssi ei ole olennainen asia kurssin opetuksessa.

Kurssin tavoitteena on, että opiskelija

- osaa käyttää ja soveltaa orgaanisiin yhdisteisiin ja ainemäärään liittyviä käsitteitä jokapäiväisen elämän, ympäristön, yhteiskunnan ja teknologian ilmiöissä
- osaa tutkia kokeellisesti ja erilaisia malleja käyttäen orgaanisiin yhdisteisiin, ainemäärään ja pitoisuuteen liittyviä ilmiöitä
- ymmärtää, kuinka kemiallinen tieto rakentuu kokeellisen toiminnan ja siihen kytkeytyvän mallintamisen kautta • osaa käyttää tieto- ja viestintäteknologiaa mallintamisen välineenä.⁴⁴

13.1.3. Reaktiot ja energia

Kurssin tavoitteena on, että lukiolainen osaa käyttää ja soveltaa reaktioihin liittyviä käsitteitä jokapäiväisen elämän, ympäristön, yhteiskunnan ja teknologian ilmiöissä.⁴⁴ Reaktiotyyppejä käsiteltäessä olisi äärimmäisen tärkeää tuoda esille myös niiden käytännön merkitys kemian teollisuudelle ja yhteiskunnalle, jotta kurssille asetetut tavoitteet saavutettaisiin. Katalyysireaktioita hyödynnetään lähes kaikissa kemian teollisuuden prosesseissa⁵, joten tässä yhteydessä olisi luonnollista opettaa myös katalyyssi-ilmiö.

Kurssin tavoitteeksi on asetettu myös aineen ja energian häviämättömyyden ymmärtäminen kemiassa.⁴⁴ Koska kurssilla ei käsitellä reaktion nopeuteen vaikuttavia tekijöitä, vaan kuuluvat kurssille Reaktiot ja tasapaino, on katalyytin vaikutus mielekästä käsitellä tuolla kurssilla tai kurssilla Materiaalit ja teknologia, kun Mooli 4 esittelee katalyytit siirtymämetallien yhteydessä.

Kurssin keskeisiin sisältöihin kuuluu kemian merkitys energiaratkaisujen ja ympäristön kannalta.⁴⁴ Katalyyssia hyödynnetään erityisesti polttoaineiden valmistuksessa, autojen katalysaattorissa sekä veden puhdistuksessa,^{5,6} joten ympäristön ja energiaratkaisujen kannalta aihe on hyvin keskeinen asia kurssin opetuksessa.

Kurssin tavoitteena on, että opiskelija

- osaa käyttää ja soveltaa reaktioihin liittyviä käsitteitä jokapäiväisen elämän, ympäristön, yhteiskunnan ja teknologian ilmiöissä
- osaa tutkia kokeellisesti ja erilaisia malleja käyttäen reaktioihin liittyviä ilmiöitä
- ymmärtää aineen ja energian häviämättömyyden merkityksen kemiassa.⁴⁴

13.1.4. Materiaalit ja teknologia

Kolmannen syventävän kurssin oppimistavoitteena on, että lukiolainen osaa käyttää ja soveltaa materiaaleihin ja teknologiaan liittyviä kemian käsitteitä jokapäiväisen elämän, ympäristön ja yhteiskunnan ilmiöissä.⁴⁴ Entsyymit toimivat katalyytteina monissa elimistön reaktioissa esimerkiksi ruoansulatuksessa. Ilman biologisia katalyytteja elämä ei olisi mahdollista.⁶ Ympäristössä tapahtuu lukuisia katalyyttisiä reaktiota, esimerkkinä ilmakehän otsonin hajoaminen kloorin katalysoimana. Kurssin keskeinen sisältö, kemian merkitys teknologiassa ja yhteiskunnassa, perustelee, miksi katalyytit ja katalyysi kuuluvat kurssin sisältöihin. Katalyysireaktioiden avulla pyritään löytämään ratkaisuja vaikeisiin ympäristö- ja energiakysymyksiin tuottamalla uusiutuvaa ja turvallista energiaa sekä uusia kestäviä materiaaleja.⁵

Kurssin tavoitteena on, että opiskelija

- osaa käyttää ja soveltaa materiaaleihin ja teknologiaan liittyviä kemian käsitteitä jokapäiväisen elämän, ympäristön ja yhteiskunnan ilmiöissä
- osaa tutkia kokeellisesti ja malleja käyttäen materiaaleihin ja sähkökemian liittyviä ilmiöitä
- harjaantuu ilmaisemaan itseään kemialle ominaisilla tavoilla ja analysoimaan eri tietolähteiden argumentointia
- osaa käyttää tieto- ja viestintäteknologiaa tuotosten muodostamisessa.⁴⁴

13.1.5. Reaktiot ja tasapaino

Katalyytti ja katalyysi sisältyvät kurssin oppimistavoitteisiin siten, että lukiolaisen tulee osata käyttää ja soveltaa reaktioiden ja kemiallisen tasapainon käsitteitä jokapäiväisen elämän, ympäristön, yhteiskunnan ja teknologian ilmiöissä. Oppimistavoite on lähes sama kuin materiaalit ja teknologia

kurssilla, mutta tällä kurssilla keskitytään tarkastelemaan enemmän kemiallista tasapainoa. Uutena asiana kurssilla käsitellään reaktion nopeuteen vaikuttavia tekijöitä. Tässä yhteydessä käsitellään myös katalyytti.⁴⁴

Kurssin keskeisissä sisällöissä mainitaan kemian merkitys kestävän tulevaisuuden rakentamisessa.⁴⁴ Katalyytteja ja katalyysireaktioita tarvitaan uusiutuvan energian valmistukseen, nykyisten kemiallisten prosessien muokkaamista saasteettomiksi tai huomattavasti vähentämään saasteiden määrää. Lisäksi on tärkeää pyrkiä muokkaamaan prosesseja niin, että ne kuluttavat mahdollisimman vähän energiaa. Myös biomassojen jalostuksessa katalyysillä tulee olemaan tulevaisuudessa merkittävä rooli.⁶ Näillä perusteluilla katalyytit ja katalyysi kuuluvat opetussuunnitelmaan.

Kurssin tavoitteena on, että opiskelija

- osaa käyttää ja soveltaa reaktioiden ja kemiallisen tasapainon käsitteitä jokapäiväisen elämän, ympäristön, yhteiskunnan ja teknologian ilmiöissä
- osaa tutkia kokeellisesti ja malleja käyttäen reaktioihin ja kemialliseen tasapainoon liittyviä ilmiöitä
- osaa käyttää laskennallisia ja graafisia malleja reaktionopeuden ja kemiallisen tasapainon kuvaamisessa, selittämisessä ja ennusteiden tekemisessä.⁴⁴

14 KATALYYSI JA KATALYYTIT OPPIMATERIAALEISSA

Oppimateriaali, jotka tutkimukseen valittiin, analysointiin aineistolähtöisellä sisällönanalyysillä. Analyysiyksikköinä käytettiin sanoja katalyytti ja katalyysi sekä niihin liittyviä ilmauksia.

14.1. Mooli 3

Toisella syventävällä kemian kurssilla opetellaan, miksi kemiallinen reaktio tapahtuu, reaktioyhtälön kirjoittaminen, tasapainottaminen, tulkitseminen ja käyttö. Reaktionopeuteen vaikuttavia asioita, johon myös katalyytti kuuluu, ei käsitellä. Sen sijaan kurssilla tutustutaan erilaisiin reaktiotyyppeihin ja opetellaan kemiallisen reaktion energiamuutokset. Reaktiotyyppien yhteydessä kurssikirjassa esitellään, tosin hyvin pintapuolisesti, mitä eri reaktiotyypeillä valmistetaan tai mihin niitä hyödynnetään. Katalyysiä tai katalyyttien käyttöä ei kirjassa mainita.⁵⁸

14.2. Mooli 4

Kurssilla materiaalit ja teknologia keskitytään tutustumaan erilaisiin materiaaleihin, niiden käyttöön ja elinkaareen sekä sähkökemian sovelluksiin. Kurssi esittelee lyhyesti myös Suomen teknologiateollisuutta ja mitä nanotiede on. Katalyytti tulee esille ensimmäisen kerran kurssin kirjan johdannossa, joka esittelee nanotiedettä. Johdannossa kerrotaan nanoputkista ja tässä yhteydessä mainitaan, että nanoputket ovat hyviä katalyyttejä, koska ne ovat hyvin kestäviä ja niillä on suuri pinta-ala partikkelikokoonsa nähden.¹⁸

Kirjan luvussa 2 käsitellään hapettumis-pelkistymisreaktioita ja sähkökemian. Kappaleen alussa tuodaan esille, että maapallon lisääntynyt energiatarve ja fossiilisten polttoaineiden korvaaminen ekologisimmilla energiamuodoilla ovat oleellisesti lisänneet kemiallisten energialähteiden tutkimus- ja kehitystyötä.¹⁸ Vihreän kemian keskeisimpiä tavoitteita on pyrkiä kehittämään tehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä energiaratkaisuja katalyysejä hyödyntäen.^{2,5} Luvussa 2 jatketaan, että tutkimus- ja kehitystyön tavoitteena on kehittää kestävä kehityksen mukaisia ympäristöystävällisempiä energialähteitä, jotka ovat osana kiertotaloutta.¹⁸

Seuraavan kerran kirjassa mainitaan katalyytti polttokennojen yhteydessä kappaleessa 2.3, joka käsittelee sähkökemiallisia pareja. Kappaleessa kerrotaan, että polttokennojen käyttäminen energiantuottamiseen on ongelmallista muun muassa niissä käytettävien katalyyttien korkeiden hintojen vuoksi. Luvun 4 aiheena ovat erilaiset materiaalit. Siirtymämetalleja käsittelevässä kappaleessa 4.2. kerrataan siirtymämetallien ominaisuudet ja tuodaan esille niiden keskeinen merkitys ihmiskunnan historiassa. Kappaleessa mainitaan, että 1900-luvulla tehtiin metallien sivuryhmien metalleihin liittyvä keksintö: niitä voidaan käyttää katalyytteinä. Lisäksi jatketaan, että keksintö mahdollisti useiden kemian prosessien kehittämisen taloudellisesti kannattavammaksi. Kappaleessa kerrotaan, että nykyisin yli 90 % kemianteollisuudesta hyödyntää sivuryhmien metalleja, joita ovat esimerkiksi titaani, nikkeli, kromi, koboltti, niobium ja tantaali sekä terästeollisuudessa tärkeimmät käytettävät siirtymämetallit raudan ja kuparin.¹⁸

Siirtymämetallien ominaisuuksista Mooli 4:ssä kerrotaan, että siirtymämetallit ovat hyviä ja tärkeitä katalyyttejä. Kirjassa annetaan erimerkkejä prosesseista ja synteeseistä, joissa mitäkin siirtymämetallikatalyyttiä käytetään. Rautaa käytetään ammoniakkin valmistuksessa, nikkeliä, palladiumia ja platinaa hyödynnetään esimerkiksi kasviöljyjen hydrauksessa. Platinaa ja rodiumin käytetään typpihapon valmistuksessa ja lejeerinkeinä autojen katalysointoreissa. Elimistössä siirtymämetallit toimivat entsyymien eli biokatalyyttien aktivaattoreina.¹⁸

14.3. Mooli 5

Kemian viimeisen syventävän kurssin, Reaktiot ja tasapaino, keskeisiä teemoja ovat kemian merkitys arkielämän, yhteiskunnan ja teknologian ilmiöissä sekä kestäväen tulevaisuuden rakentamisessa. Kemiällisen reaktion nopeus, tasapainoreaktiot ja niiden laskennallinen käsittely ovat kurssin tärkeimpiä sisältöjä.⁵⁹

Ensimmäisen kerran katalyytti esitellään kirjan johdantokappaleessa, jossa kerrotaan lyhyesti teollisuuden ja solujen kemiallisista reaktioista. Johdannossa kerrotaan, että kemianteollisuudessa tuotteiden valmistus optimoidaan, jotta tuotteita saadaan mahdollisimman paljon mahdollisimman nopeasti. Lisäksi jatketaan, että teollisuuden valmistusprosesseissa huomioidaan taloudellisuus, kierrätys ja ympäristövaikutukset. Johdannossa esitellään myös kemian tutkimuskohteita, joista yksi tärkeä sektori on tehokkaiden katalyyttien kehittäminen. Aiheesta jatketaan kertomalla, että reaktiomekanismien tutkiminen on yksi kemian tärkeimmistä tutkimuskohteista, koska reaktiomekanismien yksityiskohtainen tunteminen mahdollistaa reaktionopeuden säätelyn esimerkiksi katalyyttien avulla.⁵⁹

Johdannossa mainitaan entsyymien olevan katalyytteja ja solujen olevan kemiantehtaita, joissa tapahtuu valtavasti entsyymien katalysoimia biokemiallisia reaktioita. Johdannossa kerrotaan, että entsyymit ovat huomattavasti tehokkaampia kuin kemistien kehittämät katalyytit ja entsyymikatalyyttien eduksi teollisuuden katalyytteihin verrattuna mainitaan, että entsyymien katalysoimissa reaktioissa ei synny ei-toivottuja sivutuotteita, joita kaikissa teollisuuden prosesseissa syntyy. Lisäksi johdannossa kerrotaan, että soluissa tapahtuu samanaikaisesti useita entsyymien katalysoimia reaktioita ja että reaktioissa muodostuvat lopputuotteet toimivat lähtöaineina uusille reaktioille. Lopuksi johdannossa todetaan, että nämä lukuisat reaktiot muodostavat kemiallisen perustan elämäämme.⁵⁹

Mooli 5:n luvussa 1 käsitellään kemiallisen reaktion nopeutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä kuten katalyytti. Kappaleessa 1.1. Mooli 5:ssa tuodaan esille, että kemiallisten reaktioiden nopeuttaminen katalyyttien avulla on useimmiten energian säästymisen vuoksi taloudellisempaa kuin käyttää korkeita lämpötiloja, joita reaktiot ilman katalyytin käyttöä edellyttävät. Tähän kappaleessa 1.1. lisätään, että katalyyttien käyttö mahdollistaa myös sellaisten reaktioiden hyödyntämisen, joissa lähtöaineet tai reaktiotuotteet hajoavat helposti korkeassa lämpötilassa. Kappaleessa 1.1. kerrotaan

katalyyttien reaktioita nopeuttavan vaikutuksen perustuvan aktivoitumisenergian pienenemiseen, jolloin siirtymäkompleksin muodostumiseen tarvitaan vähemmän energiaa.⁵⁹

Katalyytin määritelmään on Mooli 5:ssä liitetty kuva, joka havainnollistaa reaktion energian käyttäytymistä reaktion edetessä. Kuvaan on piirrettynä kuvaaja sekä katalyytin kanssa, että ilman. Lisäksi kuvaajasta, jossa katalyytti on mukana, nähdään, että reaktiossa on mukana useita välivaiheita eikä reaktio etene suoraviivaisesti. Kuvasta nähdään myös, ettei katalyytillä ei ole vaikutusta reaktion lähtötuotteiden tai lopputuotteiden energiaan.⁵⁹

Katalyyttien ominaisuuksista kappaleessa 1.1. mainitaan, että niiden etu vähäisemmän energian kulutuksen lisäksi on kulumattomuus, jolloin katalyyttejä voidaan hyödyntää prosessissa uudelleen ja uudelleen, kunnes katalyytti menettää tehonsa. Kappaleen erillisessä muistatko-osiossa Mooli 5:ssä muistutetaan siirtymämetallien olevan teollisuuden tärkeitä katalyyttejä.⁵⁹

Mooli 5:n kappaleessa 1.1 määritellään myös käsitteet homogeeninen ja heterogeeninen katalyytti. Kappaleessa 1.1. jatketaan, että teollisuus hyödyntää erityisesti heterogeenisiä katalyyttejä ja mainitsee esimerkkinä ammoniakksynteesin, jossa kiinteä rauta toimii katalyyttinä kaasumaisille vedylle ja typelle. Lisäksi kappaleessa 1.1. on taulukoituna muutamia metallikatalyyttien ja niiden yhdistelmien sovelluksista.

Kappaleen 1.1. lopussa, tiedätkö-osiossa, kysytään että, tietääkö lukija, että auton katalysaattorissa käytetään hienojakoista platina-palladium-rhodium-katalyyttiä levitettynä hunajakennon kaltaiselle keraamiselle pinnalle. Kirjassa on myös kuva katalysaattorista ja kuvatekstissä kerrotaan katalyytin nopeuttavan polttoaineen palamisreaktiossa syntyvien typen oksidien hajoamista hapeksi ja typeksi. Lisäksi kuvatekstissä mainitaan pakokaasussa olevien hiilivetyjen palamisen hiilidioksidiksi ja vedeksi sekä hiilimonoksidin hapettumisen hiilidioksidiksi nopeutuvan.⁵⁹

Luvun 2 aiheena on tasapainoreaktiot. Mooli 5:ssä käytetään esimerkkinä tasapainoreaktioista raudan katalysoimaa ammoniakksynteesiä. Luvun johdannossa kerrotaan, että saksalainen kemisti Fritz Haber alkoi kehittää ammoniakksynteesiä vuonna 1912, jotta syntyvästä ammoniakista voitaisiin valmistaa typpipitoisia lannoitteita, joita kasvit pystyisivät käyttämään typen lähteenä. Johdannossa pohjustetaan typpipitoisten lannoitteiden tarvetta kertomalla, että 1800-luvun lopulla maatalous lisääntyi voimakkaasti. Luvun johdannossa mainitaan myös, että ammoniakksynteesin avulla voitiin valmistaa typpiyhdisteitä typpihapon ja erilaisten räjähteiden valmistamiseen.⁵⁹

Luvun 2 kappaleen 2.1. tiedätkö-osiossa kerrotaan ammoniakkisynteesin olevan edelleen yksi merkittävimmistä kemianteollisuuden prosesseista. Ammoniakkisynteesistä kerrotaan, että aluksi aiemmin mainittu synteesin kehittäjä Fritz Haber onnistui valmistamaan ammoniakkia vain 100g. Vuonna 1913 ammoniakkia tuotettiin jo 30 tonnia vuorokaudessa ja nykyisin päästään jopa 1500 tonnin vuorokausituottoon.⁵⁹

Seuraavaksi katalyytti mainitaan luvun kaksi kappaleessa 2.3, joka käsittelee tasapainotilan säätelyä ja tasapainovakion muutoksia. Kappaleessa käydään läpi, mitkä tekijät vaikuttavat tasapainotilaan ja mitä tarkoitetaan Le Châtelier'n periaatteella. Lisäksi kappaleessa 2.3. täsmennetään, että Le Châtelier'n periaatteen avulla voidaan ennustaa, miten olosuhteiden muutokset vaikuttavat reaktion tasapainotilaan.⁵⁹

Kappaleessa 2.3. kerrotaan katalyyttien vaikuttavan tasapainoreaktioihin siten, että ne nopeuttavat sekä eteneviä että palautuvia reaktioita, joten katalyytit nopeuttavat tasapainotilan syntymistä. Jatkoksi edelliseen huomautetaan, että katalyytti ei vaikuta syntyvien reaktiotuotteiden määrään eikä tasapainovakion arvoon. Esimerkiksi tasapainoreaktiosta, jossa käytetään katalyyttiä, esitetään aiemmin esimerkkinä toiminut ammoniakkisynteesi. Kappaleen Tiedätkö-osiossa kerrotaan, että ammoniakkisynteesin aikana syntyvää ammoniakkia poistetaan synteesistä jatkuvasti, koska ammoniakkin poisto häiritsee tasapainotilassa olevaa systeemiä, jolloin ammoniakkin saanto paranee.⁵⁹

14.4. Opetus.tv

Opetus.tv on nettisivusto, joka sisältää teoriaa sekä niihin liittyviä esimerkkejä matematiikasta, fysiikasta, kemiasta ja biologiasta. Kohderyhmänä Opetus.tv:llä ovat lukiolaiset, joten sisältö on keskittynyt lukion aihepiireihin. Opetus.tv:n materiaalin tekijöitä ovat muutama suomalainen luonnontieteen opettaja. Sivuston tarkoituksena on tarjota opiskelijoille mahdollisuus itsenäiseen opiskeluun ja toimia opettajien tukena.⁶⁰ Seuraavassa käydään läpi, miten opetus.tv käsittelee aiheita katalyytti ja katalyyysi. Opetus.tv:n materiaalit on laadittu aiemman lukion opetussuunnitelman (LOPS 2003) pohjalta.

Opetus.tv:n materiaaleista katalyytti löytyy kurssilta KE3, Reaktiot ja energia, joissa katalyytti tulee esille aktivaatioenergian käsittelyn yhteydessä. Materiaalissa katalyytin lisäyksen kerrotaan laskevan aktivaatioenergiaa ja siten nopeuttavan kemiallista reaktiota pysyen itse muuttumattomana ja

kulumatta reaktion aikana. Tietoa täsmennetään seuraavasti: laskemalla aktivaatioenergiaa katalyytin käyttö tarjoaa reaktiolle uuden reitin, kun uudessa tilanteessa yhä useammalla törmäyksellä on tarpeeksi energiaa matalamman aktivaatioenergiakynnyksen ylittämiseen. Materiaalissa kerrotaan lisäksi, että yleensä hyvin pieni määrä katalyyttiä riittää aktivoimaan reaktion eikä katalyytin käytöllä ole mitään vaikutusta reaktiossa tapahtuvan entalpian muutokseen. Reaktioesimerkkinä käytetään ammoniakkisynteesiä ja katalyytin vaikutus aktivaatioenergia esitetään myös kuvana.⁶⁰

Katalyytin opetus.tv käsittelee myös aktivaatioenergian yhteydessä, heti katalyytin jälkeen. Katalyyteistä määritellään katalyytityypit homogeeninen sekä heterogeeninen katalyyti. Lisäksi materiaalissa kerrotaan, että elimistön katalyyteinä toimivat entsyymit, ja kehossa tapahtuu useimmiten homogeeninen katalyyti.⁶⁰ Opetus.tv:ssä on myös jonkin verran aiheita yläkoulun kemiasta. Kemiallisen reaktion nopeuteen vaikuttavina tekijöinä mainitaan pinta-ala, lämpötila sekä konsentraatio mutta katalyyttiä yläkoulun materiaaleissa ei mainita.⁶⁰

<https://opetus.tv/kemia/ke3/aktivaatioenergia/>

14.5. Kemian ylioppilaskirjoitukset 2008-2018

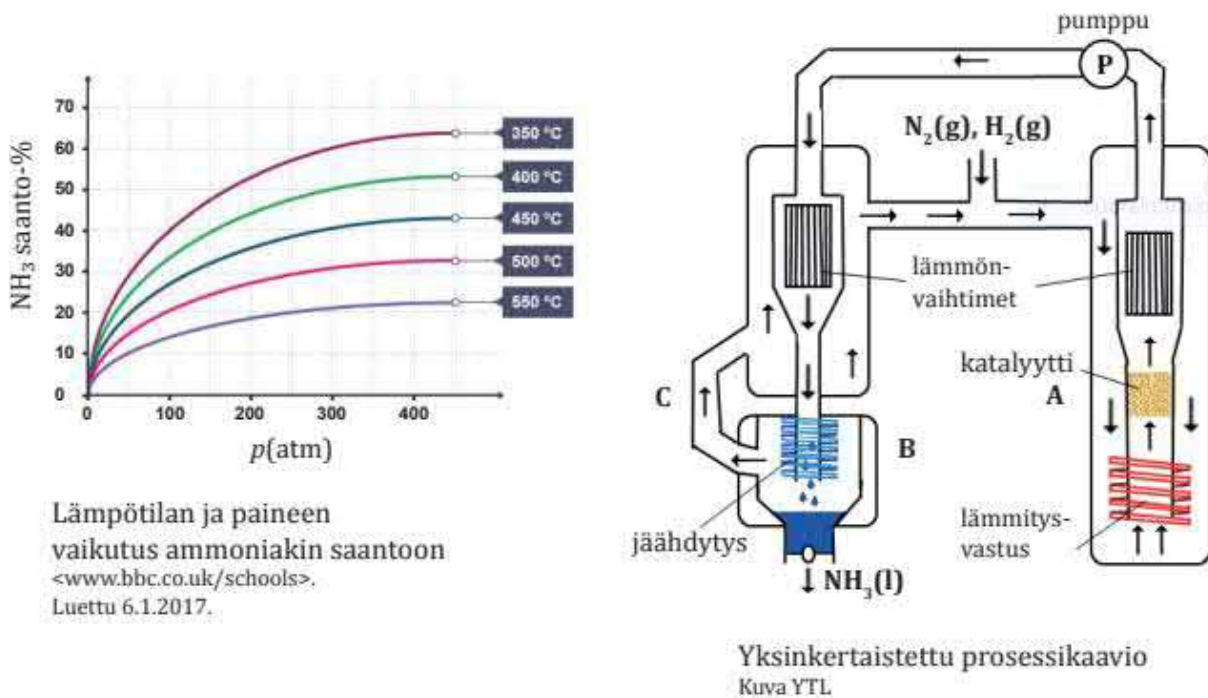
Ennen 2010-lukua tehtävistä löytyy yksi kysymys, joka liittyy katalyytiin ja vuoden 2010 jälkeen ylioppilastutkintolautakunta on laatinut muutaman kysymyksen aiheisiin liittyen.⁶¹ Seuraavassa käydään läpi, millaisia kysymyksiä katalyyteistä ja katalyyteistä on esitetty.

Syksyn 2008 kokeessa jokeritehtävässä 11 kysyttiin, miten ammoniakkia valmistetaan teollisuuden tarpeisiin, ja miten sitä voidaan tehdä laboratorio-oloissa. Seuraavan kerran katalyyti on esiintynyt ylioppilaskirjoituksissa vuonna 2015 jokeritehtävän 12 a-kohdassa.

Kysymyksen alustus: ”Saksalainen Fritz Haber (1868–1934) tunnetaan työstään ammoniakkisynteesin $2 \text{N}_2 (\text{g}) + 3 \text{H}_2 (\text{g}) \rightleftharpoons 2 \text{NH}_3 (\text{g})$ kehittäjänä. Haber sai Nobelin-palkinnon vuonna 1918, ja häntä kutsuttiin mieheksi, joka ”tekee leipää ilmasta”. Ensimmäisessä maailmansodassa kauppasaarto esti tyyppiyhdisteiden tuonnin Etelä-Amerikasta Saksaan. Haber-Bosch-menettelyn on arvioitu pidentäneen ensimmäistä maailmansotaa jopa 18 kuukaudella.”

Alustuksen jälkeen kokeessa kysyttiin, miksi ammoniakin teollisella tuotannolla oli tuolloin ja on edelleen suuri merkitys. Lisäksi pyydettiin antamaan esimerkkejä ammoniakista valmistettavista yhdisteistä ja niiden käyttökohteista.⁶¹ <https://yle.fi/aihe/artikkeli/2015/12/15/2008-syksy-kemia>

Keväällä 2018 jokeritehtävässä 12 palattiin jälleen ammoniakkisynteesiin. Tehtävässä piti vastata kysymyksiin alla olevan prosessikaavion ja kuvaajan perusteella.



Kuva 5: Vasemmanpuoleisessa kuvaajassa kuvataan lämpötilan ja paineen vaikutusta ammoniakin saantoon. Oikeanpuoleinen kaavio esittää yksinkertaistettua prosessikaaviota ammoniakin valmistuksesta.⁶¹

Miten paine ja lämpötila vaikuttavat ammoniakin saantoon ja tasapainovakion arvoon? Mitä tapahtuu prosessin vaiheissa A, B ja C, jotka on merkitty oheiseen ammoniakin teollisen tuotannon prosessikaavioon? Analysoi koko tuotantoprosessin vaiheita reaktion nopeuteen vaikuttavien tekijöiden ja Le Châtelier'n periaatteen avulla. Missä vaiheissa reaktion nopeus on suurimmillaan? Missä vaiheissa reaktio on tasapainossa? Miksi huokoisen rautakatalyytin kohdalla käytetään lämpötilaa 500 °C ja painetta 200 atm? Miten tuotanto saadaan mahdollisimman tehokkaaksi?⁶¹
<https://yle.fi/aihe/artikkeli/2018/03/06/2018-kevat-kemia>

Viimeisin kysymys katalyyteistä esitettiin syksyn 2018 ylioppilaskirjoituksissa. Tehtävässä 5 kysyttiin, mitkä tekijät vaikuttavat kemiallisen reaktion nopeuteen.⁶¹ Reaktion nopeuteen voidaan vaikuttaa monille tekijöillä ja yksi niistä on katalyytti.¹
<https://yle.fi/aihe/artikkeli/2018/09/04/2018-syksy-kemia>

14.6. Yhteenveto sisällönanalyysistä

Lähes kaikissa kemianteollisuuden prosesseissa hyödynnetään katalyysejä,² joten kurssilla Reaktiot ja energia reaktiotyyppejä opeteltaessa olisi luontevaa liittää opetukseen katalyyssi- ilmiö ja korostaa, että reaktiotyypistä huolimatta katalyyssi on käytössä lähes kaikissa kemian teollisuuden prosesseissa. Tällöin myös kurssin oppimistavoitteet^{44,58} olisi helpommin saavutettavissa ja opetuksessa olisi taustalla Mahaffyn nelitasomalli, jonka avulla opetukseen voi liittää sosiaalisen kontekstin, jonka ideana on osoittaa kemian liittyvän arkielämään. Sosiaalinen konteksti sisältää monipuolisen yhteiskunnallisen näkökulman muun muassa ympäristöllisiä, sosiaalisia, poliittisia ja taloudellisia huolen aiheita, jotka liittyvät kemian käsitteisiin, reaktioihin ja prosesseihin.³³

Mooli 4:ssa katalyyttejä käsitellään kohtalaisesti siirtymämetallikappaleen yhteydessä. Kirjassa keskitytään kertomaan, että siirtymämetallit ovat hyviä ja tärkeitä katalyyttejä ja kirjassa esitellään tärkeimpien metallien käyttöä katalyytteinä. Mooli 4:ssa ei käsitellä katalyyttien ominaisuuksia eikä metallien lisäksi mainita muita kemianteollisuuden käyttämiä katalyyttejä.

Mooli 5:ssa katalyytit otetaan esille heti kirjan johdantokappaleessa. Luettuaan johdannon opiskelija saa hyvin käsityksen, että katalyyteillä voidaan merkittävästi vaikuttaa reaktionopeuteen, koska kirjassa kerrotaan reaktiomekanismien tuntemisen mahdollistavan reaktionopeuden säätelyn esimerkiksi katalyyttien avulla. Johdannon aikana opiskelija saa myös tiedon, että katalyytitutkimus on yksi kemian tärkeimmistä tutkimuskohteista.

Johdannossa selviää myös, että kemianteollisuuden prosesseissa tulee huomioida taloudellisuuden lisäksi ympäristövaikutukset ja kierrätys. Katalyyttien vaikutus energiankulutukseen tuodaan selkeästi esille kertomalla, että katalyyttien käyttö säästää energiaa, kun reaktiot tapahtuvat katalyyttien avulla alhaisemmissa lämpötiloissa. Katalyyttien vaikutus kierrätyksessä tai ympäristönsuojelussa sen sijaan eivät tule Mooli 5:ssa esille.

Kirjan johdannossa esitellään entsyymit erittäin spesifisinä ja tehokkaina solujen katalyytteinä mutta termiä spesifinen ei käytetä. Johdannossa mainitaan myös, että entsyymien katalysoimia reaktioita tapahtuu jatkuvasti elimistössämme ja ympäristössämme. Tällä tiedolla painotetaan, että katalyyssireaktiot ovat elämälle välttämättömiä.

Katalyytin vaikutuksen kemialliseen reaktioon Mooli 5:ssä käsitellään täsmällisesti aktivoitumisenergian ja siirtymäkompleksin avulla. Kirjassa myös havainnollistetaan asiaa kuvaajan avulla, mikä helpottaa opiskelijaa ymmärtämään, miten reaktio etenee katalyytin kanssa ja ilman. Kuvasta opiskelija näkee myös, että katalyysireaktiot etenevät useiden välivaiheiden kautta ja ettei katalyytti vaikuta reaktion lähtöaineiden ja lopputuotteiden energiaan.

Käsitteet homogeeninen ja heterogeeninen katalyytti Mooli 5:ssä esitetään selkeästi. Lisäksi mainitaan, että erityisesti heterogeenisiä katalyyttejä hyödynnetään paljon kemianteollisuuden prosesseissa. Opiskellessaan kurssia Reaktiot ja tasapaino Mooli 5:n avulla, opiskelija saa hyvät tiedot katalyyttien vaikutuksesta kemialliseen reaktioon. Se, kuinka paljon ja monipuolisesti katalyyttejä nykyisin kemianteollisuuden prosesseissa käytetään, ei tule kirjassa selkeästi esille.

Kurssin aikana Mooli 5:ssä kerrotaan hyviä esimerkkejä katalyyttien käytöstä kuten esimerkiksi siirtymämetallien olevan tärkeitä katalyyttejä. Konkreettisenä esimerkkinä siirtymämetallikatalyyteistä esitetään auton katalysaattori. Esimerkkiin on liitetty kuva katalysaattorin kennomaisesta rakenteesta.

Mooli-sarjassa esitetään katalyyteistä olennaisia asioita kuten määritelmä ja niiden vaikutus kemialliseen reaktioon energian ja talouden kannalta. Katalyytteihin liittyvää vihreää kemiaa ei kirjoissa mainita, ainoastaan kerrotaan auton katalysaattorista. Katalyyteilla on kuitenkin merkittävä rooli kemian teollisuuden prosessin päästöjen ja jätteiden vähentämisessä. Vihreä kemia on suuri katalyyssiä hyödyntävä sektori, joten katalyytteihin liittyvää vihreää kemiaa olisi kuitenkin tärkeää olla mainita. Katalyyttien opetukseen liittyviä puutteita ovat esimerkiksi se, että kirjassa katalyyttimateriaaleiksi esitetään vain metallit ja niiden seokset, kun katalyytteinä käytetään paljon muitakin materiaaleja. Lisäksi katalyyttien tärkeitä ominaisuuksia kuten aktiivisuutta tai valikoituvuutta ei käsitellä lainkaan.

Opetus.tv esittää katalyyteistä oleellisimman tiedon eli että katalyytti alentaa aktivaatioenergiaa tarjoten siten reaktiolle uuden, energieettisesti suotuisamman reaktioreitin siinä itse kulumatta tai muuttumatta. Materiaalissa tulee myös esille, ettei katalyytin käytöllä ole vaikutusta reaktion energianmuutokseen. Sen sijaan itse ilmiön, katalyyysin, käsittely jää Opetus.tv:ssä hyvin pintapuoliseksi.

Ylioppilaskirjoitusten analyysin perusteella voidaan sanoa, että aiheita katalyyssi ja katalyytti ei ole painotettu viimeisen kymmenen vuoden aikana. Katalyyssi on esiintynyt ainoastaan jokeritehtävissä, joihin vaatii kykyä tietojen soveltamiseen myös laajemmissa yhteyksissä.⁴³ Kaikki katalyyssiin liittyvät kysymykset on esitetty ammoniakkisynteisiin liittyen ja yhteensä katalyyseistä on esitetty kolme kysymystä kymmenen vuoden aikana.

Ammoniakkisynteesi alkuaineistaan katalyytin avulla oli 1900-luvun mullistavin keksintö, koska sillä oli merkittävä vaikutus maatalouteen ja ensimmäiseen maailmansotaan. Edelleen keksinnön vaikutus on huomattava ja ilman keksintöä modernia yhteiskuntaa ei olisi syntynyt.¹⁴ Aikaisemman opetussuunnitelman mukainen Mooli-sarja ei kertonut ammoniakkisynteesin taustaa ja historiaa⁶²⁻⁶⁵, joten on ollut opettajasta kiinni, ovatko opiskelijat saaneet tietoa ammoniakkisynteesin merkityksestä ja siten mahdollisuuden valmistautua katalyyssiin liittyviin jokeritehtäviin. Lukion uuteen opetussuunnitelmaan perustuvassa Mooli-sarjassa ammoniakkisynteesin historia ja merkittävyys on nostettu esille.^{18,56-59}

Katalyytteihin liittyviä kysymyksiä esitettiin yksi vuosien 2008-2018 aikana, jossa kysyttiin kemialliseen reaktioon vaikuttavia tekijöitä.⁴³ Koska ylioppilaskirjoituksissa ei ole juuri esiintynyt katalyyssiin ja katalyytteihin liittyviä kysymyksiä, voidaan olettaa, etteivät nämä aiheet myöskään näy opettajien tuntisuunnitelmissa.

Sisällönanalyysi osoitti, että sanaa katalyyssi ei käytetä uudessa opetussuunnitelmassa eikä analysoitavissa Mooli-sarjan kirjoissa. Opetussuunnitelmassa katalyyssi on useissa kohdissa opetuksen tavoitteisiin sisältyvä asia, vaikka itse sanaa ei käytetä. Ainoastaan Mooli 5:ssä kerrotaan hieman ammoniakkisynteesin historiasta ja sen merkityksellisyydestä.

Opetus.tv:ssä mainitaan homogeenisen ja heterogeenisen katalyyssin määritelmät. Ylioppilaskirjoituksissa vuosina 2008-2018 katalyyssiin liittyvät tehtävät koskivat kaikki ammoniakkisynteesiä ja olivat jokeritehtäviä. Vaikka katalyyssi on opetussuunnitelmaan sisällytettynä ja liittyy vahvasti aihekokonaisuuksiin kestävä elämäntapa ja globaalivastuu sekä teknologia ja yhteiskunta, ei katalyyssi ole esillä Mooli-sarjan kirjoissa.

Katalyytit esiintyivät sekä opetussuunnitelmassa, Mooli-sarjan kirjoissa, Opetus.tv:ssä sekä ylioppilaskirjoituksissa. Sisällönanalyysin mukaan katalyyttien opetukseen liittyviä puutteina voidaan pitää sitä, että katalyyttien tärkeitä ominaisuuksia kuten aktiivisuutta tai selektiivisyyttä ei

tuoda esille. Mooli-kirjoissa katalyyteiksi mainitaan materiaaleina vain metallit, erityisesti siirtymämetallit. Siirtymämetallit ovat tärkein katalyytteinä käytettävä ryhmä mutta katalyytteinä käytetään myös muita materiaaleja, ja se ei tule Mooli-sarjan kirjoissa esille. Taulukko sisällönanalyysin ilmauksista löytyy liitteestä 1.

15 OPPIMATERIAALIN KEHITTÄMINEN

Suomen Katalyytsiseururan toivomuksesta pro gradu- tutkielman kokeellisessa osassa kehitettiin oppimateriaalia lukion kemian opetukseen. Katalyytsiseurassa ollaan huolestuneita siitä, ettei kemianteollisuuden alalle hakeudu riittävästi motivoituneita opiskelijoita. Lukion kemian opetuksen tulee tarjota mahdollisuuksia tutustua kemian alan työpaikkoihin sekä sovelluksiin monipuolisissa ympäristöissä. Kemian opetuksen tulee myös valmentaa jatko-opintoihin.⁴⁴ Opiskelijoiden innostamiseksi ja mielenkiinnon herättämiseksi Katalyytsiseura esitti pyynnön valmistaa sopivaa materiaalia lukion kemian opetukseen.

Ennen kehittämistutkimuksen aloittamista selvitettiin aineistolähtöisellä sisällönanalyysillä, miten lukion uusi opetussuunnitelma ja eri oppimateriaalit, Mooli 3,4 ja 5 sekä Opetus.tv käsittelevät aiheita katalyytti ja katalyyssi. Analyysissä tutkittiin myös, miten aiheet ovat näkyneet kemian ylioppilaskirjoituksissa vuosina 2008-2018. Sisällönanalyysin perusteella, katalyyssiin liittyvään kirjallisuuteen perehtymällä sekä Katalyytsiseururan hallituksen yhteistyökumppaneiden materiaalien avulla laadittiin oppimateriaalia sekä katalyyssistä että katalyyteistä näiden opettamisen tueksi. Oppimateriaaleiksi syntyi kaksi opetuspakettia ja lisäksi laadittiin materiaali, joka esittelee suomalaista katalyyssitutkimusta. Opetuspakettien laatimisessa käytettiin kehittämistutkimusta, jonka vaiheet ovat ongelma-analyysi, kehittämissuunnitelma sekä tuotoksen kehittäminen.

15.1. Ongelma-analyysi

Lukion uuden opetussuunnitelman, LOPS 2015:n, uusien Mooli-sarjan kirjojen sekä Opetus.tv:n sisällönanalyysin perusteella saatiin selville, mitä lukion opettajien sekä opiskelijoiden pitäisi opetussuunnitelman ja käytössä olevien oppimateriaalien mukaan tietää katalyyssistä ja katalyyteistä. Sisällönanalyysin perusteella katalyyssiä ei ilmiönä uusissa oppimateriaaleissa käsitellä ja katalyyttien käsittelyä voisi hieman täydentää. Kehittämistutkimuksen ongelma-analyysin tarpeeksi muodostui

selkeästi laatia katalyysiä esittelevää materiaalia katalyysin sisällyttämiseksi lukion kemian opetukseen samalla innostaen opiskelijoita mahdollisesti hakeutumaan alan jatko-opintoihin. Sisällönanalyysin perusteella kehittämistutkimuksen tarpeeksi nousi myös täydentää oppimateriaalien esittämiä asioita katalyyteistä.

15.2. Kehittämissuunnitelma

Kehittämistutkimuksen suunnitelmaksi muodostui yhteistyön tekeminen Katalyysiseuran hallituksen yhteistyökumppaneiden kanssa. Sisällönanalyysin perusteella ja ohjaajan avustuksella laadittiin kysymykset ja ohjeet, joiden pohjalta tutkimusryhmät ja yritykset voisivat tuottaa materiaalia opetuspaketteihin.

15.3. Kehittämisprosessi

Tutkimusryhmille ja yrityksille lähetettiin kysymykset sähköpostitse toukokuussa 2018. Kesän ja syksyn 2018 aikana saatiin materiaalia Neste Oy:ltä, Dinex Finland Oy:ltä, VTT:ltä sekä Jyväskylän, Oulun ja Itä-Suomen yliopistoilta, Åbo Akademiä sekä Aalto-yliopistolta.⁶⁶ Tutkimusryhmien sekä Nesteen ja Dinexin materiaaleja muokattiin sisällöltään ja visuaalisuudeltaan mahdollisimman selkeiksi ja opetukseen soveltuviksi. Materiaalit ovat powerpoint-esityksiä. Diojen muistiinpanosivuille lisättiin kommentteja, lisätietoja sekä lähdeviitteet opettamisen tueksi. Muokkausten ja muistiinpanosivujen lisäyksen jälkeen materiaalit lähetettiin vielä hyväksyttäväksi tekijöilleen. Katalyysiseuran powerpoint-pohjaa käytettiin tutkielman tekijän laatimiin materiaaleihin sekä tutkimusryhmien lähettämiin vastauksiin, jotka olivat word-tiedostoja. Yritysten ja tutkimusryhmien powerpoint-esitykset pidettiin alkuperäisillä pohjilla.

Opetuksen tutkimukseen nojaten ilmiöiden esittämien relevanteissa konteksteissa on innostava ja mielenkiintoa herättävä lähestymistapa opetukselle. Sopivat kontekstit myös auttavat käsitteiden ymmärtämistä ja sitovat kemian arkielämään. Opetusmateriaalin kehittämisessä päädyttiin edellä mainituista syistä tekemään yhteistyötä Katalyysiseuran hallituksen yhteistyökumppaneiden kanssa. Erityisesti Neste Oy:n sekä Dinex Finland Oy:n materiaalit täyttivät tämän kehittämistutkimuksen tavoitteen.

15.4. Kehittämistuotokset

Ensimmäisessä opetuspaketissa keskitytään katalyysiin ilmiönä. Materiaalin alussa on johdanto-osio, jossa ilmiöstä kerrotaan yleisesti. Sen jälkeen seuraa lyhyt katsaus katalyytin historiasta ja lisätietoa katalyyseistä ilmiönä. Opetuspaketin lopussa on Neste Oy:n ja Dinex Finland Oy:n laatimat materiaalit, joilla havainnollistetaan ilmiön tärkeyttä ja miten katalyysi ilmenee yhteiskunnassa. Materiaalit toimivat esimerkkeinä siitä, kuinka suurimmat katalyysiä hyödyntävät kemianteollisuuden sektorit käyttävät katalyysiä. (LIITE 2)

Toinen opetuspaketti tutustuttaa opiskelijat syvällisemmin katalyyttien ominaisuuksiin. Tämän opetuspaketin jatkona on suomalaista katalyysitutkimusta esittelevä materiaali, jota voi yhdistää joko opetuspaketteihin tai käyttää erikseen. Tutkimusryhmille lähetettiin seuraavat kysymykset:

- Millaisia katalyyttisiä prosesseja ja reaktioita tutkitte?
- Mitä katalyyttejä käytätte?
- Mihin kysymyksiin etsitte vastauksia?
- Millaisilla menetelmillä katalyyttisiä prosesseja tutkitaan?
- Mihin katalyysitutkimuksen pitäisi keskittyä?

Kysymyksiin saatiin vastaukset Jyväskylän, Itä-Suomen, Oulun ja Aalto yliopistojen, Åbo Akademin ja VTT:n tutkimusryhmiltä, jotka kaikki laativat vapaamuotoiset esitykset tutkimuksistaan. Näiden materiaalien tarkoituksena on toimia esimerkkeinä suomalaisesta katalyysitutkimuksesta (LIITE 3)

16 TUTKIMUKSEN EETTISYYS JA LUOTETTAVUUS

Tutkimuksen aihetta tutkittiin opetuksen ja lukiolaisten näkökulmasta. Tutkimuksen tarkoituksiksi asetettiin katalyytin sisällyttäminen osaksi lukion kemian opetusta, jotta katalyytin merkittävyys tulisi tunnetuksi ja että kemian teollisuuteen hakeutuisi kiinnostuneita ja motivoituneita opiskelijoita. Tutkimuksen aihe on eettisesti hyvä valinta, koska tarkoituksena on sekä opiskelijoiden että yhteiskunnan hyötyminen. Aihe on eettinen kysymys myös siten, että opiskelijoilla tulee olla mahdollisuus tutustua aiheeseen katalyysi, mikäli siitä esitetään kysymyksiä ylioppilaskirjoituksissa.

Pro gradu- tutkielman työstäminen on ensisijaisesti oppimisprosessi, jota työstettäessä on pyritty noudattamaan hyvää tieteellistä käytäntöä. Yllä mainittujen perustelujen myötä tutkimukseen ei pitäisi liittyä eettisiä ongelmia. Tutkimuksen tekemisen noviisina kaikkea ei kuitenkaan osaa huomioida, joten tiedostamattomia eettisiä ongelmia tutkimukseen saattaa sisältyä.

Tässä tutkimuksessa käytettiin kahta tutkimusmenetelmää, sisällönanalyysiä ja kehittämistutkimusta, Molemmat menetelmät ovat luonteeltaan laadullisia tutkimuksia. Sisällönanalyysin luotettavuuteen vaikuttivat ainakin vähäinen opetuskokemus sekä katalyyysin tuntemattomuus tutkimuksen tekijälle. Ajatukset siitä, mitä oppimateriaalin tulisi katalyyysistä ja katalyyteistä kertoa ja miten näiden oppimistavoitteet pitäisi olla opetussuunnitelmaan kirjattuna, voivat olla eriävät verrattuna opettajiin, joille aiheet ovat tuttuja ja omaavat opetuskokemusta. Samoin ajatukset siitä, mitä lukion opettajan ja lukiolaisen olisi syytä tietää katalyyysistä ja katalyyteistä opetussuunnitelman ja oppimateriaalin perusteella voivat olla erilaisia kuin kokeneimmilla opettajilla. Analyysin perusteella syntyneet ajatukset ja johtopäätökset voivat siten olla puolueellisia. Puolueellisuus on kuitenkin hyväksytty osaksi laadullista tutkimusta eikä absoluuttista oikeaa vastausta ei ole olemassa, joten sisällönanalyysiä voi pitää luotettavana.

Sisällönanalyysi suoritettiin aineistolähtöisellä analyysillä, jonka analyysiyksikköinä käytettiin katalyyysiä, katalyyttejä ja niihin liittyviä ilmauksia. Analyysi antaa kattavan kuvan opetussuunnitelman katalyyysiin ja katalyyttiin liittyvistä oppimistavoitteista sekä siitä, miten oppimateriaalit käsittelevät aiheita. Analyysin tiedot ovat hyödynnettävissä kehittämistutkimuksen lähtökohdaksi.

Toisen tutkimusmenetelmän, kehittämistutkimuksen, luotettavuuteen näyttäisi vaikuttavan eniten opettajilta saatu palaute laadittujen materiaalien toimivuudesta ja sovellettavuudesta. Tässä tutkimuksessa opetusmateriaalin testaamista ei voitu suorittaa, koska tutkielman valmistuminen ajoittui lukuvuoden loppuun. Opettajat ovat hyvin työllistettyjä päättöarviointien vuoksi eivätkä siten ehdi keskittyä ylimääräisiin tehtäviin. Kehitettyjen oppimateriaalien sisältämä informaatio on kirjallisuuteen pohjautuvaa ja ohjaajien tarkistamaa, joita on yhdistetty yliopistojen tutkimusryhmien sekä Neste Oy:n ja Dinex Finland Oy:n materiaaleihin, joten sisällön osalta kehittämistutkimuksen tuotosta voi pitää luotettavana.

Aikataulu oli hyvin haasteellinen, koska tutkielman tekeminen piti suorittaa työssäkäynnin ohella. Perheenisäys aiheutti myös rajoitteita tutkielman tekemiselle mutta toisaalta se myös tehosti ajankäyttöä entisestään. Tutkimuksen luotettavuus ei ole kärsinyt, vaikka tutkielman tekemiseen menikin aikaa suhteellisen paljon. Tieto ei ole vanhentunut tutkimuksen aikana. Katalyyysin kirjallisuuteen perehtymisen aikana selvisi ilmiön merkittävyys. Ilmiön laajuuden ja vaikutusten ymmärtäminen motivoi ja sitoutti tutkielman tekemiseen ja siten vaikuttivat omalta osaltaan tutkimuksen luotettavuuteen.

17 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen ensimmäisen tutkimuskysymyksen avulla pyrittiin selvittämään, miten katalyyssi ja katalyytti esiintyvät lukion uudessa opetussuunnitelmassa. Sisällönanalyysin perusteella saatiin selville, että uudessa opetussuunnitelmassa katalyyssi sisältyy opetuksen yleisissä oppimistavoitteissa muun muassa aihekokonaisuuksiin kestävä kehitys ja globaali vastuu ja teknologia ja yhteiskunta. Erityisesti katalyyssi sisältyy sekä kemian yleisiin oppimistavoitteisiin, että kolmen viimeisen syventävän kurssin oppimistavoitteisiin mutta sanaa katalyyssi ei uudessa opetussuunnitelmassa esiinny. Yllä mainittujen sisällönanalyysin tulosten perusteella katalyyssi kuuluu opetussuunnitelman mukaan lukion kemian opetukseen.

Uudessa opetussuunnitelmassa katalyytti on kirjattuna kurssin Reaktiot ja tasapaino oppimistavoitteisiin. Kurssilla opetellaan reaktionopeuteen vaikuttuvia tekijöitä, joihin katalyytti kuuluu. Siten opetussuunnitelman mukaan katalyytin opetus sisältyy lukion kemian opetukseen.

Toisessa tutkimuskysymyksessä keskityttiin selvittämään katalyyysin ja katalyytin esiintymistä uuden opetussuunnitelman mukaisissa oppimateriaaleissa. Katalyyysiä ja katalyyttiä ei mainita Mooli 3:ssa mutta katalyyysin opetus olisi mahdollista liittää kurssille Reaktiot ja energia reaktiotyyppien opetteluun jälkeen, koska reaktiotyyppistä huolimatta katalyyysiä hyödynnetään lähes kaikissa kemianteollisuuden prosesseissa. Katalyytti on kirjattu viimeisin syventävän kurssin aiheeksi, joten sen vuoksi on järkevää, ettei katalyyttejä käsitellä Mooli 3:ssa.

Myöskään Mooli 4:ssä ei mainita katalyyysiä. Kirjassa kerrotaan, että kemian tutkimus- ja kehitystyö ovat lisääntyneet energiantarpeen kasvaessa ja fossiilisten polttoaineiden ehtymisen vuoksi. Kirjassa jatketaan, että tutkimus- ja kehitystyön tavoitteena on kehittää kestävä kehityksen mukaisia ympäristöystävällisiä energialähteitä osaksi kiertotaloutta. Mooli 4:ssä ei käytetä sanaa katalyyysi, vaikka katalyyysillä tulee olemaan merkittävä rooli näiden tavoitteiden saavuttamisessa ja olisi siksi tärkeää tuoda tiedoksi opiskelijoille sisällyttämällä katalyyysi kurssin Materiaalit ja teknologia opetukseen. Katalyyysin sisällyttäminen lukion kemian opetukseen kävisi sekä kursseille Reaktiot ja energia, että Materiaalit ja teknologia. Verrattaessa näiden kurssien sisältöjä, katalyyysin opetus sopisi paremmin Materiaalit ja teknologia kurssille.

Mooli 4:ssä katalyytit mainitaan nanoteknologian ja polttokennojen yhteydessä. Nanoputkien sanotaan olevan hyviä katalyyttejä siksi että niiden pinta-ala on suuri partikkelikokoon nähden. Polttokennoissa olevien katalyyttien kerrotaan olevan kalliita, jonka vuoksi polttokennojen käyttäminen energiantuottamiseen ei ole ongelmaton. Mooli 4:ssä katalyytti mainitaan myös siirtymämetalleja käsittelevän kappaleen yhteydessä, jossa kerrotaan siirtymämetallien olevan hyviä mutta kalliita katalyyttejä sekä esitellään esimerkkejä siirtymämetallikatalyyteistä tärkeissä kemianteollisuuden prosesseissa. Muita katalyyttiin liittyviä asioita ei Mooli 4:ssä esiinny. Lukion kemian kursseilla sana katalyytti käytetään ennen kuin käsitettä on määritelty. Toki katalyytti kuuluu yläkoulun kemian oppimistavoitteisiin mutta muistavatko opiskelijat määritelmää ja miten tarkasti, on eri asia. Pohtimisen arvoinen kysymys on myös, ymmärtävätkö opiskelijat, mitä katalyyttien käytöllä tavoitellaan reaktion nopeuttamisen lisäksi.

Mooli 5:ssä kerrotaan, miksi Fritz Haber ryhtyi ammoniakkisynteesin kehittämiseen vuonna 1912. Kirjassa kerrotaan myös, että ammoniakkisynteesi on edelleen yksi kemianteollisuuden tärkeimmistä prosesseista ja että kehitetyn synteesin ansiosta ammoniakin saanto monikertaistui aikaisempaan synteesiin verrattuna. Mooli 5:ssä ei kuitenkaan tuoda esille, että kyseessä on nimenomaan katalyyttinen reaktio, joka oli 1900-luvun mullistavin keksintö ja edellytys modernin yhteiskunnan syntymiselle. Mooli 5:ssä kerrotaan ammoniakkisynteesistä tärkeitä asioita mutta jätetään tämä hyvin olennainen tieto mainitsematta.

Katalyytti esiintyy Mooli 5:ssä esillä useita kertoja ja sen kerrotaan olevan tärkeä sekä solujen että teollisuuden reaktiossa. Kirjan johdannossa esitellään kemian tutkimuskohteita ja mainitaan

tehokkaiden katalyyttien kehittämisen olevan tärkeä tutkimussektori. Johdannossa myös sanotaan, että kemianteollisuudessa tuotteiden valmistus pyritään optimoimaan ja että valmistusprosesseissa huomioidaan taloudellisuus, kierrätys ja ympäristövaikutukset. Tässä yhteydessä ei kuitenkaan harmillisesti mainita, että näiden toteuttamisessa tarvitaan katalyyttejä.

Entsyymikatalyyttien kerrotaan olevan spesifisiä ja tehokkaampia kuin teollisuuden katalyyttien. Mooli 5:ssä kerrotaan vielä, että entsyymien katalysoimissa reaktiossa ei synny ei-toivottuja sivutuotteita kuten teollisuuden prosesseissa. Lisäksi kerrotaan, että soluissa tapahtuu samanaikaisesti useita entsyymien katalysoimia reaktioita ja että reaktioissa muodostuvat lopputuotteet toimivat lähtöaineina uusille reaktioille. Lopuksi johdannossa todetaan, että nämä lukuisat reaktiot muodostavat kemiallisen perustan elämäämme. Reaktionopeutta käsittelevässä kappaleessa määritellään katalyytti ja havainnollistamiseksi on liitetty kuva mukaan. Kuva on varsin informatiivinen ja selkeä, joten katalyytin määritelmä on kirjassa hyvin esitetty. Katalyytin määritelmä sekä entsyymikatalyytit ovat Mooli 5:ssä kattavasti ja selkeästi esitetty.

Kokonaisuutena analysoiduista Mooli-sarjan kirjoista voidaan todeta, että katalyytit käsitellään määritelmän ja entsyymien osalta kiitettävästi. Katalyyttien ominaisuuksia olisi syytä täydentää ja olisi tärkeää tuoda esille, mitä muita materiaaleja metallien lisäksi kemianteollisuudessa käytetään katalyytteinä. Katalyyysin esittäminen puuttuu kokonaan ja katalyyysin historiaan liittyvä ammoniakkisynteesiä esitellessä hyvin oleellista olisi kertoa sen olevan yhteiskunnan kannalta tärkeä keksintö, katalyyttinen reaktio.

Opetus.tv:ssä katalyyseistä kerrotaan vain homogeenisen ja heterogeenisen katalyyysin määritelmät. Ilmiönä katalyyseistä ei esitetä mitään tietoja. Opetus.tv:n materiaali pohjautuu aikaisempaan lukion opetussuunnitelmaan, jota tässä tutkimuksessa ei analysoitu. Tässä tutkimuksessa ei perehdytty, sisältyykö katalyyysin opetus aikaisempaan opetussuunnitelmaan, mutta oletus on, että ainakaan selkeästi ilmiön opetusta ei ole ollut aikaisempaan opetussuunnitelmaan kirjattuna.

Katalyytti sisältyy Opetus.tv:n materiaaleihin vain määritelmänä, mutta se on täsmällisesti esitetty kuvaajan avulla. Opetus.tv:n materiaalia voisi hyvin täydentää osiolla, joka kertoo katalyyttien tärkeistä ominaisuuksista ja esittelisi tärkeitä katalyyttimateriaaleja ja niiden sovelluksia.

Tutkielman sisällönanalyysin perusteella voidaan todeta, ettei katalyyssi ilmiönä ole esillä uudessa oppimateriaalissa ja sekä katalyyseistä että katalyyteistä on esitetty hyvin vähän kysymyksiä ylioppilaskirjoituksissa viimeisen kymmenen vuoden aikana. Toki, jos ylioppilaskirjoitukset eivät painota katalyysejä, on ymmärrettävää, ettei ilmiön esittelyä sisällytetä oppimateriaaleihin. Samasta syystä voidaan olettaa, etteivät opettajat sisällytä aihetta tuntisuunnitelmiinsa lukiossa, jossa muutenkin tasapainoillaan tiukkojen aikataulujen kanssa.

Katalyyysin merkittävyyden huomioiden voidaan sanoa, että analysoitu uusi oppimateriaali ei tältä osin vastaa opetussuunnitelman tavoitteisiin. Opetussuunnitelman mukaan lukiokoulutuksen tulisi antaa riittävästi valmiuksia ymmärtää luonnontieteen merkitys yhteiskunnan kannalta, jotta kykenee osallistumaan niihin liittyviin keskusteluihin ja päätöksentekoon. Lukion tulisi myös valmentaa jatko-opintomahdollisuuksiin.⁴⁴ Sisällönanalyysin perusteella saatiin käsitys, mitä lukion opettajan ja lukiolaisen pitäisi tietää suomalaisesta katalyyseiosaamisesta. Opetussuunnitelman mukaan katalyyssi kuuluu lukion kemian opetukseen mutta analysoiduissa oppimateriaalissa ilmiö ja sen merkittävyys eivät tule esille. Laadittu oppimateriaali on siten tarpeellinen katalyyysin sisällyttämiseksi osaksi lukion kemian opetusta.

Kolmannessa tutkimuskysymyksessä perehdyttiin, miten opettajia voitaisiin tukea katalyyysin opettamisessa. Kirjallisuuden perusteella lähtökohtana katalyyysin opetukselle on ilmiön tunnetuksi tekeminen. Opettajille pitäisi tarjota mahdollisuus tutustua ilmiöön, esimerkiksi koulutuspäivillä tai itseopiskelumateriaalilla. Lisäksi kirjallisuuden mukaan opettajia selkeästi hyödyttää valmiiden materiaalin tuottaminen, koska opettajat kokevat työssään jatkuvasti haasteita ajanpuutteen vuoksi.

Katalyyysin opetusta tukisi myös katalyyysin opetuksen kirjaaminen vielä selkeämmin opetussuunnitelmaan, jolloin se poistaisi ilmiön opetuksen tulkinnanvaraisuuden. Tällöin ilmiön opetus ei olisi myöskään riippuvainen siitä, kuinka paljon opettaja seuraa kemian alan kehittymistä ja ilmenemistä yhteiskunnassa. Katalyyysin esiintyminen myös ylioppilaskirjoituksissa tukisi ilmiön opetusta vahvasti, koska on selvää, että lukion opetuksessa keskitytään aiheisiin, joista kysymyksiä esitetään.

Tutkielman työstämisen aikana muodostui selkeä kuva ilmiön laajuudesta ja merkittävydestä. Opetuksen tutkimuksen kirjallisuuteen perehtymällä muodostui myös käsitys mitä oppimisesta ja opetuksesta tällä hetkellä tiedetään. Opetuksessa korostetaan metakognitiivisia taitoja, jotka ovat edellytys syvemmälle oppimiselle sekä abstraktien asioiden ajattelussa ja ymmärtämisessä. Metakognition aktivoiminen myös kehittää oppimaan oppimisessa. Siten kaikessa opetuksessa tulisi pyrkiä metakognitiivisten toimintojen aktivointiin. Luonnontieteissä tutkimuksellinen opetustapa on tällä hetkellä käytetyin menetelmä metakognition aktivointiin ja uusi opetussuunnitelma edellyttääkin tutkimuksellisen opetustavan soveltamista.

Kehitetystä oppimateriaalissa ilmiö esitetään jokapäiväiseen elämään liittyvissä konteksteissa: katalyyysi öljynjalostuksessa ja päästöjen vähentämisessä. Näillä kontekstivalinnoilla pyritään auttamaan opiskelijoita ymmärtämään katalyyysin liittyvän arkielämään, valaisemaan katalyyysin merkityksestä ja lisäksi herättämään mielenkiintoa ja innostamaan kemian opiskeluun. Näissä tavoitteissa onnistuttiin ainakin kahdessa ensin mainitussa sen perusteella, mitä kirjallisuus kontekstiin sidotusta opetuksesta kertoo. Kontekstin kiinnostavuus on sukupuoliriippuvaista ja toki omat mielenkiinnon kohteet vaikuttavat, kiinnostuuko jostakin asiasta vai ei. Testattaessa materiaalia, materiaalin kiinnostavuuden tulos olisi vahvasti riippuvainen siitä, keneltä asiaa kysytään.

Katalyyisitutkimuksesta kertovassa materiaalissa saattaa olla lukiolaisille vaikeaa ja yksityiskohtaista tietoa, joten käyttäessään materiaalia opettajien on hyvä tiedostaa tämä asia. Materiaalin tarkoituksena on esitellä, mitä katalyyisitutkimuksissa tutkitaan ja millaista osaamista tarvitaan, yksityiskohtiin ei kannata takertua. Materiaalin esittäminen olisi järkevintä kohdentaa lukion kemian viimeisten syventävien tai valinnaisten kurssien opiskelijoille, jotka ovat osoittaneet olevansa kiinnostuneita kemiasta ja harkitsevansa opintoja kemian parissa.

Materiaalin laatiminen ja kokoaminen olivat työläitä ja aikaa vieviä vaiheita johtuen ensisijaisesti siitä, että materiaalin tuottamiseen osallistui useita henkilöitä ja viestiminen tapahtui sähköpostin välityksellä. Sähköposti osoittautui kankeaksi työkaluksi oppimateriaalin kehittämisessä. Koska materiaalin laatimiseen ja kokoamiseen meni niin paljon aikaa, oppimateriaalissa ei ole mukana ehdotuksia tehtäviksi. Vaikka oppimateriaalin esittäminen tapahtuisi opettajajohtoisesti, opettaja voi ideoida materiaalin pohjalta monenlaisia opiskelijoita aktivoivia oppimistehtäviä.

17.1. Jatkotutkimukset

Kehitettyä oppimateriaalia ei aikataulullisista syistä ollut mahdollista testata. Oppimateriaalin toimivuus ja innostavuus olisi kuitenkin tärkeää tietoa oppimateriaalin hyödyntämisen kannalta, joten tutkimuksen jatkaminen oppimateriaalin testaamisella olisi tutkimuksen seuraava vaihe.

Kiinnostavaa olisi myös tutkia sekä lukion opettajien, että lukiolaisten ennakkotietoja katalyysistä ja katalyyteistä esimerkiksi kyselytutkimuksella tai haastattelulla. Näillä tiedoilla oppimateriaalia voisi muokata siten, että opettajat saisivat katalyysistä riittävästi taustatietoa opetuksen toteuttamiseen. Lukiolaisille oppimateriaali voitaisiin muokata sisällöltään tarkemmin sellaiseksi, että uudet tiedot olisi mahdollista sitoa jo olemassa oleviin. Tärkeä ja mielenkiintoinen jatkotutkimus olisi myös kehittää oppimateriaaliin sopivia tutkimuksellisia oppimistehtäviä sekä testata niiden toimivuus.

1. Tro, N.J., *Chemistry: A Molecular Approach*, 4. painos, Pearson Education, Harlow, Iso-Britannia, 2016.
2. Chorkendorff, I. ja Niemantsverdriet, J.W., *Concepts of Modern Catalysis and Kinetics*, WILEY-VCH Verlag GmHb& Co.KgaA, Weinheim, 2003.
3. Armor, J.N., A history of industrial catalysis, *Catalysis Today*, 2011, 163, 3-9.
4. Deutschmann, O. et al., Heterogenous Catalysis and Solid Catalyst, 1. Fundamentals. Kirjassa: *Ullmann's encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2000, ss.457-478.
5. Rutger, A. V. Santen ja Neurock, M. *Molecular Heterogenous Catalysis: A Conceptual and Computational Approach*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, Weinheim.
6. Bartholomew, C.H. ja Farrauto, R.J., *Fundamentals of Industrial Catalytic Processes*, 2. painos, John Wiley & Sons, New Jersey, Yhdysvallat, 2006.
7. Anastas, P.T. ja Warner, J.C., *Green Chemistry Theory and Practice*, Oxford University Press, New York, Yhdysvallat, 1998.
8. Ulkomaankauppa, <https://ek.fi/mita-temme/talous/perustietoja-suomen-taloudesta/ulkomaankauppa/>, (5.5.2019).
9. Kemia mahdollistaa kiertotalouden ja biotalouden, <https://www.kemianteollisuus.fi/fi/vastuullisuus/bio-ja-kiertotalous/>, (14.5.2019).
10. PISA 15 Ensituloksia. Huipulla pudotuksesta huolimatta, <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79052/okm41.pdf>, (24.5.2019).
11. Child, P.E., Improving chemical education: turning research into effective practice, *Chemistry Education Research and Practice*, 2009, 10, 189-203.
12. Robertson, A.J.B., The early history of catalysis, *Platinum Metals Review*, 1975, 2, 64-69.
13. Lindström, B. ja Petterson, L.J., A brief history of catalysis, *Cattech*, 2003, 7 (4), 130-137.
14. Erisman, J., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z. ja Winiwarter, W., How a century of ammonia synthesis changed the world, *Nature Geoscience*, 2008, 1, 636-639.
15. Kolasinski, K.W., *Surface Science: Foundations of catalysis and nanoscience*, 3. painos, John Wiley&Sons, Iso-Britannia, 2012.
16. Dumeignil, F., Paul, J-F. ja Paul, S., Heterogenous catalysis with renewed attention: principles, theories and concepts, *Journal of Chemical Education*, 2017, 94, 675-689.
17. Bhaduri, S. ja Mukesh, D., *Homogenous catalysis: Mechanism and Industrial Applications*, 2. painos, Wiley, 2014.
18. Turpeenoja, L., *Mooli 4, Materiaalit ja teknologia*, Otava, 2017, Helsinki.

19. Harvinaiset maametallit pyörittävät maailmaa, https://www.kemia-lehti.fi/wp-content/uploads/2013/02/kem112_maametalli.pdf, (16.5.2019).
20. Mikä ihmeen kiertotalous, <https://ek.fi/syty-kiertotaloudesta/mika-ihmeen-kiertotalous/>, (14.5.2019).
21. VTT Catalyst Technologies, Kihlman, J., Simell, P., Reinikainen, M., Kaisalo, N., Putkonen, M., Keskiaväli, L. ja Coronado, I., VTT, sähköpostikeskustelu, 4.12.2018.
22. Mitä nämä käsitteet tarkoittavat, <https://www.sitra.fi/artikkelit/mita-nama-kasitteet-tarkoittavat/>, (14.5.2019).
23. Tynjälä, P., *Oppiminen tiedon rakentamisena: konstruktivistisen oppimiskäsityksen perusteita*, 4. painos, Kirjayhtymä, Helsinki, 1999.
24. Anderson, L.W., ja Krathwohl, D.R., A Taxonomy for learning, teaching and assessing: a revision of Bloom's Taxonomy of educational objectives, Addison Wesley Longman, USA, 2001.
25. Livingston, J.A. Metacognition: An Overview, 2003, <https://eric.ed.gov/?id=ED474273>, (18.5.2019).
26. Rickey, D. ja Stacy, A.M. The role of metacognition in learning chemistry, *Journal of Chemical Education*, 2000, 77, 915-919.
27. Hellström, M., *Sata sanaa opetuksesta: keskeisten käsitteiden kirja*, PS-kustannus, Jyväskylä, 2008.
28. Bloom, B.S., *Taxonomy of educational objectives: the classification of educational goals: handbook.1, Cognitive domain*, lisäpainos, David McKay, New York, 1959.
29. Johnstone, A. Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 1991, 7, 75-83.
30. Gregory, P.T. 'Triangulation' an expression for stimulating metacognitive reflection regarding the use of 'triplet' representations for chemistry learning, *Chemistry Education Research and Practice*, 2017, 18, 533-548.
31. Alex Johnstone (1930-2017), <https://eic.rsc.org/news/alex-johnstone-19302017/3008447.article>, (20.3.2019)
32. Johnstone, A. Teaching chemistry- logical or psychological?, *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 2000,1, 9-15.
33. Mahaffy, P. The future shape of chemistry education, *Chemistry Education Research and Practice*, 2004, 5, 229-245.

34. Where Chemical Education is Heading: Interview with Peter Mahaffy, https://www.chemistryviews.org/details/education/2559091/Where_Chemical_Education_is_Heading_Interview_with_Peter_Mahaffy.html, (18.3.2019).
35. Aksela, M., *Supporting Meaningful Chemistry Teaching and Higher-Order Thinking through Computer-Assisted Inquiry: A Design Research Approach*, Helsingin yliopisto, 2005, <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/21127/supporti.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, (3.5.2019).
36. Konstruktivismi ja oppiminen, <https://oppimateriaalit.jamk.fi/oppimiskasitykset/oppimiskasitykset/konstruktivistinen-oppiminen>, Jyväskylän ammattikorkeakoulu, (11.3.2019).
37. Sevian, H., Dori, Y.J. ja Parchmann, I., How does STEM context-based learning work: what we know and what we still do not know, *International Journal of Science Education*, 2018, 40, 1095-1107.
38. De Jong, O., Context-based chemical education: How to improve it?, *19th ICCE*, Seoul, Korea, 12.-17.8.2006, <https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/31675/jong+-+context-based+chemical+education.pdf?sequence=1>, (1.10.2018)
39. Eilks, I., Rauch, F., Ralle, B. ja Hofstein, A., How to allocate the chemistry curriculum between science and society. Kirjassa Eilks, I. ja Hofstein, A. (toim.), *Teaching Chemistry-A Studybook, A Practical Gguide and Textbook for Student Teachers, Teacher Trainees and Teachers*, Sense Publishers, Hollanti, 2013.
40. Bennett, J. ja Lubben, F., Context-based chemistry: The Salters approach, *International Journal of Science Education*, 2006, 28, 999-1015.
41. Ramsden, J.M., How does a context-based approach influence understanding of key chemical ideas at 16?, *International Journal of Science Education*, 1997, 19, 697-710.
42. Bennett, J. ja Holman, J., Context-based approaches to the teaching of chemistry: What are they and what are their effects? Kirjassa: Gilbert, J.K., De Jong, O., Justi, R., Treagust, D.F. ja Van Driel, J.H (toim.), *Chemical Education: Towards Research-based Practice*, Kluwer Academic Publisher, Alankomaat, 2002, 165-184.
43. Dori, Y.J., Avargil, S., Kohen, Z. ja Saar, L., Context-based learning and metacognitive prompts for enhancing scientific text comprehension, *International Journal of Science Education*, 2018, 40, 1198-1220.

44. Lukion opetussuunnitelman perusteet 2015
http://www.oph.fi/download/172124_lukion_opetussuunnitelman_perusteet_2015.pdf,
(20.5.2017).
45. Active Learning, Cambridge Assessment, International Education,
<https://www.cambridgeinternational.org/Images/271174-active-learning.pdf>, (16.5.2019).
46. Prince, M., Does active learning work? A review of the research, *Journal of the Engineering Education*, 2004, 93(3), 223-231.
47. Herranen, J., Tuomisto, M. ja Aksela, M., Tutkimuksellinen opiskelu kemian aineenopettajakoulutuksessa, *LUMAT*, 2015,3, 856-866.
48. Bell, R.L., Smetana, L. ja Binns, I., Simplifying inquiry instruction, *The Science Teacher*, 2005, *October*,30-33.
49. Kang, J., *Implementation and implication of inquiry-based science education in the Finnish context: evidence from international large-scale assessments:PISA and TIMSS*, Itä-Suomen yliopisto, 2017, http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-2631-9/urn_isbn_978-952-61-2631-9.pdf, (17.4.2019).
50. Heveling, J., Heterogenous catalytic chemistry by example of industrial applications, *Journal of Chemical Education*, 2012, 89, 1530-1536.
51. Tuomi, J. ja Sarajärvi, A., *Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi*, Uudistettu laitos, Tammi, Helsinki, 2018.
52. Hirsjärvi, S., Remes, P. ja Sajavaara, P., *Tutki ja kirjoita*, 15. painos, Kariston Kirjapaino, Hämeenlinna, 2009.
53. Pernaa, J., Kehittämistutkimus tutkimusmenetelmänä, Kirjassa: Aksela, M., Juuti, K., Korhonen, T., Lampiselkä, J., Lavonen, J., Leinonen, T., Pernaa, J.(toim.), Rissanen, A., Vesterinen, V-M. ja Åhlberg, M., *Kehittämistutkimus opetusalla*, PS-kustannus, Juva, 2013.
54. Aksela, M. ja Pernaa, J., Kehittämistutkimus pro gradu- tutkielman tutkimusmenetelmänä, Kirjassa: Aksela, M., Juuti, K., Korhonen, T., Lampiselkä, J., Lavonen, J., Leinonen, T., Pernaa, J.(toim.), Rissanen, A., Vesterinen, V-M. ja Åhlberg, M., *Kehittämistutkimus opetusalla*, PS-kustannus, Juva, 2013.
55. Teknologia ja yhteiskunta
<http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/teknologia/html/01-1.html>,(11.1.2018).
56. Turpeenoja, L., *Mooli 1, Kemiaa kaikkialla*,1.-4. painos, Otava, Helsinki, 2016.
57. Turpeenoja, L., *Mooli 2, Elinympäristön kemiaa*, 1.-4. painos, Otava, Helsinki, 2016.
58. Turpeenoja, L. *Mooli 3: Reaktiot ja energia*, Otava, Helsinki, 2017.
59. Turpeenoja, L., *Mooli 5, Reaktiot ja tasapaino*, Otava, Helsinki, 2018.

60. Opetus.tv., <https://opetus.tv/>,(15.2.2019).
61. YO-kokeet: kemia, <https://yle.fi/aihe/artikkeli/2015/12/15/yo-kokeet-kemia>, (1.4.2018)
62. Lehtiniemi, K. ja Turpeenoja, L., *Mooli 1: Ihmisen ja elinympäristön kemiaa*, 1.-7. painos, Otava, Keuruu, 2014.
63. Lehtiniemi, K. ja Turpeenoja, L., *Mooli 3: Reaktiot ja energia*, 1.-9. painos, Otava, Keuruu, 2013.
64. Lehtiniemi, K. ja Turpeenoja, L., *Mooli 4: Metallit ja materiaalit*, 1.-7. painos, Otava, Keuruu, 2013.
65. Lehtiniemi, K. ja Turpeenoja, L., *Mooli 5: Reaktiot ja tasapaino*, 1.-4. painos, Otava, 2010, Keuruu.
66. a) Happonen, P., Holopainen, M., Sotkas, P., Tenhunen, A., Tihtarinen-Ulmanen, M. ja Venäläinen, J., *Bios 3, Solu ja perinnöllisyys*, 12. painos, Sanoma Pro, Helsinki, 2017.
- b) Happonen, P., Holopainen, M., Sariola, H., Sotkas, P., Tihtarinen-Ulmanen, M., *Bios 4, Ihmisen biologia*, 16. painos, Helsinki, 2017.
- c) Katalyysitutkimus, Jyväskylän yliopisto, Honkala, K., sähköpostikeskustelu, 15.11.18
- d) Katalyysitutkimus, Åbo Akademi, Teknillisen kemian ja reaktiotekniikan laboratorio, Mikkola, J-P., Mäki-Arvela, P., Virtanen, P., sähköpostikeskustelu, 7.6.2018.
- e) Katalyyssi öljynjalostuksessa, Neste Oy, Jaatinen, S., Harlin, E. ja Tiitta, M., sähköpostikeskustelu, 7.11.2018.
- f) Katalyytit päästöjen puhdistuksessa, Dinex Finland Oy, Maunula, T., sähköpostikeskustelu, 30.11.2018.
- g) Katalyytti- ja katalyysitutkimus, Itä-Suomen yliopisto, kemian laitos, Suvanto, M., sähköpostikeskustelu, 30.11.2018.
- h) Katalyysitutkimus, Aalto-yliopisto, Puurunen, R., sähköpostikeskustelu, 5.12.18
- i) Kestävän kemian katalyysitutkimus, Oulun yliopisto, Heponiemi, A., sähköpostikeskustelu, 30.11.2018.
- j) VTT Catalyst Technologies, VTT, Kihlman, J., Simell, P., Reinikainen, M., Kaisalo, N., Putkonen, M., Keskiväli, L. ja Coronado, I., sähköpostikeskustelu, 4.12.2018.

Taulukko 1: Katalyysiin ja katalyytteihin liittyvät ilmaukset analysoidussa oppimateriaaleissa.

KATALYYSIIN JA KATALYYTTEIHIN LIITTYVÄT ILMAUKSET	MOOLI 3	MOOLI 4	MOOLI 5	OPEUS. TV
Katalyysi Homogeenisessa katalyysissa reagoivat aineet ovat samassa faasissa katalyytin kanssa. Heterogeenissä katalyysissa reagoivat aineet ovat eri faasissa katalyytin kanssa kehossa tapahtuu yleensä homogeeninen katalyysi.				X X
Katalyytit Alentavat aktivoitumisenergiaa			X	
Tarjoavat energettisesti suotuisamman reaktioreitin.			X	X
Eivät kulu reaktiossa			X	X
Eivät vaikuta reaktioentalpiaan				X
Eivät vaikuta tasapainovakion arvoon			X	
Nopeuttavat sekä etenevää ja palautuvaa reaktiota ja siten nopeuttavat tasapainotilan saavuttamista.			X	
Pieni määrä riittää aktivoimaan reaktion.				X
Menettävät tehonsa.			X	
Homogeeninen katalyytti on samassa olomuodossa reaktion lähtöaineisiin nähden.			X	
Heterogeeninen katalyytti on eri olomuodossa reaktion lähtöaineiden kanssa.			X	
Entsyymit Katalysoivat biokemiallisia reaktioita soluissa.			X	X
Tehokkaampia kuin kemistien kehittämät katalyytit.			X	
Entsyymien katalysoimissa reaktioissa ei synny ei-toivottuja sivutuotteita.			X	

Katalyyttien merkitys kemianteollisuudelle Energian säästyminen, koska katalyyttien avulla reaktiot tapahtuvat matalammissa lämpötiloissa.			X	
Katalyyttien käyttö mahdollistaa sellaisten reaktioiden hyödyntämisen, joissa lähtöaineet tai reaktiotuotteet hajoavat korkeassa lämpötilassa helposti			X	
Siirtymämetallikatalyytit Hyviä mutta kalliita katalyyttejä		X		
Esimerkkejä sovelluksista: Fe → ammoniakkisynteesi Ni → kasviöljyjen hydraus Pt- Pd -Rh-seos → auton katalysaattori		X		

KATALYYSI ILMIÖNÄ

Tapahtuma, jossa kemiallista reaktiota kiihdytetään aineella, **katalyytillä**, joka ei kulu eikä muutu reaktion aikana.



k

Tässä esityksessä tutustutaan katalyysiin, ilmiöön, joka on sekä elinehto elämälle että mahdollistanut modernin yhteiskunnan syntymisen.

Esityksen sisältö:

Mikä on katalyysi-ilmiö?

Katalyysin historia

Katalyytti alentaa reaktion aktivaatioenergia

Katalyysi on syklinen reaktio

Katalyysityypit

Esimerkit katalyysiä käyttävästä kemianteollisuudesta: Neste Oy ja Dinex Finland Oy

Mikä on katalyysi-ilmiö?

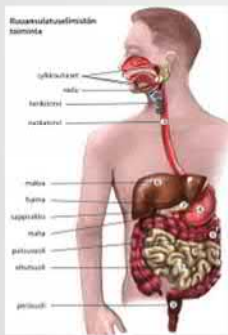
Katalyysi-ilmiössä on kyseessä on tapahtuma, jossa kemiallista reaktiota kiihdytetään katalyytillä, aineella, joka ei kulu reaktion aikana. Katalyyttien avulla teollisesti merkittävien reaktioiden on mahdollista tapahtua tehokkaasti ja järkevissä olosuhteissa.

Yhteiskunnan kannalta katalyysi on merkittävä ilmiö. Kemianteollisuus hyödyntää katalyysiä 90 %:sti. Katalyysiä hyödyntävä kemianteollisuus voidaan jakaa kolmeen sektoriin, joista suurin on öljynjalostus ja polttoaineiden valmistus. Toinen katalyysiä hyödyntävä sektori on kemikaalien tuotanto ja lisäksi vihreä kemia eli kolmas katalyysiä hyödyntävä sektori nojautuu katalyysiin. Vihreä kemian prosesseissa vähennetään teollisuuden ja liikenteen päästöjä sekä pyritään muokkaamaan olemassa olevia prosesseja ekologisimmiksi sekä kehittämään uudet prosessit kestävän kehityksen mukaisiksi. Kaikissa vihreän kemian prosesseissa hyödynnetään katalyyttisiä prosesseja apuna. Näistä lisää esityksen aikana. **Lähteet:** Tro, N.J., *Chemistry: A Molecular Approach*, 4. painos, Pearson Education Limited, Harlow, Iso-Britannia, 2016.,

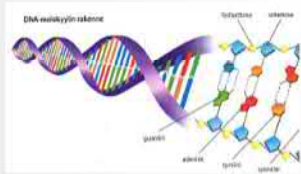
Rutger, A. V. Santen ja Neurock, M. *Molecular Heterogenous Catalysis: A Conceptual and Computational Approach*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, Weinheim.,

Anastas, P.T. ja Warner, J.C., *Green Chemistry Theory and Practice*, Oxford University Press Inc., New York, Yhdysvallat, 1998.

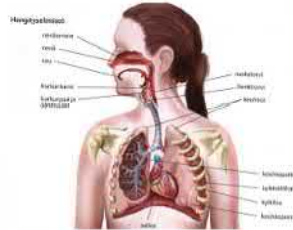
Elimistössä tapahtuu jatkuvasti biologisia katalyysireaktioita kuten esimerkiksi ruoansulatus, DNA:n syntetisointi, hengitys, lihasten aktivointi



Kuva 1: Ruoansulatus



Kuva 2: DNA



Kuva 3: Hengityselimistö



Kuva 4: Lihasten aktivointi

→Elämä ei olisi mahdollista ilman katalyysiä

Lähteet:

Kuva 2: Happonen, P., Holopainen, M., Sotkas, P., Tenhunen, A., Tihtarinen-Ulmanen, M. ja Venäläinen, J., *Bios 3, Solu ja perinnöllisyys*, 12.painos, Sanoma Pro Oy, Helsinki, 2017.

Kuvat 1,3 ja 4: Happonen, P., Holopainen, M., Sariola, H., Sotkas, P., Tihtarinen-Ulmanen, M., *Bios 4, Ihmisen biologia*, 16.painos, Helsinki, 2017.

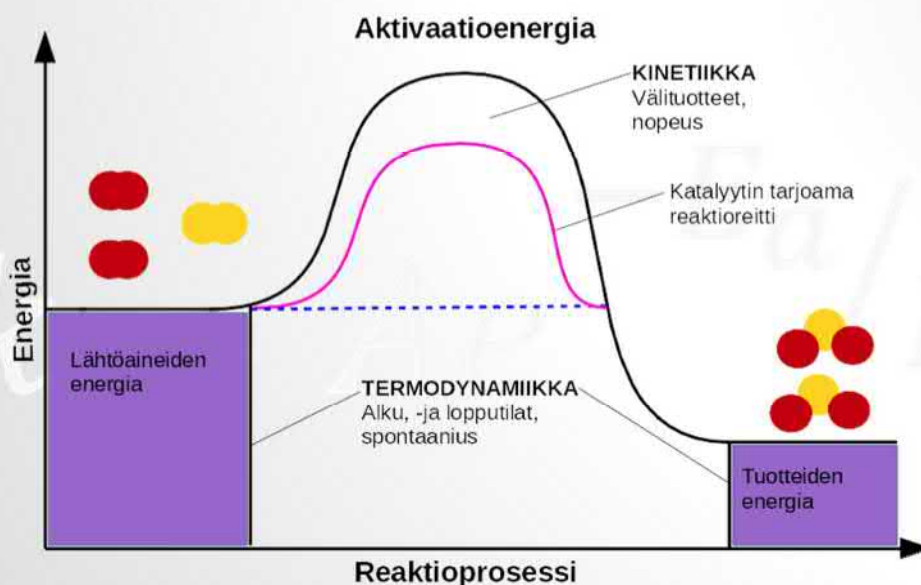
Katalyysi on elämän edellytys. Katalyysiä tarvitaan monissa elimistön biologisissa reaktiossa kuten esimerkiksi ruoansulatuksessa, DNA:n syntetisoinnissa, hengityksessä ja lihasten aktivoimisessa. Tällöin katalyytteina toimivat luonnon omat katalyytit, entsyymit.

Myös luonnossa tapahtuu jatkuvasti tärkeitä katalyysireaktioita. Elämä ei olisi mahdollista ilman katalyysiä!

Lähde:

Rutger, A. V. Santen ja Neurock, M. *Molecular heterogeneous catalysis: A conceptual and computational approach*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, Weinheim

Katalyytti alentaa reaktion aktivaatioenergiaa ja tarjoaa energisesti suotuisamman reaktioreitin



Kuva mukailtu lähteestä: Tro, N.J., *A molecular approach*, 4. painos, Pearson Education Limited, Harlow, Englanti, 2016.

Katalyytti alentaa aktivaatioenergiaa tarjoten reaktiolle energisesti suotuisamman reitin. Useat teollisuuden reaktiot eivät olisi taloudellisia tai edes mahdollisia ilman katalyytin käyttöä.

Kuvasta näkee myös, että katalyytti vaikuttaa vain reaktion kinetiikkaan, ei termodynamiikkaan. Katalyytti alentaa aktivaatioenergiaa, jolloin reaktio tapahtuu nopeammin ja järkevimmissä olosuhteissa esimerkiksi alemmassa lämpötilassa tai paineessa. Katalyytin avulla saadaan valmistettua reaktiotuotetta nopeammin kuin ilman katalyyttiä. Näin energiankulutus pienenee ja ajankäyttö järkevöityy. Katalyytin avulla reaktiosta saadaan taloudellisempi ja ympäristöystävällisempi.

Reaktion lähtöaineiden ja lopputuotteiden energiat pysyvät muuttumattomina katalyytin käytöstä huolimatta. Katalyytti ei siis vaikuta reaktion spontaaniteuteen.

Lähde: Tro, N.J., *A molecular approach*, 4. painos, Pearson Education Limited, Harlow, Englanti, 2016.

Kuva mukailtu yllä mainitusta lähteestä.

KATALYYSIN HISTORIA



- Katalyyssiä hyödynnettiin jo kauan ennen sen keksimistä muun muassa oluen ja viinin valmistuksessa
- Katalyyysin keksivuoteen ruotsalainen kemisti Berzelius 1835. Bertzeliuksen mukaan katalyyssissä on kysymyksessä "voima", joka nopeuttaa kemiallista reaktiota.
- Myöhemmin saksalainen Ostwald määritteli katalyyysin kemiallisen reaktion nopeuttamiseksi aineella, joka ei kulu reaktiossa.
- Ostwald sai keksinnöstään Nobelin palkinnon 1909. Hän myös keksi, että katalyyssi on käytettävissä lähes kaikissa kemiallisissa reaktioissa.
- Katalyyysin perustuva kemianteollisuus sai alkunsa 1800-luvun lopulla, ensin rikkihapon ja sen jälkeen typpihapon ja ammoniakkin valmistuksella.

Ihmiskunta hyödynsi katalyyssiä jo kauan ennen sen keksimistä muun muassa oluen ja viinin valmistuksessa.

Katalyyysin varhainen historia ulottuu alkemian aikakaudelta vuoteen 1835, jolloin ruotsalainen kemisti Berzelius ensimmäisenä määritteli katalyyysin "voimaksi", joka nopeuttaa kemiallista reaktiota. Myöhemmin (1895) Ostwald määritteli katalyyysin kemiallisen reaktion kiihdyttämiseksi aineella, joka ei kulu reaktiossa ja sai keksinnöstään Nobelin palkinnon 1909. Ostwald keksi myös, että katalyyssi on hyödynnettävissä lähes kaikissa kemiallisissa reaktioissa.

Katalyyysin perustuva kemianteollisuus sai alkunsa 1800-luvun lopulla, ensin rikkihapon ja myöhemmin typpihapon ja ammoniakkin valmistuksella. Näiden kemikaalien kulutus oli suurta, koska maatalous tarvitsi suuria määriä ammoniakkia lannoitteisiin ja rikki- ja typpihappoa puolestaan tarvittiin räjähdeteollisuuteen ensimmäisessä maailmansodassa.

Lähteet:

Armor, J.N., A history of industrial catalysis, *Catalysis Today*, **2011**, 163, 3-9.

Robertson, A.J.B., The early history of catalysis, *Platinum Metals Review*, **1975**, 2, 64-69.

Lindström, B. ja Petterson, L.J., A brief history of catalysis, *Cattech*, **2003**, 7 (4), 130-137.

KATALYYSIN HISTORIA



- Ammoniakin katalyyttistä synteesiä pidetään yhtenä 1900-luvun merkittävimpänä keksintönä.
- Fritz Haber keksi menetelmän, jolla ammoniakkia voidaan syntetisoida alkuaineistaan typestä ja vedystä raudan toimiessa katalyyttinä.
- Carl Bosch kehitti menetelmän teolliselle tuotannolle sopivaksi ja nykyisin reaktio on tunnetaankin Haber-Boschin reaktiona.
- Reaktion avulla saatiin tuotettua suuria määriä ammoniakkia maatalouden lannoitteita varten, joka puolestaan sai aikaan eksponentiaalisen maatalouden tuottavuuden kasvun.

→ Ravintoa lähes miljardille ihmiselle

Ammoniakin katalyyttistä synteessin keksimistä vuonna 1908 pidetään 1900-luvun merkittävimpänä keksintönä.

Fritz Haber keksi menetelmän, millä ammoniakkia voidaan syntetisoida alkuaineistaan typestä ja vedystä, raudan toimiessa katalyyttinä. Carl Bosch kehitti Haberin menetelmää teolliselle tuotannolle sopivaksi ja nykyisin reaktio tunnetaankin Haber-Bosch-reaktiona. Reaktion avulla saatiin tuotettua suuria määriä ammoniakkia maatalouden lannoitteita varten (Lannoitteissa ammoniakki toimii typen lähteenä, joka on välttämätön ravinne kasveille). Typpipitoisten lannoitteiden avulla saatiin aikaan eksponentiaalinen maatalouden tuotannon kasvu, jonka ansiosta saatiin ravintoa lähes miljardille ihmiselle.

Lähde:

Erisman, J., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z. ja Winiwarter, W., How a century of ammonia synthesis changed the world, *Nature Geoscience*, **2008**, 1, 636-639.

KATALYYSIN HISTORIA



- Maailmansotien välissä keksittiin useita merkittäviä katalyysireaktiota mm. Fisher – Tropschin synteesi.
 - Moderni petrokemia sai alkunsa Eugene Houndryn keksimästä öljyn katalyyttisen krakkauksen eli pilkkomisen myötä.
 - Petrokemian kehittämisellä on ollut suuri merkitys ihmisten elämänlaadun parantumiselle, kun yhteiskuntaan saatiin esimerkiksi muovituotteita ja farmaseuttisia valmisteita.
- Ilman katalyysin keksimistä modernia yhteiskuntaa ei olisi syntynyt!

Ensimmäisen ja toisen maailmansodan välisenä aikana keksittiin useita merkittäviä katalyysireaktiota kuten esimerkiksi Fisher-Tropschin katalyyttinen hiilivetyisynteesi. Reaktiossa hiilimonoksidista ja vedystä syntetisoidaan hiilivetyjä rauta- ja kobolttikatalyyteillä. Saksalaiset valmistivat Fisher-Tropschin synteessin avulla polttoaineita toisessa maailmansodassa, kun öljyä ei ollut käytettävissä raaka-aineena.

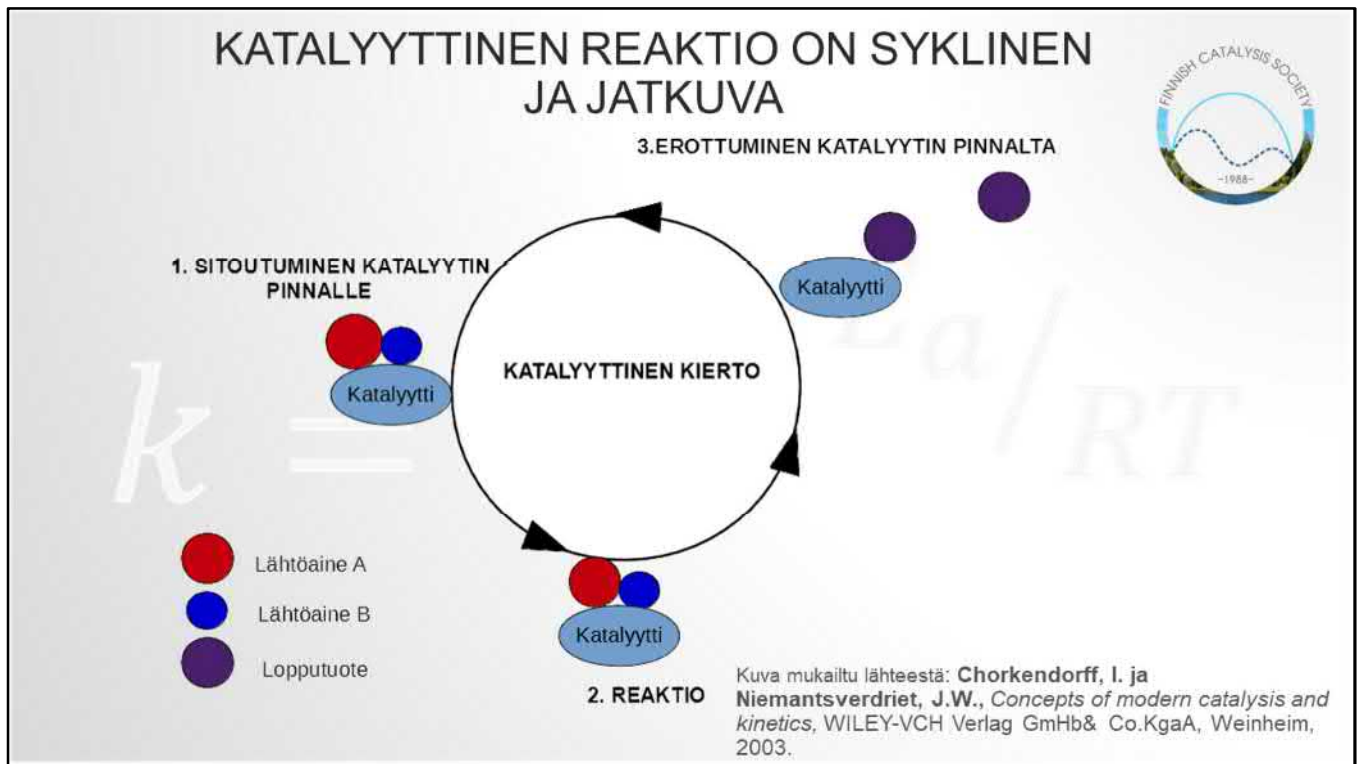
Moderni petrokemia sai alkunsa Eugene Houndryn keksimästä öljyn katalyyttisestä krakkauksesta 1930-luvulla. Petrokemian kehittämisellä on ollut suuri merkitys ihmisten elämänlaadun parantumiselle, kun yhteiskuntaan saatiin muun muassa muovituotteita ja farmaseuttisia valmisteita.

Nykyisin katalyyttinen krakkaus on yleisesti käytössä muun muassa polttoaineiden valmistuksessa. Tämä tulee esille Nesteen materiaalissa.

-> Ilman katalyysin keksimistä modernia yhteiskuntaa ei olisi syntynyt.

Lähde:

Lindström, B. ja Petterson, L.J., A brief history of catalysis, *Cattech*, 2003, 7 (4), 130-137.



Yllä oleva kuva on yksinkertaistettu kuva katalyyttisestä reaktiosyklistä, mutta havainnollistaa reaktion idean

Katalyyttinen reaktio on syklinen ja jatkuva tapahtuma, johon katalyytti ottaa osaa siinä itse kulumatta. Katalyytti kiihdyttää kemiallista reaktiota muodostamalla sidoksia reagoivien aineiden kanssa. (kohta 1) Reagoivat aineet sitoutuvat katalyytin pinnalle, missä katalyyttinen reaktio tapahtuu. (kohta 2) Reaktion jälkeen reaktiotuotteet vapautetaan katalyytin pinnalta, jonka jälkeen katalyytti jatkaa seuraavaan reaktiosykliin. (kohta 3)

Lähde: **Chorkendorff, I. ja Niemantsverdriet, J.W.**, *Concepts of modern catalysis and kinetics*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGAA, Weinheim, 2003.

Kuva mukailtu yllä mainitusta lähteestä.

Katalyysireaktioiden jaottelu:



1. Homogeeninen katalyysi

= reaktion lähtöaineet ovat katalyytin kanssa samassa faasissa

2. Heterogeeninen katalyysi

= reaktion lähtöaineet ovat katalyytin kanssa eri faasissa

3. Biologinen katalyysi

= katalyyttinä toimii entsyymi

Katalyysireaktiot jaotellaan usein kolmeen alasektoriin sen mukaan ovatko katalyytti ja reagoivat aineet samassa vai eri faasissa. Mikäli lähtöaineet ovat katalyytin kanssa samassa faasissa, kyseessä on homogeeninen katalyysi. Ollessaan eri faasissa kyseessä on puolestaan heterogeeninen katalyysi. Termiä biologinen katalyysi käytetään, kun katalyytteinä toimivat entsyymit. Biologinen katalyysi voi olla homogeeninen tai heterogeeninen.

Lähde: **Chorkendorff, I. ja Niemantsverdriet, J.W.**, *Concepts of modern catalysis and kinetics*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003.

Heterogeeninen katalyysi



- Kemian teollisuudesta 90 % hyödyntää katalyysiä
- Eniten käytetään heterogeenista katalyysiä, koska sitä voidaan käyttää monenlaisissa reaktioissa ja sen terminen kestävyys on stabiilimpi.
- Heterogeenisessa katalyysissä reaktio tapahtuu useimmiten kiinteän katalyytin pinnalla ja lähtöaineet ovat joko liuos- tai kaasufaasissa.
- Heterogeenistä katalyysiä käytetään esimerkiksi öljynjalostuksessa ja kemikaalien tuotannossa pääsääntöisesti, samoin vihreän kemian katalyysireaktiot ovat heterogeenisiä.

Kemian teollisuudesta suurin osa hyödyntää katalyysiä prosesseissaan.

Heterogeeninen katalyysi on teollisuuden kannalta tärkeämpi, koska sitä voidaan soveltaa monentyyppisiin reaktioihin ja sen terminen stabiilius on korkeampi. Suurin osa katalyysireaktioista on heterogeenisiä, jolloin useimmissa tapauksissa kiinteän katalyytin pinnalla reagoivat liuos- tai kaasufaasissa olevat lähtöaineet. Öljynjalostus ja kemikaalien tuotanto hyödyntävät heterogeenista katalyysiä ja samoin vihreän kemian katalyysireaktiot ovat heterogeenisiä.

Lähde:

Chorkendorff, I. ja Niemantsverdriet, J.W., *Concepts of modern catalysis and kinetics*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003.

Bhaduri, S. ja Mukesh, D., *Homogenous catalysis: Mechanism and Industrial applications*, 2. painos, Wiley, 2014.

Homogeeninen katalyysi



- Etuna valikoituvuus
 - ei-toivottujen tuotteiden syntyminen minimoituu ja hyötysuhde paranee
 - homogeeninen katalyysi nousemassa merkittävämmäksi tuotantotavaksi esimerkiksi farmaseuttisten aineiden ja hienokemikaalien tuotannossa
- Ongelmana katalyytin ja tuotteiden erottamisen vaikeus, joka nostaa prosessin hintaa

Homogeenisen katalyytin etuna on korkea valikoituvuus eli tällöin ei-toivottujen tuotteiden syntyminen minimoituu ja hyötysuhde paranee. Näistä syistä homogeeninen katalyysi on tulossa merkittävämmäksi tuotantotavaksi esimerkiksi farmaseuttisten aineiden ja hienokemikaalien tuotannossa. Homogeenisen katalyytin ongelmana on katalyytin ja tuotteiden erottamisen vaikeus, joka nostaa prosessin hintaa.

Lähde:

Bhaduri, S. ja Mukesh, D., *Homogenous catalysis: Mechanism and Industrial applications*, 2. painos, Wiley, 2014.

Katalyyssi öljynjalostuksessa

NESTE

Nesteen esityksen tarkoituksena on havainnollistaa katalyyysin merkitys öljynjalostuksessa ja polttoaineiden valmistuksessa. Öljynjalostus on suurin katalyyssiä hyödyntävä sektori.

Esityksen sisältö:

Miten katalyyssiä käytetään öljynjalostuksessa?
Miten valmistetaan bensiiniä, dieseliä?
Öljynjalostuksen tulevaisuuden näkymät

Lähes kaikki öljynjalostuksen vaiheet tarvitsevat katalyyttejä ja mahdollistavat näin öljynjalostuksen

- Öljynjalostuksessa raakaöljystä jalostetaan satoja tuotteita ja tuotekomponentteja, jätteistä ja tähteistä tehdään dieseliä



- Polttokaasu prosessiin
 - Propani & butaani
 - Liuotin
 - Bensiini, pienmoottoribensiini
 - Kerosiini
 - Diesel, lämmitysöljy
 - Perusöljy
 - Raskas polttoöljy
 - Rikki
 - Bitumi
 - Asfalteeni
 - Raakaöljy
- Katalyyttinen yksikkö
- Ei-katalyyttinen yksikkö

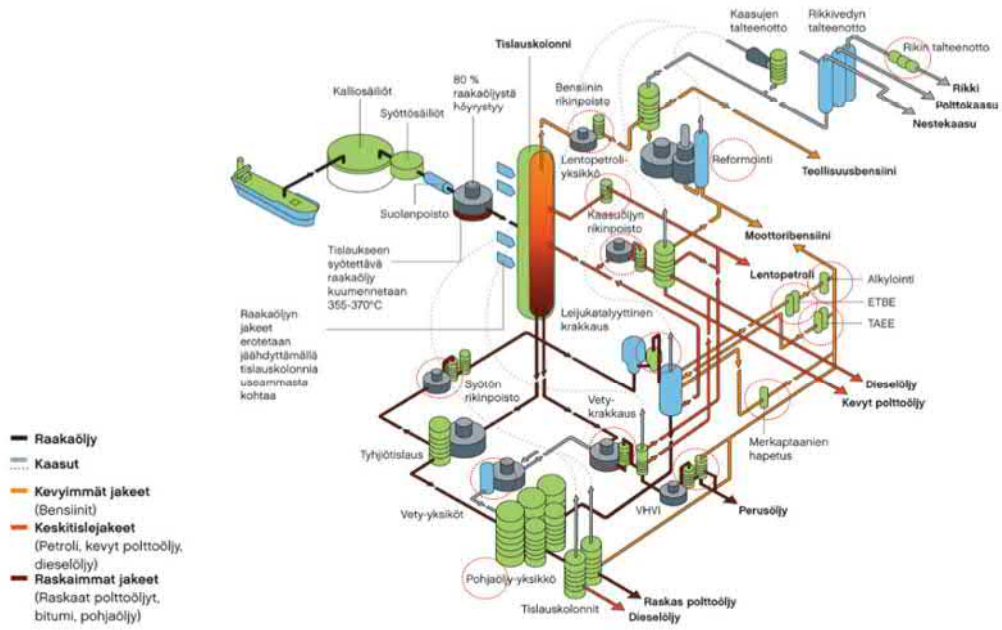
NESTE

Katalyyssi on välttämätöntä öljynjalostuksessa ja sitä hyödynnetään useissa prosessivaiheissa. Ilman katalyyssiä yhteiskunnalla ei olisi polttoaineita liikenteeseen eikä energiantuotantoon.

Esityksessä on keskitytty tuttujen polttoaineiden kuten bensiinin ja dieselin valmistukseen. Seuraava dia on prosessikaavio, jonka voi näyttää lisätietona tai yleisesti havainnollistamaan, mitä kaikkea öljystä valmistetaan.

Öljynjalostus on monimutkainen prosessi, jossa raakaöljystä tuotetaan monia tuotteita useiden reaktioiden avulla

 Katalyyttinen prosessi



Öljynjalostuksen prosessikaavio. Katalyyttiset prosessit on merkitty punaisella ympyrällä.

KATALYYSI ÖLJYNJALOSTUKSESSA

- Öljynjalostuksen tarkoituksena on tuottaa liikennepolttoaineita energia- ja kustannustehokkaasti.
- Tässä katalyytit ovat tärkeässä asemassa, ne mahdollistavat tarvittavat reaktiot ja parantavat tuotteiden laatua
- Tunnettuja liikennepolttoaineita ovat esimerkiksi bensiini, kerosiini ja diesel
- Liikennepolttoaineet koostetaan komponenteista, joiden ominaisuuksia on paranneltu katalyyttisin prosessein



NESTE

KATALYYSI ÖLJYNJALOSTUKSESSA

Katalyydin avulla suoritetaan esimerkiksi seuraavia toimintoja:

- Tuotteista poistetaan epäpuhtauksia (esim. rikinpoisto, typenpoisto)
- Komponentteja muokataan polttoaineiksi sopiviksi tuotteiksi (esim. krakkaus, vetykrakkaus, reformointi)
- Tuotteiden ominaisuuksia parannetaan (esim. aromaattien poisto, reformointi, isomerointi)



Krakkaus= hiilivetyjen pilkkominen katalyytin avulla polttoaineelle sopivan mittaisiksi hiilivedyiksi

Vetykrakkaus= pilkkominen vedyn läsnä ollessa katalyytin ja lämmön avulla

Reformointi= polttoaineen oktaaniluvun nostaminen tai tuoteominaisuuden parantaminen

Isomerointi= Hiilivetyketjun haaroittaminen katalyytin avulla

NESTE

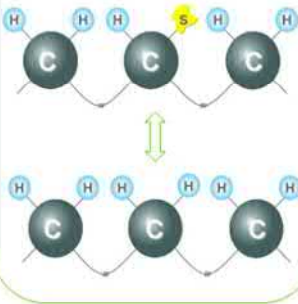
Vetykrakkauksessa ei käytetä vety-katalyyttiä vaan krakkaus tapahtuu vedyn läsnä ollessa käyttäen apuna myös katalyyttiä.

Krakkausprosessissa vetyä ei syötetä prosessiin vaan krakkaus tapahtuu lämmön ja katalyytin ansiosta.

Bensiinin valmistus vaatii monia katalyyttisiä vaiheita, joilla parannetaan tuotteen laatua

Rikinpoisto

- Rikinpoistossa poistetaan tuotteelle haitallisia rikkikomponentteja
- Sulfidoitu CoMo tai NiMo katalyytti



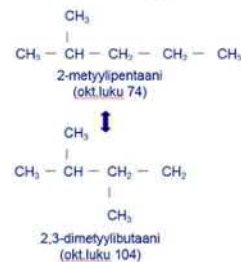
Hydraus

- Hydrauksessa poistetaan haitallinen bentseeni vedyttämällä se sykloheksaaniksi
- Nikkelikatalyytti



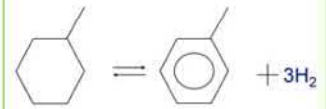
Isomerointi

- Isomeroinnissa bensiinin tuoteominaisuuksia parannetaan nostamalla oktaanilukua
- Platinakatalyytti



Reformointi

- Reformoinnissa bensiinin tuoteominaisuuksia parannetaan nostamalla oktaanilukua
- Platinakatalyytti



NESTE

Katalyyttisillä reaktioilla poistetaan bensiinille(tuotteelle) haitalliset rikkiyhdisteet sekä bentseeni.

Rikkiä poistetaan bensiinistä päästöjen vähentämiseksi. Rikki toimii katalyyttimyrkkinä tietyille katalyyteille. Sen vuoksi rikki tulee poistaa ennen näitä jalostamoyksiköitä. Lisäksi rikin poiston jälkeen hiilivedyt muuttuvat stabiilimmiksi.

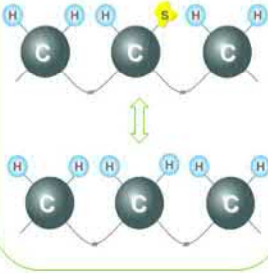
Bentseeni poistetaan, koska se on myrkyllistä ja aiheuttaa syöpää.

Lisäksi katalyyttiä käytetään sekä isomeroinnissa että reformoinnissa, jotka molemmat nostavat oktaanilukua. Oktaaniluvun nostaminen parantaa bensiinin puristuskestävyyttä.

Dieselin valmistus vaatii monia katalyyttisiä vaiheita, joilla parannetaan tuotteen laatua

Rikinpoisto

- Rikinpoistossa poistetaan tuotteelle haitallisia rikkikomponentteja
- Sulfidoitu CoMo tai NiMo katalyytti



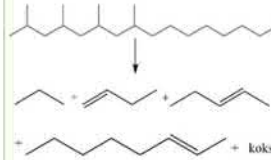
Aromaatinpoisto

- Aromaatinpoistossa dieselin tuoteominaisuuksia parannetaan poistamalla erilaisia aromaatteja kuten esimerkiksi bentseeni
- Nikkelikatalyytti



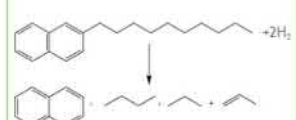
Krakkkaus

- Krakkauksessa pitkät ketjuiset hiilivetyjä katkotaan dieselin komponenteiksi sopiviksi ilman vetyä
- Zeoliittikatalyytti



Vetykrakkkaus

- Vetykrakkauksessa pitkät ketjuiset hiilivetyjä katkotaan dieselin komponenteiksi sopiviksi vedyn avulla
- Jalometallikatalyytti



NESTE

Katalyyttisillä reaktioilla poistetaan dieselille haitalliset rikkijyhdisteet sekä aromaattit (eli bentseeni sekä muut aromaattit).

Rikkiä poistetaan dieselistä päästöjen vähentämiseksi. Rikki toimii katalyyttimyrkkinä tietyille katalyyteille. Sen vuoksi rikki tulee poistaa ennen näitä jalostamoyksiköitä. Lisäksi rikin poiston jälkeen hiilivedyt muuttuvat stabiilimmiksi.

Aromaatteja poistetaan dieselistä parantamaan tuoteominaisuuksia. Aromaattit tuottavat emissiopäästöjä, nostavat tuotteen tiheyttä ja tuottavat myrkyllistä bentseeniä palaessaan. Polyaromaattien määrä dieselissä on tämän hetkisinä rajoituksilla 11p-%.

Bentseeni poistetaan, koska se on myrkyllistä ja aiheuttaa syöpää.

Katalyyttejä käytetään myös krakkauksprosesseissa, jossa hiilivedyt katkotaan dieselille sopivan pituisiksi.

Biomassan hyödyntäminen liikennepolttoaineiden tuotannossa on erittäin tärkeää jatkuvuuden takaamiseksi

- Biomassaa voidaan hyödyntää usealla tavalla öljynjalostuksessa. Siitä voidaan valmistaa liikennepolttoaineiden ominaisuuksia parantavia komponentteja (esim. ETBE), dieseliä tai käsitellä sitä fossiilisen raakaöljysyötön joukossa jalostamalla, tuottaen esimerkiksi bensiiniä, dieseliä ja kerosiinia
- Raaka-aineina voidaan käyttää esimerkiksi biopohjaista etanolia, eläinrasvoja ja öljyjä



Eläinrasva elintarviketeollisuuden jätteestä



Kalarasva elintarviketeollisuuden jätteestä



Kasviöljyjalostuksen jätteet ja tähteet (mm. PFAD, PES, SBEO)



Käytetty paistorasva



Tekninen maissiöljy



Raakapalmuöljy



Rypsiöljy



Soijaöljy



Camelinaöljy



Jatrophaöljy

NESTE

Öljyn riittävydestä on erilaisia arvioita ja tiedossa on, että tarvitaan muitakin polttoaineiden valmistukseen sopivia raaka-aineita. Näitä ovat esimerkiksi biomassat, joista Neste käyttää esimerkiksi yllä olevia lähteitä.

ETBE on korkean oktaaniluvun komponentti, jota lisäämällä voidaan nostaa bensiinin oktaanilukua.

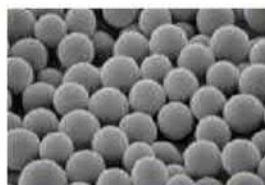
Eetteröintireaktioilla voidaan valmistaa korkealaatuisia bensakomponentteja

- MTBE (*metyyli-tert-butyyli eetteri*)
 - metanoli + isobuteeni
- ETBE (*etyyli-tert-butyyli eetteri*)
 - etanoli + isobuteeni
- TAME (*tert-amyyli-metyyli eetteri*)
 - metanoli + C5-C6-isoalkeeni
- TAE (i.e. TAE) (*tert-amyyli-etyyli eetteri*)
 - etanoli + C5-C6-isoalkeeni

Etanoli on biomassasta valmistettu, myös metanoli voi olla tulevaisuudessa. Alkeenit on valmistettu raakaöljystä.

Eetteröintireaktio ei tapahdu ilman katalyyttiä!!

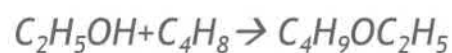
Katalyyttinä eetteröintireaktiossa toimii hapan ionivaihtohartsit



Mikroskooppikuva ioni-vaihtohartista



Valokuva ioni-vaihtohartista



NESTE

Edellisen kalvon biomassasta voidaan siis valmistaa itse polttoaineita mutta myös komponentteja kuten ETBE, jolla voidaan parantaa esimerkiksi bensiinin ominaisuuksia.

ETBE valmistetaan etanolista ja isobuteenista, jossa etanoli on biomassasta syntetisoitua.

Öljynjalostuksen tulevaisuus

- Öljynjalostuksen tulevaisuus vaatii prosessien tehostamista; tuotteiden laatua ja määrää optimoidaan ja energiatehokkuutta tehostetaan jatkuvasti
- Tulevaisuudessa uusiutuvan biomassan ja kiertotalousraaka-aineiden (esim. muovi) osuus öljynjalostuksen raaka-aineena tulee lisääntymään
- Tulevaisuudessa uutena mukaan tulee myös fossiilisen ja uusiutuvan raaka-aineen yhtäaikainen jalostaminen
- Öljynjalostuksen tulevaisuuden visiona on kiertotalouden avulla edistää hiilineutraalia yhteiskuntaa ja olla mukana kestävässä kehityksessä



NESTE

Katalysaattorit päästöjen puhdistuksessa

Teuvo Maunula

going the extra mile



Dinex Finland Oy on katalysaattoreita valmistava yritys Laukaassa, lähellä Jyväskylää.

Materiaalin tarkoitus on toimia esimerkkinä katalyysiä hyödyntävästä sektorista-vihreästä kemiasta.

Esityksen sisältö:

Johdanto

Katalysaattorit päästöjen vähentämisessä

Pakokaasukatalysaattorit autoissa

Katalyytit päästöjen puhdistukseen

Katalysaattorin rakenne

Bensiini,-diesel- ja polttoöljyä käyttävän kuljetuksen katalysaattorit

Yhteenveto

Johdanto

- Katalyyssaattorit ovat tulleet vaiheittain käyttöön 1970-luvulta lähtien, ensin kehittyneissä maissa kuten Yhdysvalloissa, Japanissa ja Euroopassa. Osassa Afrikan ja Aasian maita katalyyssaattoreita ei ole edelleenkään käytössä, etenkin kuorma- autoissa.
- Katalyyssaattoreiden kaupallinen käyttö alkoi bensiiniautojen katalyyssaattoreilla Kaliforniassa sekä voimalaitosten katalyyssaattoreilla Tokiossa ja Los Angelesissa, jossa savusumu alkoi aiheuttaa terveysongelmia ihmisille.
- Ympäristötietoisuuden lisääntyessä päästörajoitukset ovat astuneet voimaan vähitellen alueittain (EU, USA, Japani, muut alueet), polttoainetyypeittäin ja kohteittain (henkilöautot, kuorma-autot, pienkoneet, työkoneet, laivat, junat, voimalaitokset).
- Katalyyttiset perusreaktiot, kuten CO:n ja HC:n hapetus sekä NO_x (typen oksidien) pelkistymiset olivat tiedossa jo ennen päästökatalyyssaattoreiden keksimistä/käyttöönottoa.
- Esityksessä on lyhyesti esitelty pakokaasukatalyyssaattorin rakenne, reaktiot ja toimintaperiaatteet, sekä erilaisten katalyyssaattoreiden erot

Katalysaattorit päästöjen vähentämisessä

- Katalysaattoreilla vähennetään terveydelle ja ympäristölle haitallisten hiilimonoksidin (CO), hiilivetyjen (HC), typen oksidien (NO_x:t) sekä partikkeleiden määrää pako- ja savukaasuissa
- Autoissa katalyyttien tulee toimia vaihtelevissa olosuhteissa (kylmä tai kuuma pakokaasu), mutta voimalaitoksissa olosuhteet pakokaasussa ovat koko ajan lähes samat.
- Katalysaattoreita käytettäessä tavoitteena on myös pitää hiilidioksidipäästöt (CO₂) mahdollisimman alhaisina, koska ylimääräiset järjestelmät lisäävät ajoneuvon painoa, virtausvastuksia putkistoissa ja saattavat vaatia moottorilta polttoaineen kulutusta eli hiilidioksidipäästöjä lisääviä säätöjä.

going the extra mile

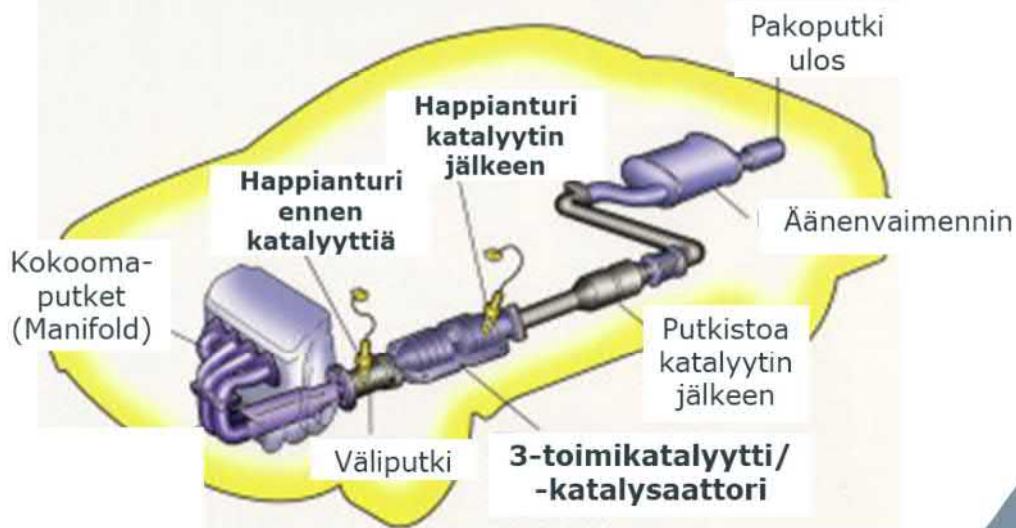


Pakokaasu sisältää haitallisia kaasumaisia yhdisteitä kuten hiilimonoksidi, hiilivedyt ja typen oksidit. Lisäksi pakokaasu sisältää palamisessa muodostuvia pieniä (noki)partikkeleita, jotka pääsevät elimistöön hengitettäessä aiheuttaen monia sairauksia. Pienimpiä nanopartikkeleita on pakokaasussa lukumäärältään suurin määrä ja ne voivat kulkeutua keuhkoista jopa verenkiertoon. Tästä syystä partikkeleiden lukumäärään on alettu kiinnittää huomiota partikkelien massan lisäksi.

Hiilidioksidi aiheuttaa ilmaston lämpenemistä!!

Pakokaasukatalyyssaattorit autoissa

Pakokaasukatalyytit ovat tulleet osaksi äänenvaimenninta ja pakoputkistoa



Katalysaattori kuorineen

going the extra mile

Kuva: <https://autointohimo.wordpress.com>

dINEX

Kaavakuva katalysaattorin sijoittumisesta autoissa.

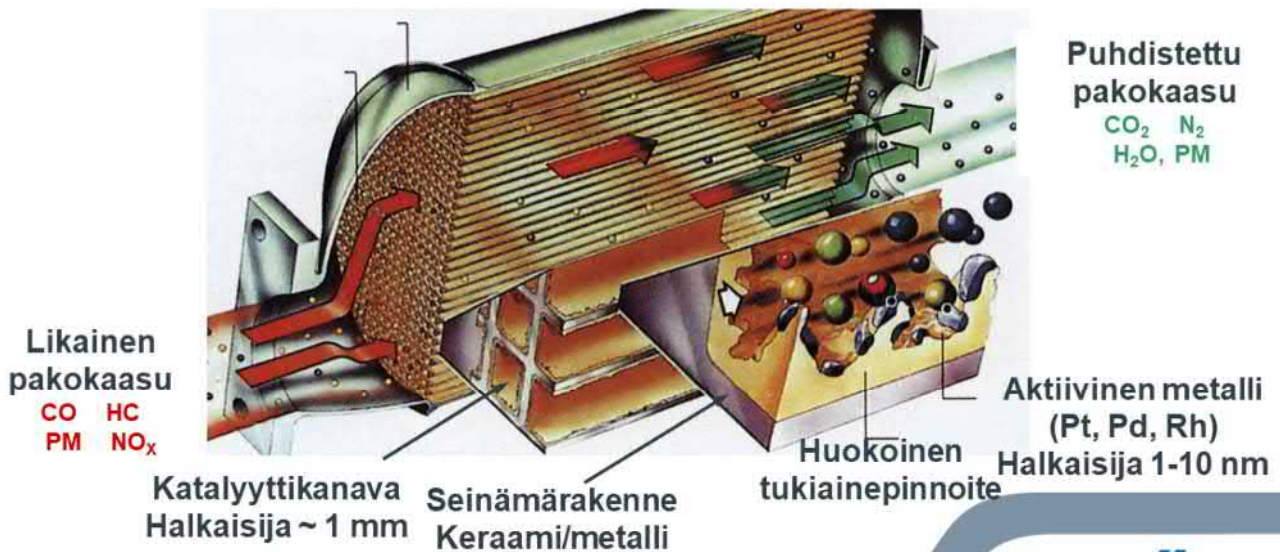
Katalyytit päästöjen puhdistukseen

- Kaupalliset katalysaattorit ovat samanlaisia kennomaisia rakenteeltaan, mutta katalysaattorityypit (katalyysipinnoitteet) riippuvat käyttökohteista.
- Polttoaineiden laatu (rikki-, aromaatti-, ja tuhkapitoisuus) ovat muuttuneet sinä aikana, kun katalysaattoreita on otettu käyttöön.
- Kehittyneet katalysaattorit ja suodattimet eivät kestä tai tukkeentuvat huonolaatuisilla polttoaineilla
- Katalyytti rakentuu kennomaisesta tukirakenteesta, huokoisesta tukiaineesta, aktiivisista metalleista sekä stabilaattoreita ja promoottoreista, jotka edistävät termisestä kestävyttä tai reaktiota.

going the extra mile



Pakokaasukatalyytin rakenne



going the extra mile

dINEX

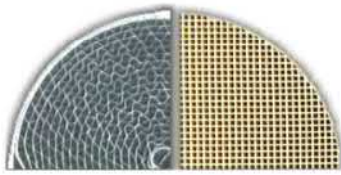
Rakennekuva katalysaattorista

Katalysaattorit ovat rakenteeltaan kennomaisia, joiden aktiivisina katalyytipintoina (katalyytteinä) toimivat metallit, usein jalometallit, jotka ovat kalliita.

Käytetty polttoaine ratkaisee katalyyttimetallit.

Katalysaattorit bensiinautoille

- Bensiinautojen pakokaasussa on stökiometriset olosuhteet eli happea on juuri se määrä, mitä tarvitaan palamiseen.
- Bensiinautoissa käytetään kolmitoimikatalysaattoria TWC= Three- Way-Catalyst, jossa CO ja HC:t hapettuvat sekä NO_x:t pelkistyvät yli 90%: sti.
- Kaikissa alle 25 vuotta vanhoissa bensiinautoissa on katalysaattorit, mutta päästöt ovat sitä alhaisemmat mitä uudempi auto on.



Metallinen ja keraaminen katalyyttikenno

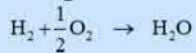
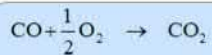
going the extra mile



Katalyyttireaktiot pakokaasukatalyyteissä

Perusreaktiot on samoja monissa pakokaasukatalyyteissä, esimerkiksi 3- toimikatalyytissä:

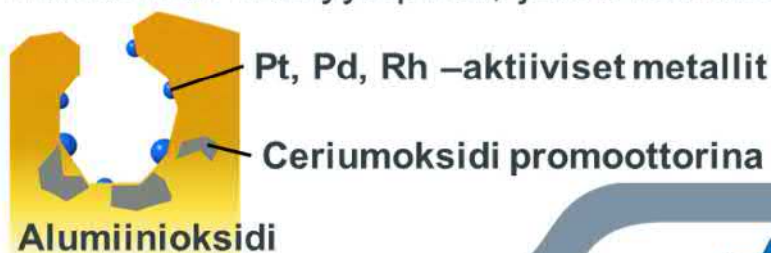
Hapetusreaktiot



NO:n pelkistys (stökiometrinen)



Huokoinen katalyytipinta, jossa reaktiot tapahtuvat



going the extra mile

dINEX

Hapetusreaktiossa hiilimonoksidi ja hiilivedyt hapettuvat hiilidioksidiksi.

Pelkistysreaktiossa typpimonoksidi pelkistyy typpikaasuksi.

Katalysaattori dieselautoille

- Dieselautojen pakokaasussa ilmaa on ylimäärin, jolloin NO_x :t (= $\text{NO}+\text{NO}_2$) eivät voi pelkistyä suoraan pakokaasun pelkistimillä (CO ja HC: t), koska ne reagoivat silloin hapen kanssa.
- Hiilimonoksidi ja hiilivedyt voidaan poistaa dieselhapetuskatalysaattorilla (Diesel Oxidation Catalyst =DOC).
- Viimeisimpien päästörajoitusten (Euro 6 Euroopassa) saavuttamiseksi dieselautoissa tarvitaan myös partikkelisuodatinta (DPF=Diesel Particulate Filter) sekä typen oksidien (NO_x) pelkistämiseen aktiivisia menetelmiä kuten selektiivinen katalyyttinen pelkistys (SCR=Selective Catalytic Reduction) tai NO_x -adsorberi eli LNT (Lean NO_x Trap)
- Partikkelisuodattimien avulla dieselautojen partikkelipäästöt (massa ja lukumäärä) on saatu samalle tasolle bensiiniautojen kanssa. Koska pienimmät partikkelit on terveydelle haitallisimmat, vuodesta 2014 (Euro 6) on tulleet voimaan myös rajat partikkelilukumäärälle (PN) Euroopassa.
- Päästörajat ovat esim. Euroopassa lähes samat uusille bensiini- ja dieselautoille (päästörajojen harmonisointi)

going the extra mile



SCR-katalyytit dieselautoissa

- SCR= selective catalytic reduction eli selektiivinen katalyyttinen pelkistys
- SCR-reaktioissa typen oksidit (NO_x :t) pelkistetään ammoniakkin avulla (autoissa ureatankki ammoniakki lähteenä, tunnetaan myös Adblue:na), jopa 95%:sti.
- SCR:n katalyyteissä aktiivisena yhdisteenä on vanadiini (V), kupari (Cu) tai rauta (Fe) suuripinta-
alaisissa tukiaineissa. Uusimmissa kaupallisissa katalyyteissä on käytössä Cu- ja Fe- zeoliitteja.



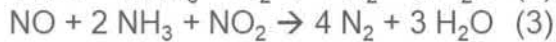
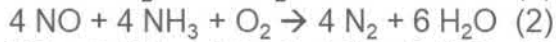
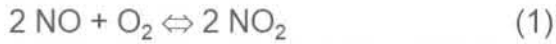
going the extra mile

dINEX

Katalyyttireaktiot SCR- katalyyteissä

SCR-reaktiossa NO_x:t voidaan pelkistää selektiivisesti ammoniakilla, vaikka dieselpakokaasussa on happea ylimäärin. Ammoniakki on selektiivinen pelkistin, toisin kuin CO, vety tai HC:t.

Pääreaktiot katalyyttien pinnalla (lisäksi useita sivureaktioita):



NO₂:n muodostus - promootiovaikutus

Standardi SCR-reaktio (mukana vain NO)

Nopea-SCR (mukana NO ja NO₂, mikä edistää pelkistymistä/promootiota)

going the extra mile

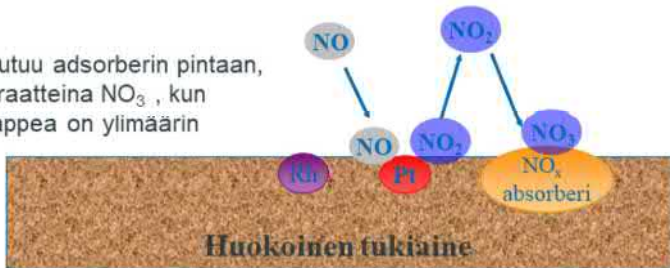


Tämä dia on lisätietoa.

Katalyyttireaktiot NO_x-adsorbereissa

Lambda-arvo (λ) LNT:n heterogeenisissä käyttöolosuhteissa (eli olosuhde on sekä rikas että laiha) dieselautossa.

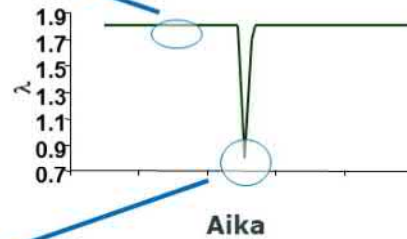
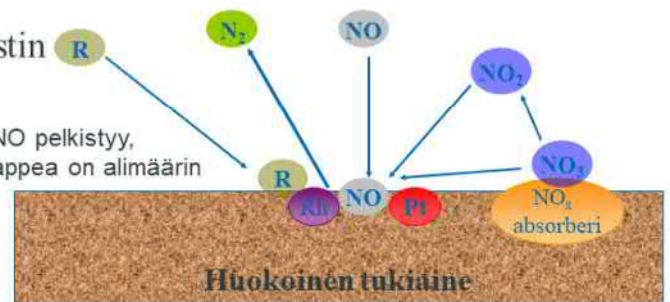
NO sitoutuu adsorberin pintaan, nitraatteina NO₃, kun happea on ylimäärin



Rikkaassa olosuhteessa 3-toimireaktiot jalometallien pinnalla (Pt, Rh)

Rikas $\lambda < 1$ (alimäärä happea pakokaasuss),
Laiha $\lambda > 1$ (ylimäärä happea pakokaasuss),
stökiometrinen $\lambda \sim 1$

Pelkistin R
NO pelkistyy, kun happea on alimäärin



going the extra mile

dINEX

Tämä dia on lisätietoa.

Katalysaattori teollisuus- ja laivakohteissa

- Halvempaa polttoöljyä käytetään puhtaan ajoneuvodieselin sijasta teollisuudessa ja laivoissa.
- Nämä polttoaineet sisältävät usein suuren määrän rikkiä (S) ja muita epäpuhtauksia.
- Rikistä syntyy rikkioksidipäästöjä (SO_x), mitkä aiheuttavat haposateita. Lisäksi SO_x :t vaikeuttavat katalysaattoreiden käyttöä. Tästä syystä polttoaineiden laatua pyritään parantamaan rikkipitoisuutta vähentämällä.
- Teollisuuden, laivaliikenteen ja raskaan liikenteen NO_x -päästöjä vähennetään myös selektiivisellä katalyysireaktiolla eli SCR:llä ja SO_x -päästöjä myös rikkipesureilla.
- Maakaasu on vaihtoehtoinen ja puhdas polttoaine käytettäväksi autoissa ja etenkin teollisuus-, ja laivaliikenteessä. Maakaasun partikkelipäästöt ovat hyvin alhaiset. Maakaasun sisältämän metaanin vähentämiseen on kehitetty myös omat katalysaattorit.

going the extra mile



Laivoissa ja teollisuudessa käytetään likaisempia polttoaineita kuin ajoneuvoissa. Maakaasu on puhtaampi vaihtoehto niihin kohteisiin, mutta maakaasussa oleva metaani on kasvihuonekaasu ja aiheuttaa ilmaston lämpenemistä.

Yhteenveto pakokaasukatalyyysaattoreista

- Katalyyysaattoreilla voidaan puhdistaa tehokkaasti haitalliset yhdisteet pakokaasuista.
- Nykyisissä autoissa katalyyysaattorit ja niiden säätöjärjestelmät ovat hyvin monimutkaisia ja kalliita. Ne sisältävät tavallisesti myös jalometalleja kuten platinaa, palladiumia ja rodiumia.
- Bensiini- ja dieselautoissa on rakenteeltaan samanlaisia kennomaisia katalyyttirakenteita, mutta katalyyttipinnoitteiden koostumus on hyvin erilainen.
- Dieselautoissa on partikkelisuodatin, joka voi olla myös katalyytillä pinnoitettu. Dieselautojen katalyyttiset puhdistusjärjestelmät ovat suuria ja monimutkaisia.
- Pakokaasukatalyyttejä suunniteltaessa on otettava huomioon myös kasvihuonepäästöt CO₂ ja metaani CH₄.



Euro 2/1996



Euro 6/2014 /kuorma-auto

going the extra mile



Katalyyysaattoreilla pystytään huomattavasti vähentämään liikenteen ja teollisuuden aiheuttamia haitallisia päästöjä. Katalyyysaattoreiden toiminta perustuu katalyyysiin. Nykyiset katalyyysaattorijärjestelmät ovat etenkin dieselajoneuvoissa hyvin monimutkaisia.

Vielä ei ole keksitty ratkaisua hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi/poistamiseksi tai hiilidioksidin jatkojalostamiseksi.



KATALYYSITIT

 $k = \frac{1}{\tau}$

Tässä esityksessä tutustutaan tarkemmin katalyytteihin.

Esityksen sisältö:

Mitä ovat katalyytit?

Millaisia materiaaleja katalyytit voivat olla?

Katalyyttien valintaan vaikuttavia ominaisuuksia

Mikä on kantaja?

Katalyysitutkimus Suomessa

MITÄ OVAT KATALYYTIT?

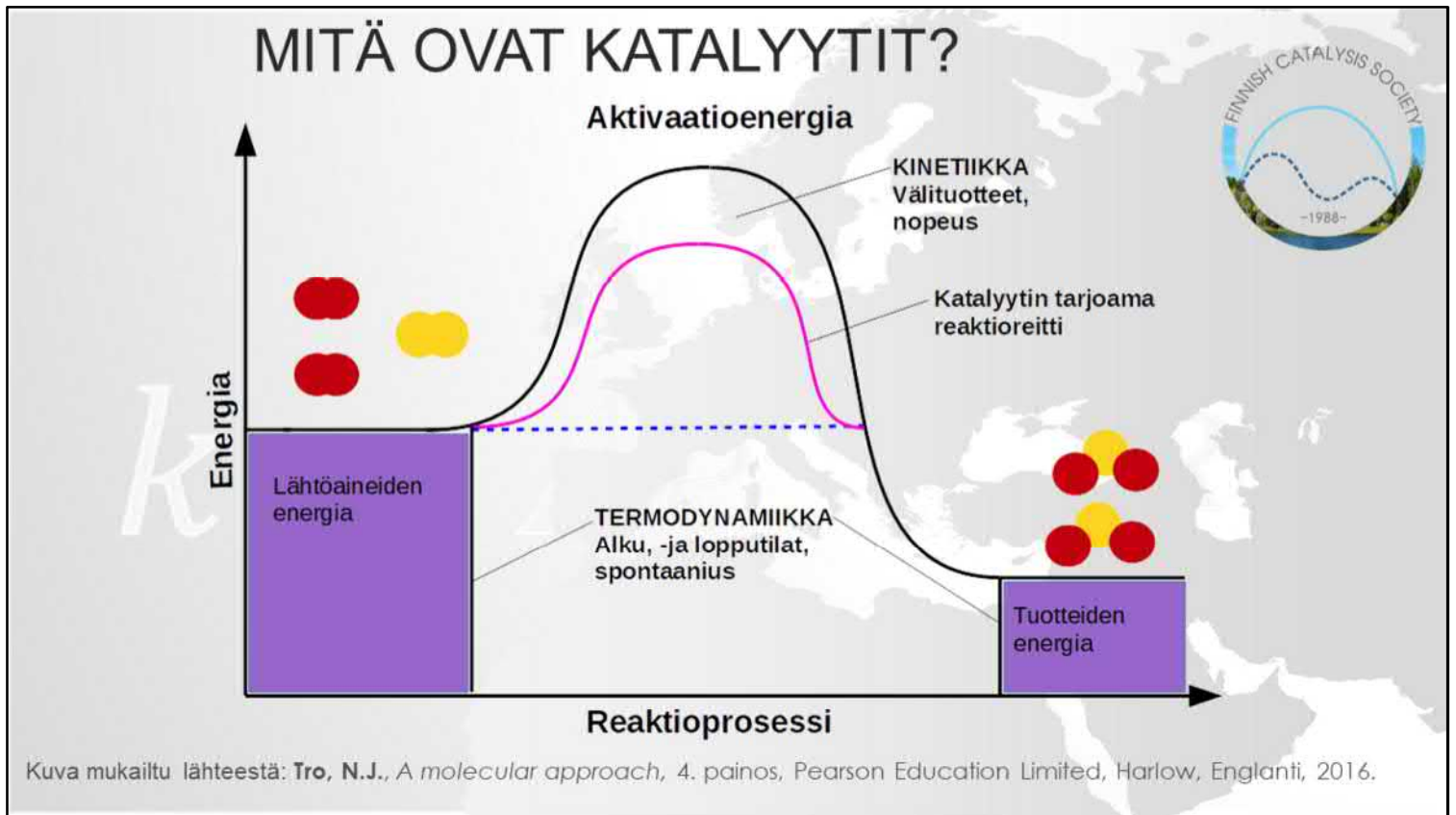


- Katalyytit ovat aineita, jotka kiihdyttävät kemiallista reaktiota muodostamalla sidoksia lähtöaineiden kanssa.
- Katalyytti tarjoaa reaktiolle energeettisesti suotuisamman reaktioreitin alentamalla reaktion aktivaatioenergiaa.
- Eivät kulu eivätkä muutu reaktion aikana

Lähteet:

Tro, N.J., A molecular approach, 4. painos, Pearson Education Limited, Harlow, Englanti, 2016.

Chorkendorff, I. ja Niemantsverdriet, J.W., Concepts of modern catalysis and kinetics, WILEY-VCH Verlag GmHb& Co.KgaA, Weinheim, 2003.



Katalyytit alentavat reaktion aktivaatioenergiaa, näin tarjoten energisesti suotuisamman reaktioreitin.

Katalyytit vaikuttavat vain reaktion kinetiikkaan eivät termodynamiikkaan. Lähtöaineiden ja tuotteiden energia eivät siis muutu katalyytin käytön myötä ja siten katalyytti ei myöskään vaikuta reaktion spontaaniteuteen.

Lähteet:

Tro, N.J., *A molecular approach*, 4. painos, Pearson Education Limited, Harlow, Englanti, 2016.

Chorkendorff, I. ja Niemantsverdriet, J.W., *Concepts of modern catalysis and kinetics*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGAA, Weinheim, 2003.

MILLAISIA AINEITA KATALYYSIT VOIVAT OLLA?



- Katalyytit voivat olla esimerkiksi metalleja, happoja ja emäksiä
- Katalyytit ovat kirjava joukko erilaisia muotoja kuten esimerkiksi:
 - atomeja
 - molekyylejä
 - isoja rakenteita, esim. zeoliitteja
 - (alumiinisilikaateista koostuvien huokoisten mineraalien ryhmiä)
- Katalyytit luokitellaan seuraavasti:
 - Homogeenin katalyytti on samassa faasissa reagoivien aineiden kanssa
 - Heterogeeninen katalyytti on eri faasissa reagoivien kanssa
 - Biologinen katalyytti tarkoittaa katalyytin olevan entsyymi

Katalyytteinä voidaan käyttää monenlaisia aineita ja materiaaleja. Katalyytin valintaan vaikuttavat useat eri tekijät. (Seuraava dia)

Katalyytit luokitellaan homogeeniseksi, heterogeeniseksi ja biologiseksi yllä olevan dian mukaisesti.

Lähteet:

Tro, N.J., A molecular approach, 4. painos, Pearson Education Limited, Harlow, Englanti, 2016.

Chorkendorff, I. ja Niemantsverdriet, J.W., Concepts of modern catalysis and kinetics, WILEY-VCH Verlag GmHb& Co.KgaA, Weinheim, 2003.

TÄRKEITÄ KATALYYTIN VALINTAAN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ



Aktiivisuus

- Aktiivisuudella tarkoitetaan syntyvien molekyylien määrää yhtä katalyyttimolekyyliä kohden
- Hyvä katalyytti on mahdollisimman aktiivinen
- Katalyytin aktiivinen keskus voi olla metallonanopartikkeli, metalliyhdiste, entsyymi tai happo/emäs

Valikoituvuus

- Valittu katalyytti katalysoi vai tiettyä reaktiota
 - Valikoituvuutta on erityyppistä
 - Katalyyttisissä reaktioissa syntyy aina useampia tuotteita. Valikoiva katalyytti tuottaa eniten tai nopeimmin haluttua tuotetta.
- Katalyytin aktiivisuuteen ja valikoituvuuteen vaikuttavat metallinanopartikkelien koko, metallin hapetusaste, valittu entsyymi tai happamuus-/emäksisyysaste

Kaksi tärkeintä katalyytin valintaan vaikuttavaa tekijää ovat aktiivisuus ja valikoituvuus.

Mitä aktiivisempi katalyytti on, sitä enemmän saadaan tuotettua haluttua tuotetta ja näin optimoitua reaktion kustannustehokkuutta.

Valikoituvuudella voidaan parhaiten vaikuttaa siihen, että reaktiossa syntyy halutun tuotteen lisäksi mahdollisimman vähän ei-toivottuja sivutuotteita. Sivutuotteet voivat olla haitallisia ihmiselle ja ympäristölle, joten valikoituvuus on tärkeä ominaisuus myös ympäristönsuojelun ja turvallisuuden näkökulmasta.

Lähteet:

Bhaduri, S. ja Mukesh, D., Homogenous catalysis: Mechanism and Industrial applications, 2. painos, Wiley, 2014.

Chorkendorff, I. ja Niemantsverdriet, J.W., Concepts of Modern Catalysis and Kinetics, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003.

Katalyysitutkimus, Åbo Akademi, Teknillisen kemian ja reaktiotekniikan laboratorio, Mikkola, J-P., Mäki-Arvela, P., Virtanen, P., sähköpostikeskustelu, 7.6.2018.

Uudelleenkäyttö

- Katalyyteille etsitään katalyysin jälkeen muu käyttökohde, erityisesti arvokkaille metallikatalyyteille
- Kun katalyytin aktiivisuus on käytetty, on tärkeää, että katalyyttiä voidaan käyttää johonkin muuhun tarkoitukseen
- Tärkeä kiertotalouden toimintamalli



Hinta

- Teollisuudessa katalyyttiä tarvitaan suuria määriä, joten hinta vaikuttaa oleellisesti katalyytin valintaan

Ympäristöystävällisyys

- Katalyyttejä pitää pystyä käsittelemään niin, ettei ihmisille ja ympäristölle aiheudu vaaraa

➤ Katalyytin ominaisuuksia ja reaktio-olosuhteita (lämpötila, paine, liuotin) optimoidaan, jotta haluttua tuotetta saataisiin maksimimäärä mahdollisimman pienellä energiamäärällä

Uusien katalyysireaktioiden kehittämisessä uudelleenkäyttö ja ympäristöystävällisyys ovat aktiivisuuden, valikoituvuuden ja hinnan lisäksi tärkeitä katalyytin valintaan vaikuttavia tekijöitä. Prosessit pyritään kehittämään alusta alkaen mahdollisimman kustannustehokkaiksi ja ekologisiksi.

Myös käytössä olevat katalyyttiset prosessit pyritään muokkaamaan vähemmän päästöjä ja ympäristöongelmia tuottaviksi.

Lähteet:

Turpeenoja, L., Mooli 4, Materiaalit ja teknologia, Otava, Helsinki.

Kemia mahdollistaa kiertotalouden ja biotalouden,
<https://www.kemianteollisuus.fi/fi/vastuullisuus/bio-ja-kiertotalous/>, (14.5.2019)

VTT Catalyst Technologies, VTT, Kihlman, J., Simell, P., Reinikainen, M., Kaisalo, N., Putkonen, M., Keskiäli, L. ja Coronado, I.

MIKÄ ON KANTAJA?



- Kemiallisesti inertti ja lämpöstabiili materiaali
- Erityisesti metallonanopartikkelit ovat epästabiileja korkeissa lämpötiloissa ja tarvitsevat kantajan stabiloimaan katalyyttia.
- Aktiivinen keskus kiinnitetään kantajan päälle.
- Kantaja-materiaalin valintaan vaikuttavat materiaalin huokoisuus (ominaispinta-ala), stabiilius (kantajan käyttöikä) ja happamuus
- Tyypillisiä kantajamateriaaleja ovat esimerkiksi oksidit, zeoliitit, zirkonia ja alumina

Kantaja on materiaali, jonka päälle katalyytti kiinnitetään. Kantajan tarkoitus on auttaa katalyytin toimintaa ja helpottaa reaktion hallitsemista.

Kantajalla on vaikutusta etenkin metallikiteiden asettumisessa kantajan pinnalle. Kantaja-materiaalin valintaan vaikuttavatkin erityisesti materiaalin huokoisuus eli ominaispinta-ala, stabiilius (kantajan käyttöikä) sekä happamuus.

Zeoliitti= alumiinisilikaateista koostuvien huokoisten mineraalien ryhmiä

Zirkonia= Zirkoniumdioksidi, (ZrO_2)

Alumina= Alumiinioksidi, (Al_2O_3)

Lähteet:

Chorkendorff, I. ja Niemantsverdriet, J.W., Concepts of modern catalysis and kinetics, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003.

VTT Catalyst Technologies, VTT, Kihlman, J., Simell, P., Reinikainen, M., Kaisalo, N., Putkonen, M., Keskiäli, L. ja Coronado, I.

KATALYYSITUTKIMUS SUOMESSA



Tutkimusta on useissa yliopistoissa

- Jyväskylän yliopisto
- Oulun yliopisto
- Åbo Akademi
- Aalto yliopisto
- Itä-Suomen yliopisto

Lisäksi esimerkiksi VTT:llä, Nesteellä ja Dinex Finlandilla (katalysaattoreiden valmistaja) tehdään katalyysitutkimusta

Katalyysitutkimusta tehdään useissa yliopistoissa ja lisäksi tutkimuslaitoksissa, kuten esimerkiksi VTT:llä.

Seuraavassa tutustutaan yleisellä tasolla suomalaiseen katalyysitutkimukseen.

Esityksen sisältö:

Millaista osaamista katalyysitutkimuksissa tarvitaan?

Mitä katalyysitutkimus käsittää?

Miksi katalyysi tutkitaan/kannattaa tutkia?

Esimerkkejä katalyysitutkimuksista.

MILLAISTA OSAAMISTA TARVITAAN?



➤ Fysiikkaa

-yhdisteiden fysikaaliset vuorovaikutukset ja olomuodot

➤ Kemiaa

-kemialliset reaktiot lähtöaineiden ja katalyytin välillä

➤ Materiaalitiedettä

-erilaisten materiaalien ominaisuudet ja vaikutukset reaktioihin

➤ Ohjelmointi

-tarvitaan erityisesti laskennallisissa tutkimuksissa

Yllä mainittujen lisäksi tarvitaan hyviä vuorovaikutustaitoja, innostuneisuutta, kekseliäisyyttä ja kielitaitoa.

Lähteet:

Katalyysitutkimus, Åbo Akademi, Teknillisen kemian ja reaktiotekniikan laboratorio, Mikkola, J-P., Mäki-Arvela, P., Virtanen, P., 7.6.2018.

VTT Catalyst Technologies, VTT, Kihlman, J., Simell, P., Reinikainen, M., Kaisalo, N., Putkonen, M., Keskiväli, L. ja Coronado, I.

MITÄ KATALYYSITUTKIMUS KÄSITTÄÄ?



- Katalyyttien karakterisointi

- tutkitaan katalyyttien ominaisuuksia eri menetelmillä, jotta ymmärrettäisiin ne mahdollisimman hyvin. Tällöin reaktioiden kulku on helpompi ennustaa ja näin mahdollistuu reaktioprosessin optimointi

- Katalyyttien testaaminen erilaisissa reaktioissa

- Katalyyttien erilaiset valmistusmenetelmät

-Katalyysitutkimukseen kuuluu monenlaisia osa-alueita.

-Katalyyttien karakterisoinnilla pyritään katalyytin ominaisuuksien mahdollisimman hyvään tuntemiseen. Tällöin katalyytin valinta voidaan tehdä mahdollisimman optimaalisesti kyseessä olevalle reaktiolle.

-Katalyyttejä on tärkeää testata erilaisissa olosuhteissa, myös muissa kuin reaktioolosuhteissa, jotta voidaan varautua mahdollisiin yllätyksiin tai välttää ne kokonaan. Katalyytin valinnalla ja säätelemällä olosuhteita (lämpötila, paine, liuotin) voidaan vaikuttaa merkittävästi reaktion kulkuun ja tuottavuuteen ja vähentää ei-toivottujen sivutuotteiden määrää.

-Katalyyttien valmistus pyritään saamaan mahdollisimman kustannustehokkaaksi ja ympäristöystävällisiksi prosesseiksi. Siksi on tärkeää testata katalyyttien erilaisia valmistusmenetelmiä ja lisäksi kehittää uusia valmistusmenetelmiä.

Lähteet:

Katalyysitutkimus, Jyväskylän yliopisto, Honkala, K., 15.11.18

Katalyysitutkimus, Åbo Akademi, Teknillisen kemian ja reaktiotekniikan laboratorio, Mikkola, J-P., Mäki-Arvela, P., Virtanen, P., 7.6.2018.

Katalyytti- ja katalyysitutkimus, Itä-Suomen yliopisto, kemian laitos, Suvanto, M., 30.11.2018.

Katalyysitutkimus, Aalto-yliopisto, Puurunen, R., 5.12.18

Kestävän kemian katalyysitutkimus, Oulun yliopisto, Heponiemi, A., 30.11.2018.

VTT Catalyst Technologies, VTT, Kihlman, J., Simell, P., Reinikainen, M., Kaisalo, N., Putkonen, M., Keskipäli, L. ja Coronado, I., 4.12.2018.

MIKSI KATALYYSIÄ KANNATTAÄ TUTKIA?



- Yhteiskunta tarvitsee toimiakseen monenlaisia materiaaleja ja kemikaaleja
- Kehittämällä uusia katalyyttisiä prosesseja sekä parantamalla olemassa olevia, voidaan tuottaa materiaaleja sekä kemikaaleja:
 - Uusiutuvista raaka-aineista esimerkiksi uusiutuvat polttoaineet ja muovit
 - Reaktio-olosuhteissa, jotka kuluttavat vähemmän energiaa ja tuottavat vähemmän jätettä tai parhaimmillaan ei yhtään
- Tavoitteena ympäristöystävälliset prosessit!

Ilman katalyyssiä uusia kemikaaleja, materiaaleja ja polttoaineita ei pystytä valmistamaan. Katalyyysin hyödyntäminen on välttämätöntä, että kustannukset ja reaktio-olosuhteet pysyvät järkevinä ja lisäksi prosessit voidaan kehittää ympäristölle ystävälliseksi kestäväen kehityksen mukaisiksi.

Lähteet:

VTT Catalyst Technologies, VTT, Kihlman, J., Simell, P., Reinikainen, M., Kaisalo, N., Putkonen, M., Keskiaväli, L. ja Coronado, I., 4.12.2018.

Bartholomew, C.H. and Farrauto, R.W., Fundamentals of catalytic processes, 2. painos, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey

Seuraavassa tutustutaan konkreettisesti, millaista katalyyssitutkimusta suomalaisissa yliopistoissa tehdään.

Materiaalia on paljon, joten tarkoituksena on, että näistä valitaan yksi tai muutama esimerkiksi mielenkiinnon ja ajankäytön mukaan. Jokaiselta alla listatulta yliopistolta sekä VTT: lta on omat esityksensä.

Jyväskylän yliopisto

Oulun yliopisto

Åbo Akademi

Aalto-yliopisto

Itä-Suomen yliopisto

VTT



TUTKIMUSRYHMILLE ESITETYT KYSYMYKSET:

- Millaisia katalyyttisiä prosesseja ja reaktioita tutkitte?
- Mitä katalyyttejä käytätte?
- Mihin kysymyksiin etsitte vastauksia?
- Millaisilla menetelmillä katalyyttisiä prosesseja tutkitaan?
- Mihin katalyysitutkimuksen pitäisi keskittyä?

Kaikille tutkimusryhmille esitettiin diassa olevat kysymykset.



Jyväskylän yliopisto

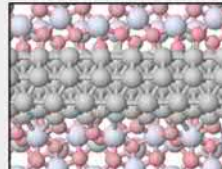
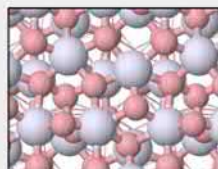
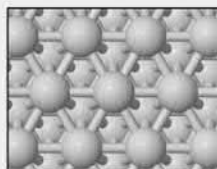
- Millaisia katalyyttisiä prosesseja ja reaktioita tutkutte ?
 - / Tutkimme erityisesti heterogeenisesti katalysoituja hapetus- ja pelkistysreaktioita kuten esimerkiksi kaksoissidosten $C=C$ tai $C=O$ pelkistystä vedyllä kuten esimerkiksi akroleenin vedytys
 - / Yleisesti tutkitaan reaktioita, joilla on teollista mielenkiintoa
- Mitä katalyyttejä käytätte ?
 - / siirtymämetallikatalyyttejä kuten Pt, Pd, Au, Rh, koska ne ovat yleensä kaikkein aktiivisimpia.

Lähde:

Katalyytitutkimus, Jyväskylän yliopisto, Honkala, K., 15.11.2018.



- Mihin kysymyksiin etsitte vastauksia?
 - / Tavoitteena on selvittää miten atomitaso ja elektronirakenteen tekijät vaikuttavat katalyyttisten reaktioiden etenemiseen ja haluttujen tuotemolekyylien saamiseen.
- Millä menetelmillä laskennallista tutkimusta tehdään?
 - / Laskennallisessa tutkimuksessa mallinnetaan katalyysireaktioita ja tarvittavat laskut suoritetaan supertietokoneilla. Tavoitteena on todentaa ja ennustaa reaktioiden ja katalyyttien käyttäytymistä. Tämä auttaa kokeellisten tulosten ymmärtämistä. Laskennallisessa tutkimuksessa käytetään kvanttimekaanisia menetelmiä, joilla kuvaillaan tutkittavan systeemin ydin- ja elektronirakennetta.
 - / Alla esimerkkejä käytetyistä atomistisista laskentamalleista katalyytille. Vasemmalla siirtymämetallin stabiilein pinta, keskellä ZrO_2 pinta ja oikealla malli metalli-oksidirajapinnalle.





- Mihin katalyysitutkimuksen pitäisi keskittyä?
 - / Aktiivisuuden ja selektiivisyyden tutkimiseen, jotta prosesseista saataisiin mahdollisimman tehokkaita ja ympäristöystävällisiä.
 - / Tulevaisuudessa selektiivisyys korostuu, koska biomassapohjaiset raaka-aineet ovat korkeasti funktionalisoituja orgaanisia molekyyliä toisin kuin raakaöljystä saatavat molekyylit. Tämä vaatii uusia katalyyttejä.



UEF– **Kemian laitos**

UEF // University of Eastern Finland

Lähde:
Katalyytti- ja katalyysitutkimus, Itä-Suomen yliopisto, kemian laitos,
Suvanto, M., 30.11.2018

Millaisia katalyyttisiä prosesseja ja reaktioita tutkutte?

- Itä-Suomen yliopistossa tutkitaan **ympäristökatalyytteja**
- Tavoitteena on liikenteessä ja lämmityksessä syntyvien ympäristön kannalta haitallisten päästöjen vähentäminen
 - Tulisijoista vapautuvien pienhiukkasten katalyyttinen eliminointi (puun turvallinen käyttö kotitalouksissa)
 - Pakokaasukatalyyttien kehitys
 - Butaania ja biopolttoaineita käyttävän raskaan liikenteen pakokaasupäästöjen katalyyttinen hallinta
- Lisäksi tutkitaan **polyolefiinimuovien eli polyeteeni (PE) - ja polypropeenimuovien (PP)** valmistusprosessia atomitasolla

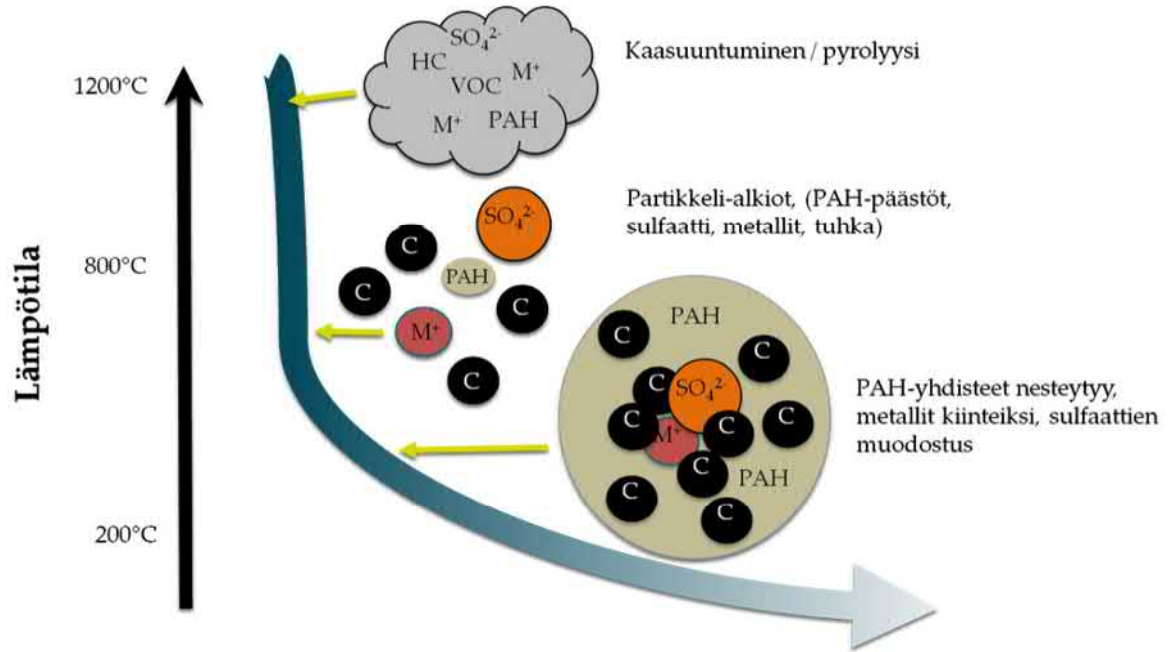
Tulisijoista vapautuvien pienhiukkasten katalyyttinen eliminointi



- Muokataan tulisijan palotapahtumaan soveltuva tehokkaasti partikkelien palamista edistävä katalyyttikemia (esim. hopea ja platina pohjaiset katalyytit)
- Katalysaattorin rakenne ja sijoittelu tulisijan sisällä
- Toimitaan tiiviissä yhteistyössä johtavien tulisijavalmistajien kanssa

Katalyytit ja demonstraatiokatalysaattorit valmistetaan tutkimusryhmässä

Katalyyttien valinnassa huomioitava palotapahtuman kemia



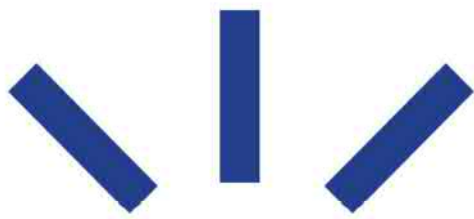
Ajoneuvojen päästöt

Parhaillaan ryhmässä tutkitaan metaania (nesteytetty maakaasu, LNG) ja biopolttoaineita käyttävien raskaan liikenteen ajoneuvojen pakokaasupäästöjen katalyyttistä hallintaa

- Kemian laitoksen tutkimusryhmän rooli on kehittää ja optimoida katalyyttisysteemejä, joita voidaan hyödyntää Dual-fuel (LNG ja diesel) sekä erilaisten biopolttoaineiden (biometaani, biopropaani ja kasviöljypohjaiset polttonesteet) raakapäästöjen kontrolloinnissa raskaassa liikenteessä
- Moottorisovellusten tutkimuksessa pääpaino on kaupallisissa katalyyteissä ja katalysaattoreissa
- Yhteistyö johtavien kansainvälisten moottorivalmistajien, teknologiatalojen ja yliopistojen kanssa.

Polyolefiinimuovit

- Tavoitteena polyolefiinimuovien valmistusprosessin ymmärtäminen atomitasolla
- Katalyyttikomponenttien rakennetutkimus ja reaktiomekanismien selvittäminen laskennallisin menetelmin
- Katalyytti- ja tuotekehitys yhteistyössä muoviteollisuuden kanssa



Oulun yliopisto/ Kestävän kemian -katalyyssitutkimus

Lähde:

Kestävän kemian katalyyssitutkimus, Oulun yliopisto, Heponiemi, A.,
30.11.2018

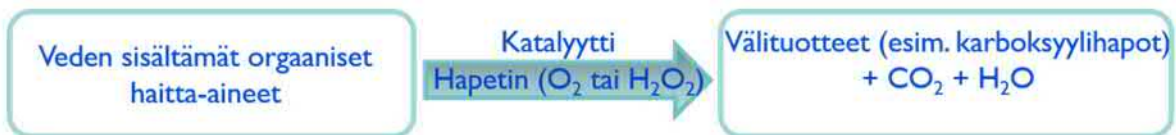


Mitä katalyyttisiä prosesseja ja reaktiota tutkitte?

Jäteveden katalyyttinen puhdistaminen

- Katalyyttinen märkähapetus
- Katalyyttinen vetyperoksidihapetus

Menetelmillä jäteveden sisältämät orgaaniset haitta-aineet saadaan hapetettua katalyytin läsnäollessa hiilidioksidiksi ja vedeksi. Välituotteina voi syntyä myös lyhytketjuisia orgaanisia yhdisteitä (karboksyylihapot, alkoholit).





(Jäte)veden katalyyttinen puhdistaminen

Katalyyttinen märkähapetus:

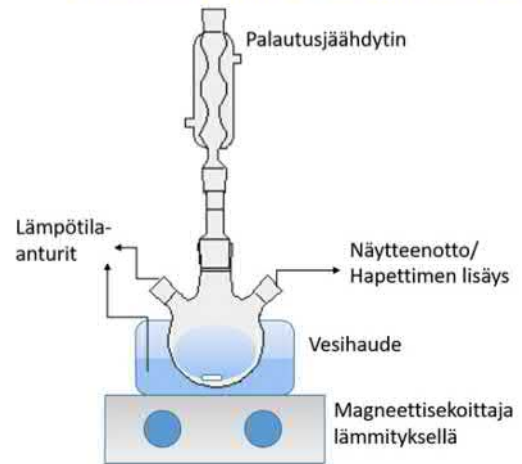
- Kaasumainen hapetin (ilma tai molekulaarinen happi)
- Korkea lämpötila (125-200 °C) ja paine (5-50 bar)

Katalyyttinen vetyperoksidihapetus:

- Nestemäinen hapetin (vetyperoksidi, H_2O_2)
- Lämpötila < 100 °C, normaali ilmanpaine



Kuva 1. Laboriomiittakaavan painereaktori (CWAO)



Kuva 2. Havainnekuva katalyyttisessä vetyperoksidihapetuksessa käytetystä laitteistosta

Oulun yliopisto



Jäteveden katalyyttinen puhdistaminen

Käytettyjä katalyyttimateriaaleja

- **Metallioksidikantaja-aineille tuetut jalometallit** (jalometallin m% 1-5)
 - Esim. Pt/CeO₂, Ru/Ce-Zr
 - (sekaoksidikantaja-aine)
- **Zeoliitti- ja hiilipohjaisille kantaja-aineille tuetut rautakatalyytit**
 - Esim. Fe/ZSM-5 (zeoliitti), Fe/AC (aktiivihili)



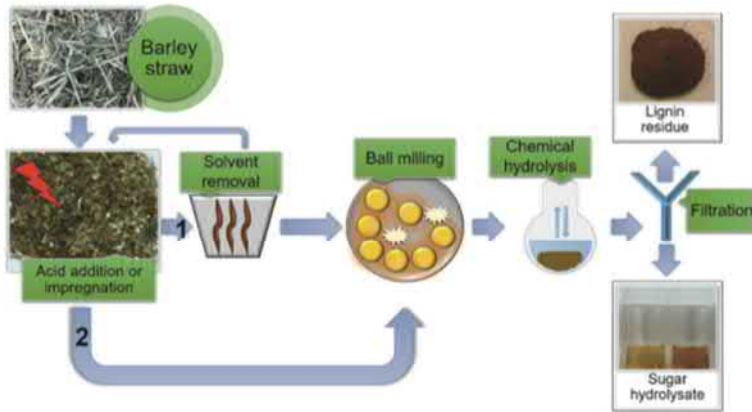
25

Oulun yliopisto



Biomassan katalyyttinen käsittely

Biomassan esikäsittely ja hajoitus sokereiksi

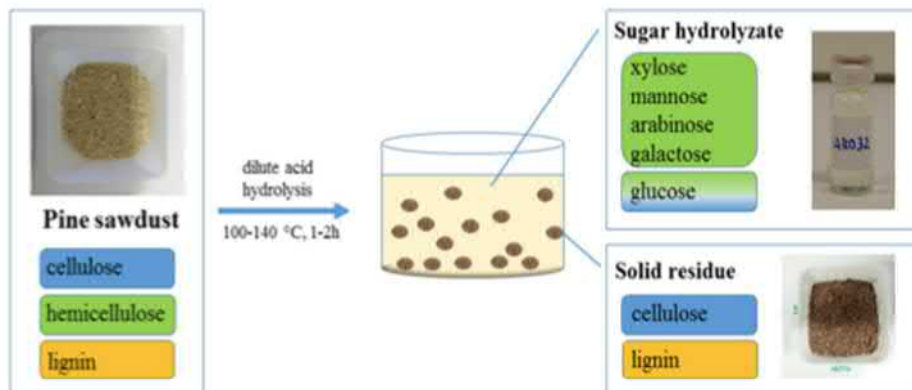


Biomassan mekaanis-katalyyttinen käsittely

- jauhaminen kuulamyllyllä katalyytin kanssa
- katalyyttinä happokatalyyttejä (esim. rikkihappo, etikkahappo)
- tutkittuja biomassoja (ohran olki, männyn, pajun ja koivun sahanpuru, kuituliete)



Biomassan esikäsittely ja hajotus sokereiksi

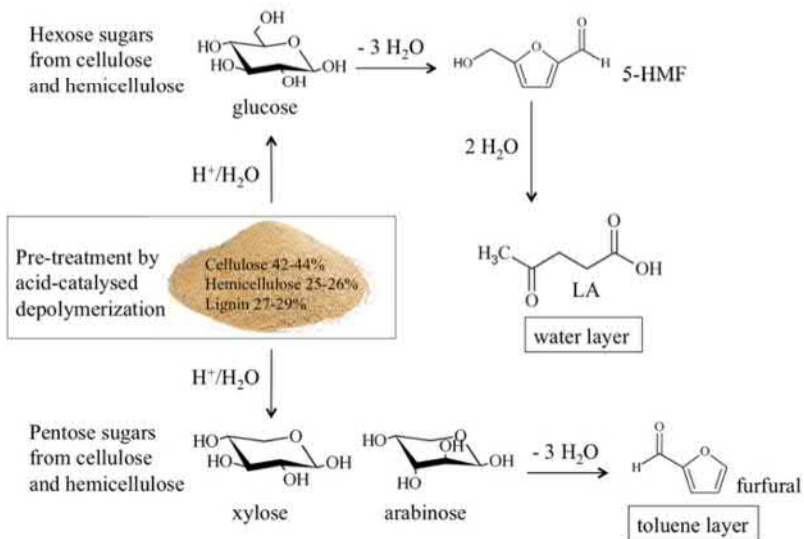


Hemiselluloosan selektiivinen hajotus

- H_2SO_4 - HCOOH -seos katalyyttinä
- optimiolosuhteissa:
 - hemiselluloosan liukoisuus 95 %
 - max. 75 % monosakkarideja



Biomassan muuntaminen peruskemikaaleiksi



Esikäsitelty biomassa

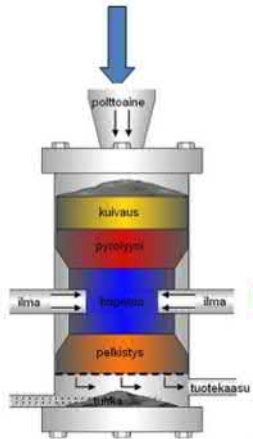
- männyn sahanpuru
- mekaaniskatalyyttinen esikäsitely rikkihapolla
- muuntoreaktio kaksifaasisysteemissä (tolueeni + H_2O)
 - mikroaaltokuuminen
 - perinteinen kuumennus öljyhautella
- levuliinihapposaanto 30–45%
- furfuraalisaanto 70–85%

Suora muuntaminen

- glukoosi
- kuituliete
- männyn, kuusen ja koivun sahanpuru
- muut biomassat



Biomassasta liikenteen polttoaineita kaasutuksen kautta



Tuotekaasun jäädytys ja puhdistus ⇒ **synteettinen biokaasu**

Synteettinen biokaasu

Jalostus polttoaineiksi

Fischer-Tropsch-synteesi:

Katalyytit mm.

- Co/Ru
- Co/Fe



Synteettiset Polttoaine raaka-aineet

Liikenteen polttonesteet



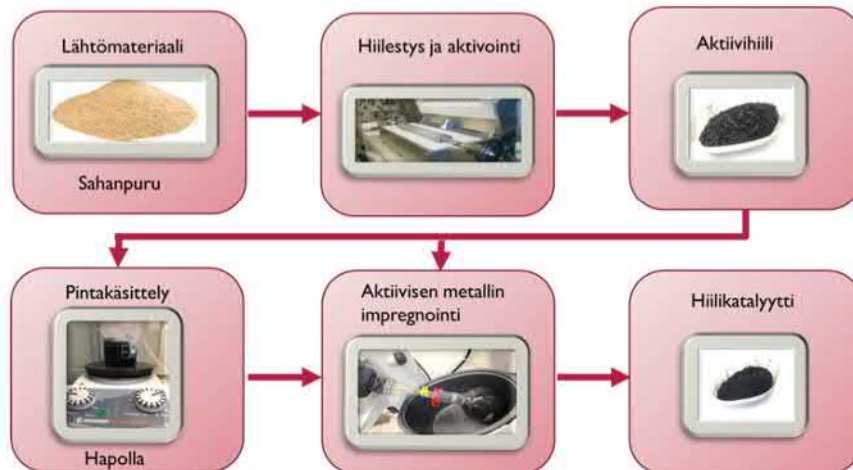
Synteettiset Raskaat ja keveät hiilivedyt Alkoholisekokset



Tutkimuksen alla olevia katalyyttimateriaaleja: Biomassasta valmistettu hiilikantaja-aine (aktiivihiihi)

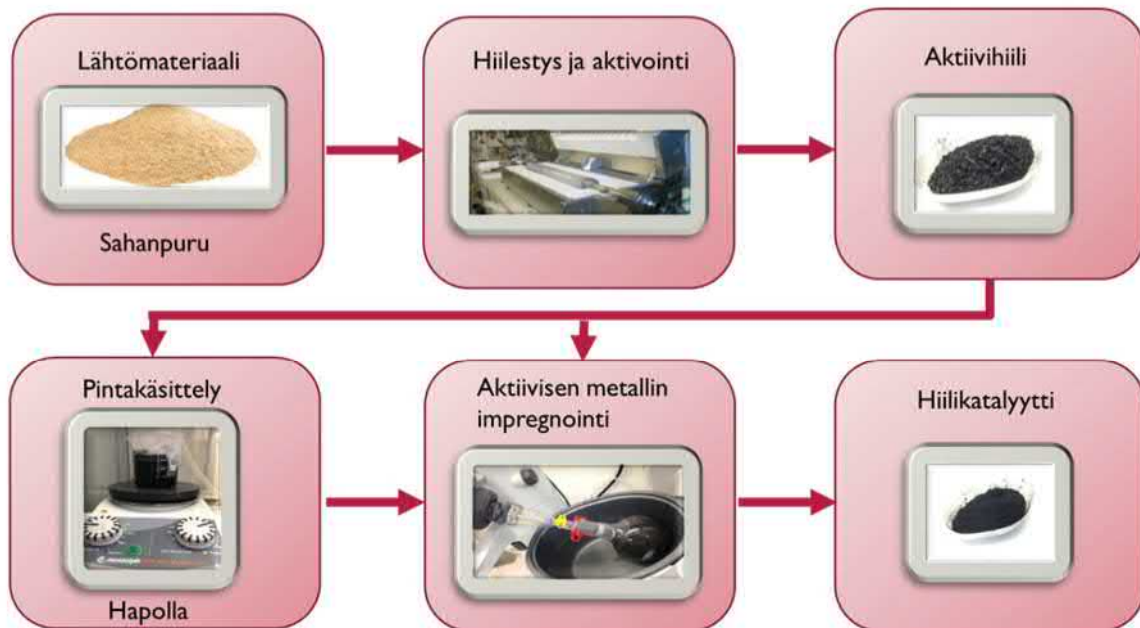
- Kaupalliset aktiivihielet valmistetaan mm. kivihiilestä

Biomassapohjaisen hiilikatalyytin valmistaminen:





Biomassapohjaisen hiilikatalyytin valmistaminen





Biomassasta valmistettujen hiilikantaja-aineiden sovelluksia:

- Jätevesien katalyyttinen puhdistaminen
- Fisher-Tropsch synteesi
- Biomassan muuntaminen peruskemikaaleiksi



Teollisuuden sivutuotteiden hyödyntäminen katalyyttimateriaaleina

Geopolymeeri

- Si ja Al sisältävästä teollisuuden jätteestä (esim. terästeollisuudessa syntyvä masuunikuona) emäksisissä reaktio-olosuhteissa valmistettu epäorgaaninen polymeeri

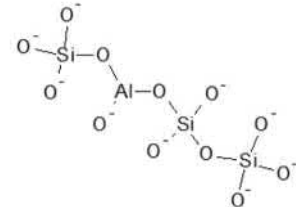


+

Emäs

NaOH/KOH (tarvittaessa Si, Al)

Sekoitus
huoneenlämpö



Geopolymeerin
yksikkörakenne

Sovellukset

- Jätevesien katalyyttinen puhdistaminen

Lähde:
Kestävän kemian katalyytitutkimus, Oulun yliopisto, Heponiemi, A.

Katalyysitutkimus

Åbo Akademi, Teknillisen kemian ja reaktiotekniikan laboratorio

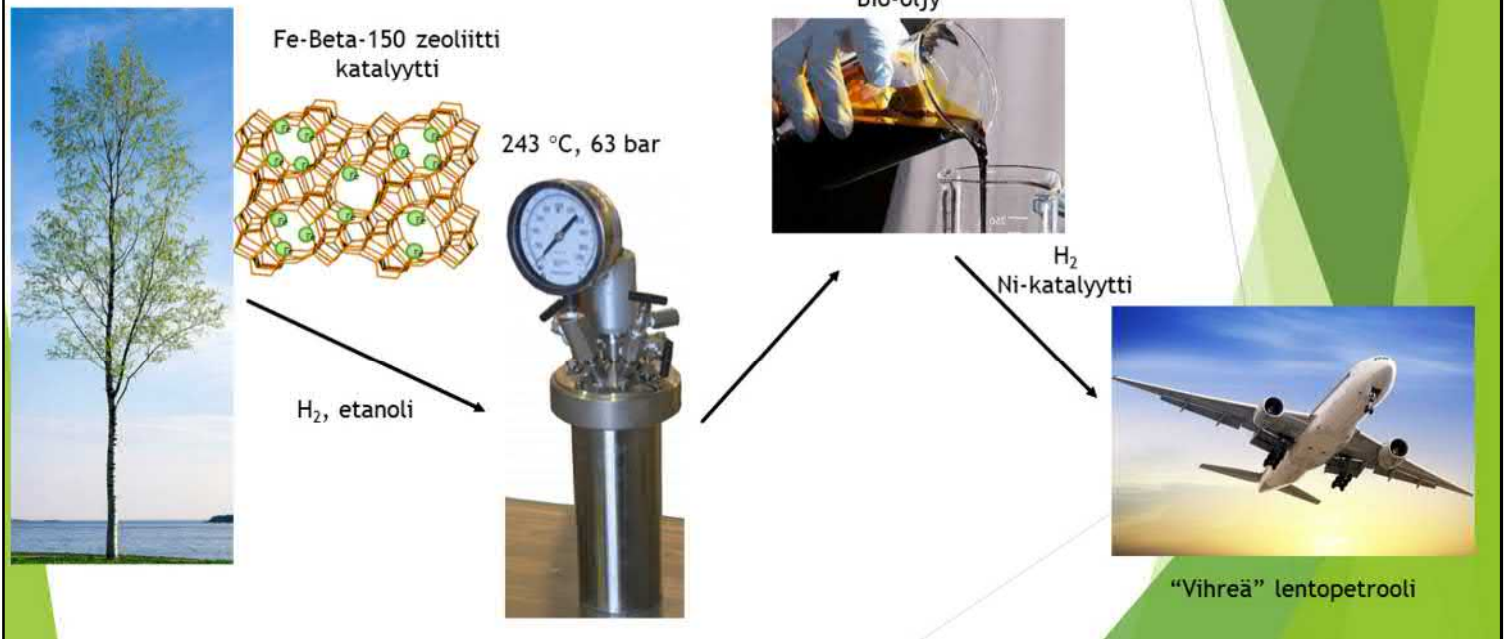
Jyri-Pekka Mikkola, Päivi Mäki-Arvela, Pasi Virtanen

Lähde:

Katalyysitutkimus, Åbo Akademi, Teknillisen kemian ja reaktiotekniikan laboratorio,

Mikkola, J-P., Mäki-Arvela, P., Virtanen, P., 7.6.2018.

Uusiutuvan lentopetroolin valmistus



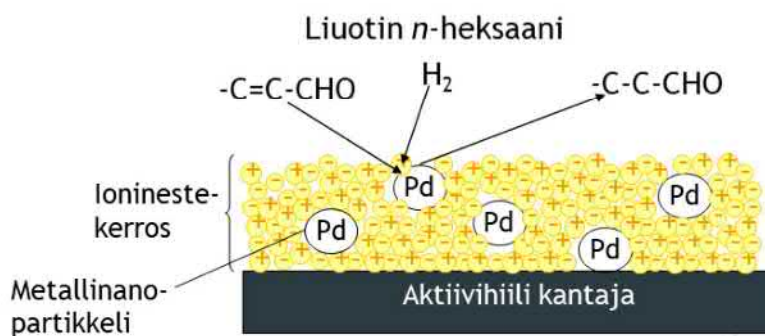
Åbo Akademiassa tutkitaan uusiutuvan lentopetroolin valmistusta.

Biomassasta valmistetaan rauta-zeoliitti-katalyytin avulla bio-öljyä eli pyrolyysiä. Pyrolyysistä jatkojalostetaan Ni-katalyytillä lentokoneiden käyttämää polttoainetta.

Kantajan päälle immobilisoitu ioninestekatalyytti

(Supported Ionic Liquid Catalyst, (SILCA))

- ▶ Ionineste on ioniyhdiste, jonka sulamispiste on alle 100 °C
- ▶ Niiden erityisominaisuuksien avulla katalyyttien ominaisuuksia voidaan muokata.
- ▶ Katalyyttejä voidaan käyttää esimerkiksi vedytysreaktioissa.

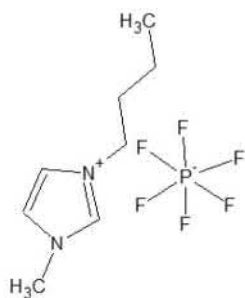


Vedytysreaktio eli hydraus:

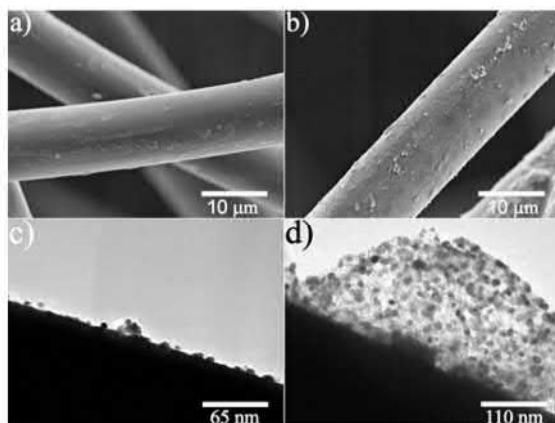
Hiilen kaksois- ja kolmoissidoksiin liitetään vetyä.

Esim. kasviöljyjen hydraus, polttoaineiden laadun parantaminen hydrauksella, jossa poistetaan tuotteelle haitalliset aromaattit kuten bentseeni.

Esimerkki ioninesteestä: 1-butyyli-3-metyyli-imidazoliumheksafluorofosfaatti



Elektronimikroskooppikuvia kyseisestä katalyytistä





Lähde:

Katalyysitutkimus, Aalto-yliopisto, Puurunen, R., 5.12.18

MITÄ KATALYTTISIÄ PROSESSEJA JA REAKTIOITA TUTKITTE?



Vesikaasureformointi

- Kyseessä on vesifaasissa tapahtuva reaktio, jossa biojalostamon vesivirroista valmistetaan vetyä ja alkaaneja katalyytin avulla korkeassa paineessa ja noin 230 C:n lämpötilassa.

Hapenpoisto vedyllä

- Vedyn ja katalyytin avulla poistetaan happea orgaanisista yhdisteistä korkeassa lämpötilassa ja paineessa. Tutkitaan vaihtoehtoisia käyttökohteita biojalostamoiden sivuvirroille, jotta raaka-aineita voitaisiin hyödyntää laajemmin.



MILLAISIA REAKIOTYYPPEJÄ TUTKITTE?

- Tällä hetkellä hapenpoistoa vedyllä, vesifaasireformointia ja alkoholien osittaishapetusta

Mitä katalyyttejä käytätte niiden tutkimisessa?

- Tyypillisimmin metalleja ja jalometalleja epäorgaanisella tai hiilikantajalla
- Katalyytit valitaan esimerkiksi aiempien tutkimusten ja valistuneiden arvausten perusteella.

MITÄ KATALYTTTEJÄ KÄYTÄTTE NIIDEN TUTKIMISESSA?



- Tyypillisimmin metalleja ja jalometalleja epäorgaanisella tai hiilikantajalla
- Katalyytit valitaan esimerkiksi aiempien tutkimusten ja valistuneiden arvausten perusteella.

MILLAISIA KANTAJIA KÄYTÄTTE JA MILLÄ PERUSTEELLA NE VALITAAN?

- Kantajat valitaan aikaisempien tutkimusten ja valistuneiden arvausten perusteella. Yleensä suuri pinta-ala ja soveltuva huokoskoko ovat perusvaatimuksia.

MIHIN KYSYMYKSIIN ETSITTE VASTAUKSIA?



Yleisesti ottaen ympäristökysymyksiin.

Vihreä kemian periaatteet ja luonnonvarojen kestävän kehityksen mukainen käyttö motivoivat tutkimuksia.

- Mitä katalyytin valmistuksessa yksityiskohtaisesti tapahtuu?
- Miten kontrolloidaan valmistettavaa materiaalia?
- Mitä tietyissä katalysoitavissa reaktioissa tapahtuu?
- Millainen katalyytti toimii?
- Mikä on katalyytin aktiivinen kohta?
- Miten aktiivisuutta ja selektiivisyyttä voidaan parantaa?
- Miten vähentää ei-toivottuja tuotteita?
- Miten toteuttaa reaktioita, mitä ei ole ennen pystytty tekemään (ollenkaan tai selektiivisesti)?

MIHIN KATALYYSITUTKIMUKSEN PITÄISI KESKITTYÄ?



- Uusiutuvien luonnonvarojen kestävä käyttö ja fossiilisten luonnonvarojen mahdollisimman tehokas hyödyntäminen.
- Kehittää uusia katalyyttejä jalometallikatalyyttien tilalle.
- Katalyyttien aktiivisuuden, selektiivisyyden ja pitkän ajan stabiiliuden optimointi ja parantaminen
- Synteettinen fotosynteesi, uudet energiaratkaisut (vety ja muut energian kantajat)
- Reaktioiden perustavanlaatuisen mekanismitasoinen ymmärtäminen kontrolloitujen mallikatalyyttien avulla

MILLAISILLA MENETELMILLÄ TUTKITTE KATALYYSIPROSESSEJA?



- Aktiivisuusmittaukset panos- ja jatkuvatoimisissa pienissä laboratoriomittakaavan reaktoreissa, joissa syöttö- ja ulostulopitoisuuksien perusteella lasketaan konversio, saanto ja selektiivisyys.
- In situ ja operando- mittaukset, joissa tutkitaan spektroskooppisesti katalyyttejä samalla kuin ne toimivat katalyyttisessä reaktiossa.
- Ns. ex-situ-mittaukset katalyyteistä ennen reaktiota ja käytetyistä katalyyteistä reaktioiden jälkeen.
- Erinäiset mittaukset katalyyteistä ennen ja jälkeen käytön, esimerkiksi fysorptio ja kemisorptio, lämpötilaohjelmoidut menetelmät, röntgendiffraktio, elektronimikroskopia. Kromatografiset menetelmät.

VTT Catalyst Technologies

Johanna Kihlman, Pekka Simell, Matti Reinikainen, Noora Kaisalo, Matti Putkonen, Laura Keski­väli, Irene Coronado



VTT 2018 45

Lähde:

VTT Catalyst Technologies, VTT, Kihlman, J., Simell, P., Reinikainen, M., Kaisalo, N., Putkonen, M., Keski­väli, L. ja Coronado, I., 4.12.2018.

Millaisia katalyyttisiä prosesseja ja reaktiotyyppejä tutkitte?

- Tutkimuksen ydin on **heterogeenisessä katalyysissä** ja suurin osa reaktioista on kaasufaasissa. Jonkin verran teemme myös nestefaasitutkimusta.
- Tutkimme reaktioita ja prosesseja, jotka ovat helposti otettavissa käyttöön teollisuudessa. Tyypilliset käyttökohteet löytyvät uusiutuvien polttoaineiden ja kemikaalien tuotantoprosesseista.

Mitä katalyyttisiä prosesseja ja reaktiota tutkutte?

1. Hankalien teollisten kaasuvirtojen puhdistaminen
2. Uusiutuvien kemikaalien ja polttoaineiden tuotanto biomassasta tai kierrätysmateriaaleista
3. Teollisten jätevesien puhdistus ja hyödyntäminen
4. Reaktoritekniikka ja katalyytit



Tässä esimerkkejä VTT:n tutkimusryhmän tutkimuskohteista.

Jokaisesta löytyy yksityiskohtaisempaa tietoa myöhemmin ja näistä voi kertoa tarkemmin mielenkiinnon ja ajankäytön mukaan.

Mitä katalyyttejä käytätte?

Käytämme useita heterogeenisiä metallikatalyyttejä. Käytämme sekä kaupallisia katalyyttejä että valmistamme myös itse katalyyttejä sekä laboratorio- että teolliseen käyttöön.

Tyypillisiä metallikatalyyttejä:

- **Nikkeli:** Yleisesti saatavilla oleva metallikatalyytti. Edullinen ja moneen reaktioon sopiva. Teollisesti ja tieteellisesti hyvin tunnettu katalyytti. Tutkimme nikkelikatalyyttien käyttöä esim. reformointi-, rikinpoisto- ja metanointireaktioissa.
- **Jalometallit, esimerkiksi Pt, Rh, Ru:** Jalometallit ovat nikkeliä tehokkaampia katalyyttejä. Ne soveltuvat usein samoihin prosesseihin. Jalometallit ovat herkkiä epäpuhtauksille. Jalometalleja voidaan käyttää promootorina edistämään jonkin edullisemmän katalyyttimetallin toimintaa. Jalometallit ovat huomattavasti muita metallikatalyyttejä kalliimpia.

- **Zirkonia:** Zirkoniakatalyyteilla (ZrO_2) pinnoitetaan kennostoja, jotka toimivat vastaavasti kuin perinteinen partikkelipeti. Kennostot ovat samanlaisia kuin auton katalysaattori. Niissä on keraaminen kantaja jonka päälle on pinnoitettu ohut kerros katalyyttiä.
- Zirkonian lisäksi katalyytissä on yleensä yksi tai useampi promoottorimetalli, esim. Y, Ce, Si, La.
- **Koboltti ja rauta:** Nämä ovat Fischer-Tropsch-synteesissä käytettyjä katalyyttejä. Samoja katalyyttejä käytetään myös teollisissa Fischer-Tropsch laitoksissa.



Zirkonia

Zirkoniapohjaiset katalyytit toimivat tehokkaasti tervojen reformointireaktiossa.

Koboltti ja rauta

Katalyyttejä ja olosuhteita muokkaamalla Fischer-Tropsch-synteesistä saa erilaisia tuotejakaumia. Tuotteet kannattaakin optimoida käyttökohteen mukaan.

Mihin kysymyksiin etsitte vastauksia?

- Haluamme löytää keinoja, joilla esimerkiksi teollisuuden päästökaasuja voidaan hyödyntää tai saadaan lisättyä biomassan osuutta polttoaineiden tuotannossa. Näiden tavoitteiden saavuttaminen vaatii perinteisiä prosesseja tehokkaampia ratkaisuja.
- Tavoittemme on kehittää tehokkaita ja taloudellisesti kannattavia prosesseja, joilla saadaan tuotettua uusiutuvia polttoaineita ja kemikaaleja. Taustalla ohjaavat kansalliset ja kansainväliset ilmastositoumukset ja -tavoitteet.
- Lisäksi on pystyttävä hyödyntämään jätevirtoja, jolloin edullisilla puhdistusteknologioilla on merkittävä vaikutus koko prosessin talouteen.

Mihin katalyysitutkimuksen pitäisi keskittyä?

- Katalyysin käyttökohteet ovat hyvin moninaiset. Oma tutkimuksemme keskittyy **uusiutuvien polttoaineiden ja kemikaalien tuotantoon**.
- Kansainväliset sopimukset asettavat meille tiukat tavoitteet, joihin pääseminen vaatii erilaisia toimia. Yhtä suurta ratkaisua ei ole. Esimerkiksi uusiutuvien polttoaineiden tuotanto riippuu maantieteellisestä sijainnista: Suomessa on tarjolla paljon metsäbiomassaa kun taas Keski-Euroopassa voidaan tehdä bensaa vaikkapa oljesta.
- Eri raaka-ainelähteet vaativat erilaisia käsittely- ja valmistustekniikoita. Tutkimuksen pitäisi siis tarjota monipuolisia ja toteuttamiskelpoisia prosessivaihtoehtoja.

Millaisilla menetelmillä tutkitte katalyysiprosesseja?

- Laboratoriomittakaavassa katalyyttiä käytetään yleensä korkeintaan muutamia kymmeniä grammoja ja olosuhteet ovat usein optimaaliset katalyytin toimintaa ajatellen.
- Tyypillinen koelaitteisto meidän laboratoriossa on putkireaktori, jonka keskikohdassa on katalyyttipeti. Kaasu virtaa putkessa katalyyttipedin läpi ja reagoi samalla tuotteiksi.
- Pilotlaitoksissa katalyyttiä päästään testaamaan samanlaisissa olosuhteissa kuin teollisessa prosessissa. Koeajo pilotlaitoksessa onkin katalyytin kestävyuden tärkeä mittari.
- VTT:llä pilotointi tehdään joko Espoossa, Bioruukin tutkimuskeskuksessa tai viemällä prosessiyksiköt teollisen tuotantolaitoksen yhteyteen.



Pakattu katalyyttipeti:

Partikkelikatalyytit lastataan reaktoriin kerrokseksi, jota kutsutaan pediksi.

Pilot-laitoksissa katalyyttiä on käytössä jo useita kiloja.

Onnistuneen pilot- ajon jälkeen katalyyttiä voidaan pitää soveltuvana tarjottavaksi teolliseen tuotantoon.

1. Hankalien teollisten kaasuvirtojen puhdistus

- VTT käsittelee paljon erilaisia kaasuvirtoja, joita voi tulla esimerkiksi terästehtaan päästökaasuna tai biomassassa kaasutusprosessista
- Kaasuvirroissa on useasti epäpuhtauksia, jotka deaktivoivat katalyyttejä tai voivat aiheuttaa tukkeumia laitteistoon
- Tyypillisiä epäpuhtauksia ovat orgaaniset rikkiyhdisteet, rikkivety, kevyet hiilivedyt ja polyaromaattiset hiilivedyt eli terva (esim. tolueneeni ja naftaleeni)
- Poistomenetelmä riippuu epäpuhtaudesta ja samaan prosessiin voidaan yhdistää useita poistomenetelmiä



- **Orgaaniset rikkiyhdisteet:** rikinpoisto eli HDS-reaktio (hydrodesulfuration), katalyytteinä käytetään molybdeenipohjaisia katalyyttejä (CoMo ja NiMo), noin 200-350 °C. Reaktio erottaa rikin orgaanisesta osasta molekyyliä. Rikistä muodostuu rikkivetyä.
- **Rikkivety:** Adsorptio sinkkioksiidiin (ZnO) tai aktiivihiileen. Vaihtoehtona ovat kemikaaleihin pohjautuvat pesurit.
- **Kevyet hiilivedyt ja terva:** höyryreformointi, kaasukoostumuksesta riippuen käytetään reaktiolämpönä 500-1000 °C, katalyyttinä Ni. Myös jalometallit ja zirkoniapohjaiset (ZrO) katalyytit toimivat hyvin. Hiilivedyt hajotetaan veden avulla hiilimonoksidiksi ja vedyksi. Syntyvää tuotekaasua kutsutaan synteesikaasuksi, jota voidaan jatkojalostaa muun muassa polttoaineiksi ja kemikaaleiksi.

2. Uusiutuvien kemikaalien ja polttoaineiden valmistus biomassasta tai kierrätysmateriaalista

➤ VTT:n tutkimusryhmä on keskittynyt kahteen synteesisreaktioon:

1. Fisher-Tropsch-synteesi (synteettinen hiilivetyjen valmistus katalyytin avulla).

Synteessissä hiili ja vety reagoivat Co- ja Fe- katalyytilla. Tuotteena muodostuu suoraketjuisia alkaaneja.

Fisher-Tropsch tuottaa aina jakauman hiilivetyjä: kaasuja, nesteitä ja kiinteitä hiilivetyjä. Tuotteet erotellaan toisistaan.

2. Metanointi

Synteessissä vedyn kanssa reagoi joko hiilidioksidi (CO₂) tai hiilimonoksidi (CO) muodostaen metaania (CH₄). Katalyyttinä toimii Ni. Reaktiolla voidaan tuottaa esimerkiksi teollisuuden päästökaasusta synteettistä maakaasua, jota voidaan käyttää samoin kuin fossiilista maakaasua.



Fisher-Tropsch synteessin tuottama hiilivetyjakauma:

Kaasumaiset tuotteet hyödynnetään prosessissa, nestemäisistä voidaan valmistaa bensiiniä, dieseliä ja kerosiinia. Vahat voidaan hyödyntää myös polttoainetuotantoon tai jatkojalostaa orgaanisiksi kemikaaleiksi.

3. Teollisten jätevesien puhdistus ja hyödyntäminen

Tutkimusryhmä tutkii katalyyttisiä vedenpuhdistustekniikoita. Tutkimuksissa käytetään katalyyttisiä pinnoitteita sekä vesifaasireformointia.

- **Katalyyttisillä pinnoitteilla** voidaan estää laitteistojen likaantuminen. Tutkimme esimerkiksi aktiivisia pinnoitteita, jotka estävät ligniinin aiheuttaman membraanisudattimen likaantumisen. Tällaista tekniikkaa tarvitaan, kun biojalostamoissa käsitellään ligniiniselluloosaa sisältäviä vesiä eli vesiä, jotka on saatu uuttamalla esimerkiksi puuhaketta tai muuta kasviperäistä biomassaa. Käytettävät katalyyttiset pinnoitteet ovat useimmiten metalleja ja niiden eri yhdisteitä.
- **Vesifaasireformoinnissa** käytetään korkeaa painetta (noin 30 bar), jotta vesi saadaan pysymään nestefaasissa. Näin pystytään käyttämään höyryreformointiin verrattuna matalampaa lämpötilaa (200-250 °C). Tutkimuksen kohteena oleva katalyytti on zirkoniapohjainen (ZrO) nikkeli. Vesifaasireformoinnissa syöttönä on esimerkiksi jätevesivirta, jossa on hiilivetyjä. Laitteessa hiilivedyt hajoavat katalyytillä hiilimonoksidiksi (CO) ja vedyksi (H₂) ja näitä kaasuja voidaan hyödyntää prosessiteollisuudessa.



Katalyyttinen pinnoite:

Ohut pinta, joka on katalyyttisesti aktiivinen. Pinnoitteiden paksuus voi olla sadoista mikrometreistä nanometreihin. Esimerkiksi autojen katalysaattorit valmistetaan pinnoittamalla keraaminen tai metallinen kenno katalyytillä.

Katalyyttinen pinta voi toimia reaktorina tai esimerkiksi suojata pintaa likaantumiselta.

4. Reaktoritekniikka ja katalyytit

Katalyyttien lisäksi VTT:n tutkimusryhmässä tutkitaan reaktoritekniologiaa eli miten katalyyttien käyttöä voidaan tehostaa ja miten lämmönsiirtoa voidaan parantaa.

- **Katalyyttisillä pinnoitteilla** voidaan tehdä ohuita kerroksia, jolloin lämmönsiirto on tehokkaampaa kuin perinteisissä pakatuissa pödeissä. Pinnoite voidaan laittaa vaikkapa lämmönvaihdinlevylle jolloin endotermiseen reaktioon voidaan helposti tuoda lämpöä ja eksotermisestä reaktiosta poistaa lämpöä. Reaktiokaasu kulkee tällöin levyn toisella puolella ja lämmittävä tai jäädyttävä virta toisella puolella. Pinnoitteita voidaan tehdä nestemäisillä metodeilla (vastaavanlaisilla kuin mitä käytetään vaikkapa maalatessa) tai hyödyntämällä Suomessa kehitettyä atomikerroskasvatusmenetelmää (ALD, atomic layer deposition).
- **Mikrokanavareaktorit** toimivat samalla tavalla kuin katalyyttisesti pinnoitetut lämmönvaihtimet. Mikrokanavareaktorit soveltuvat erinomaisesti pienmittakaavan tuotantoon. Tutkimusryhmällä on käytössä saksalaisen INERATEC-yhtiön valmistama mikrokanavareaktori Fisher-Tropsch synteesiä varten. Laitos tuottaa noin 60 kg hiilivetyjä päivässä. Laitosta käytetään useissa pilotointihankkeissa.

4. Reaktoritekniikka ja katalyytit

Katalyysitutkimus liittyy uusiutuvien polttoaineiden ja kemikaalien tuotantoon.

Alla on kolme esimerkkiä käynnissä olevista tutkimusprojekteista:

1. SOLETAIR: Business Finlandin rahoittama tutkimushanke, jossa aurinkosähköllä ja ilmasta kaapatulla hiilidioksidilla tuotetaan uusiutuvia polttoaineita, eli bensaa ja dieseliä. SOLETAIR-projektissa rakennettiin merikontteihin mahtuvista prosessiyksiköistä pieni tuotantolaitos, jota koekäytettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston alueella kesällä 2017. Uusiutuva sähkö tuotettiin aurinkopaneeleilla. Sähköllä saatiin vedestä tuotettua vetyä elektrolyysin avulla. (CO₂) otettiin suoraan ilmasta tarkoitukseen kehitetyllä laitteistolla. Synteesiyksikössä vety ja (CO₂) yhdistettiin Fischer-Tropsch synteesin avulla polttoaineiksi. Lisätietoa www.soletair.fi



4. Reaktoritekniikka ja katalyytit

2. COMSYN: EU:n rahoittamassa kansainvälisessä tutkimushankkeessa kehitetään biomassan kaasutukseen pohjautuva biopolttoaineiden tuotantoprosessi. Tavoitteena on pienentää biopolttoaineiden tuotantokustannuksia yksinkertaistamalla prosessia aiempiin verrattuna. Biomassan kaasutuksessa syntyy vetyä ja hiilidioksidia, josta saadaan Fischer-Tropsch synteesin avulla biopolttoaineita.

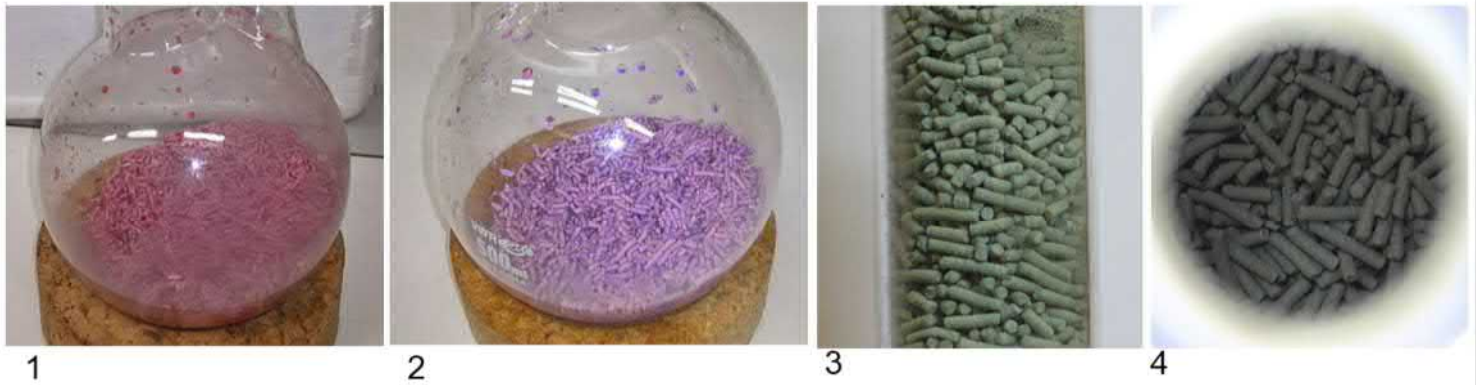
Lisätietoja: www.comsynproject.eu



4. Reaktoritekniikka ja katalyytit

3. ICO2CHEM: EU:n rahoittamassa kansainvälisessä tutkimushankkeessa pilotoidaan kemikaalien tuotantoa suuren kemiantehtaan (CO₂) -päästöistä. Valmistusmenetelmän ytimessä on tässäkin prosessissa Fischer-Tropsch-synteesi. Vety saadaan prosessiin joko elektrolyysin avulla tai hyödyntämällä tuotantolaitoksen omia kaasuvirtoja.

Lisätietoja: www.spire2030.eu/ico2chem



CoMo katalyytin valmistusvaiheita. Katalyytti on tarkoitettu käytettäväksi rikitetystä muodosta. Sitä käytetään orgaanisten rikkiyhdisteiden hajottamiseen.

- 1) Metallin on juuri impregnoitu kantajaan. Katalyytti on vielä märkä.
- 2) Katalyytti kuivauksen jälkeen.
- 3) Katalyytti kalsinoinnin jälkeen.
- 4) Katalyytti rikityksen jälkeen.



VTT 2018 61

Esimerkki katalyytin valmistuksesta. Kyseistä katalyyttiä käytetään rikkiyhdisteiden hajottamiseen kaasuvirroista.

Metallin impregnointi kantajaan

Partikkelikatalyytissä on tyypillisesti kaksi osaa: katalyyttimetalli ja kantaja, jonka pinnalle ja huokosten sisälle metalli laitetaan. Impregnointiprosessissa metalli imeytyy vakuumin kautta kantajan pinnalle ja huokosiin. Tällöin saadaan tasainen määrä katalyyttimetallia jokaiseen partikkeliin.

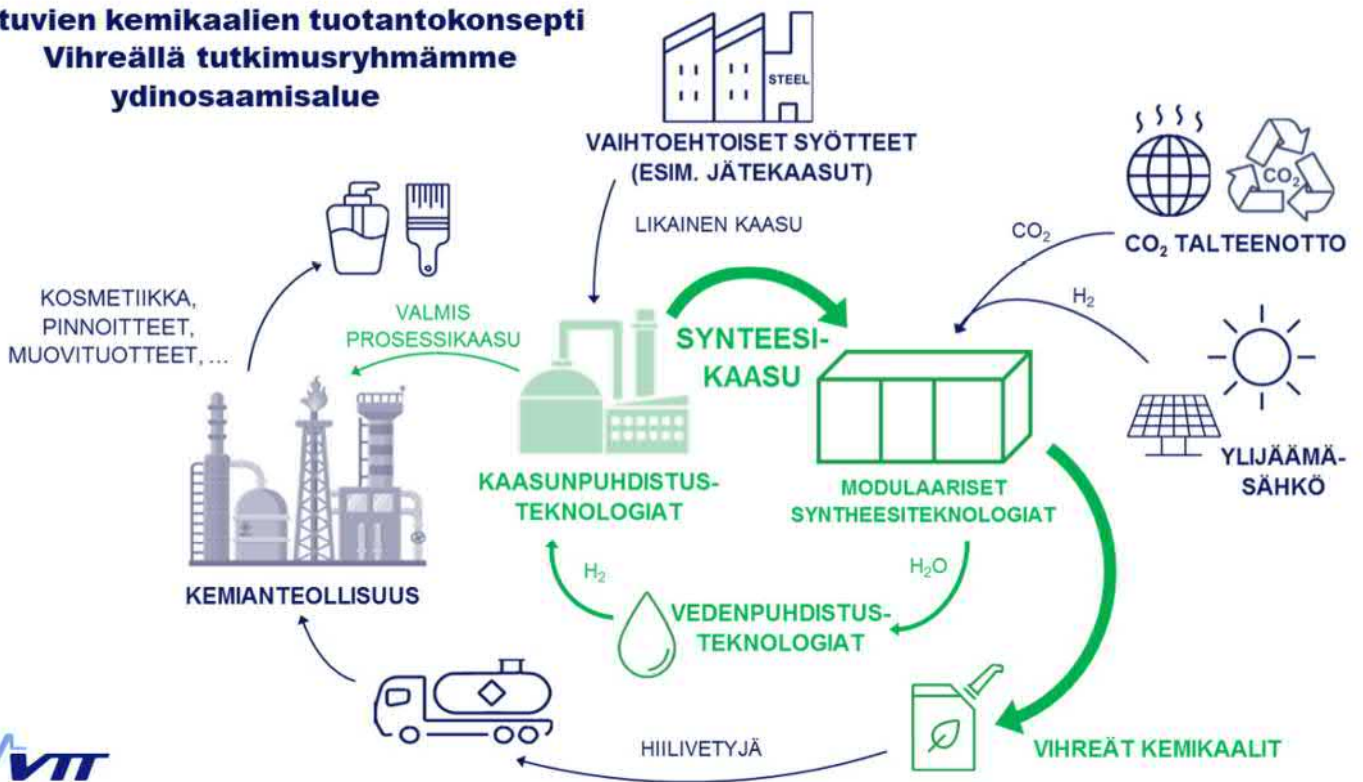
Katalyytin kalsinointi

Katalyytin valmistuksessa olevat metallit ovat usein nesteinä, esimerkiksi nitraattina. Kalsinoinnissa ylimääräiset aineet poistetaan katalyytistä, jolloin vain metalli jää jäljelle.

Katalyytin rikitys

Katalyyttimetalleilla on useita eri muotoja. Osa katalyyteistä pelkistetään eli ne käsitellään vedellä ennen käyttöä. Muutamat katalyytit vaativat myös rikkiä toimiakseen kunnolla. Tällöin katalyytille tehdään rikitys ennen käyttöä.

**Uusiutuvien kemikaalien tuotantokonsepti
Vihreällä tutkimusryhmämme
ydinosaamisalue**



Kaasuvirroista poistetaan epäpuhtaudet ja valmistetaan synteetikaasua, jota hyödynnetään useissa kemianteollisuuden prosesseissa.

Synteetikaasu = hiilimonoksidi + vesi.

VTT käyttää synteetikaasua vedenpuhdistuksessa sekä eli uusiutuvien vihreiden kemikaalien syntetisoinnissa.

Uusiutuvien polttoaineiden tuotantokonsepti



VTT käyttää synteetikaasua vedenpuhdistuksessa sekä uusiutuvien hiilivetyjen syntetisoimisessa. Uusiutuvista hiilivedyistä valmistetaan uusiutuvia polttoaineita.