



**LUT-kauppakorkeakoulu**

Kauppätieteiden kandidaatintutkielma

Talousjohtaminen

**Kaya-hajotelman taustatekijöiden vaikutukset hiilidioksidipäästöihin Länsi-Euroopassa ja Itä-Aasiassa 1970-2015**

The effects of factors of Kaya Identity on carbon emissions in Western Europe and East Asia in 1970-2015

13.1.2020

Tekijä: Salla Leino

Ohjaaja: Heli Arminen

## TIIVISTELMÄ

<b>Tekijä:</b>	Salla Leino
<b>Tutkielman nimi:</b>	Kaya-hajotelman taustatekijöiden vaikutukset hiilidioksidipäästöihin Länsi-Euroopassa ja Itä-Aasiassa 1970-2015
<b>Akateeminen yksikkö:</b>	LUT-kauppakorkeakoulu
<b>Koulutusohjelma:</b>	Kauppatieteet, Talousjohtaminen
<b>Ohjaaja:</b>	Heli Arminen
<b>Hakusanat:</b>	Ilmastonmuutos, hiilidioksidipäästöt, Kaya-hajotelma

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena on tutkia hiilidioksidipäästöjen taustatekijöiden vaikutuksia valituilla maantieteellisillä alueilla. Alueiksi valikoitui kehittynyt Länsi-Eurooppa ja kehittyvä Itä-Aasia. Hiilidioksidipäästöjen taustatekijöiden tarkastelu valituilla alueilla toteutetaan Kaya-hajotelmalla, joka sisältää kokonaisuudessaan neljä tekijää. Nämä tekijät ovat väkiluku, bruttokansantuote, energiankulutus ja hiilidioksidipäästöt. Aikaisemmissa tutkimuksissa on pyritty selvittämään hiilidioksidipäästöjen taustatekijöiden vaikutuksia maiden välillä, joten tähän tutkimukseen valikoitui maanosien välinen vertailu.

Tutkimuksessa käytetään paneeliaineistoa. Hiilidioksidipäästöjen taustatekijöiden vaikutuksia maanosien välillä tutkitaan tilastollisesti kiinteiden vaikutusten estimaattorilla. Myös kiinteiden vaikutusten mallin klusterirobustien keskivirheiden tuottamat tulokset raportoidaan. Selitettävänä muuttujana on hiilidioksidipäästöt, joita selitetään energia- ja hiili-intensiteetillä. Saatuja tuloksia vertaillaan maanosien välillä.

Tulosten perusteella energiaintensiteetin kerroin on positiivinen molemmissa maanosissa, mutta vain tilastollisesti merkitsevä Länsi-Euroopan otoksessa. Energiaintensiteetin kasvu kasvattaa myös hiilidioksidipäästöjä, jota voidaan kompensoida ottamalla käyttöön parempaa teknologiaa. Myös hiili-intensiteetin kerroin on positiivinen molemmilla maanosilla, joka tarkoittaa sitä, että myös hiili-intensiteetin kasvu kasvattaa hiilidioksidipäästöjä. Vaikutus on suurempi kehittyvillä alueilla verrattuna kehittyneisiin alueisiin. Hiili-intensiteetti on myös tärkein selittävä tekijä hiilidioksidipäästöjen kasvussa.

## **ABSTRACT**

**Author:** Salla Leino  
**Title:** The effects of factors of Kaya Identity to carbon emissions in Western Europe and East Asia in 1970-2015  
**School:** School of Business and Management  
**Degree programme:** Business Administration, Financial Management  
**Supervisor:** Heli Arminen  
**Keywords:** Climate change, carbon dioxide emissions, Kaya identity

The aim of this bachelor's thesis is to examine the effects of background factors of carbon dioxide emissions in the selected areas. The selected areas are developed Western Europe and developing East Asia. The analysis of the background factors of carbon emissions is carried out using the Kaya identity which includes four driving forces. The driving forces are population, gross domestic product, energy consumption and carbon dioxide emissions. In the previous studies the researchers have concentrated to examine the effects of factors of Kaya identity on carbon dioxide emissions between countries, therefore this study focuses on continental comparison.

Panel data is used in this study. The effects of factors of Kaya identity on carbon dioxide emissions between continents are examined using fixed effects estimator. The results of fixed effects estimation with cluster-robust standard errors model is also reported. The carbon dioxide emissions will be used as the dependent variable and the explanatory variables of the study are energy intensity and carbon intensity. The results are compared between selected areas.

The results of the study show that energy intensity is positive in both continents but only statistically significant in the Western Europe. Increase of energy intensity increases carbon dioxide emissions, which can be compensated by the introduction of better technology. Carbon intensity is also positive on both continents, which means that increase of carbon intensity will also increase carbon dioxide emissions. The impact is greater in developing regions than in developed regions. Carbon intensity is also the most important explanatory factor in the increase of carbon dioxide emissions.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1. Johdanto</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Teoreettinen tausta</b> .....	<b>4</b>
2.1. Hiilidioksidipäästöt.....	8
2.2. Kaya-hajotelma .....	10
2.2.1. BKT per capita .....	11
2.2.2. Energiaintensiteetti .....	13
2.2.3. Väkiluvun kehitys .....	14
2.2.4. Hiili-intensiteetti.....	15
2.3. Kaya-hajotelman aikaisempia tuloksia.....	16
<b>3. Tutkimusaineisto ja -menetelmät</b> .....	<b>19</b>
3.1. Aineisto.....	20
3.1.1. Muuttajat .....	20
3.1.2. Aineiston kuvailu .....	22
3.1.3. Muuttujien välinen korrelaatio .....	23
3.2. Paneelidatan estimointimenetelmät.....	26
3.3. Estimoitava malli.....	30
<b>4. Tulokset</b> .....	<b>31</b>
4.1. Estimointimenetelmän valinta .....	31
4.2. Estimoinnin tulokset.....	33
<b>5. Johtopäätökset</b> .....	<b>35</b>
<b>Lähdeluettelo</b> .....	<b>38</b>
<b>LIITTEET</b> .....	<b>43</b>

## LIITTEET

LIITE 1. Muuttujien perustietoja

LIITE 2. Hiilidioksidipäästöjen maakohtaiset arvot

LIITE 3. Aasian otoksen korrelaatiomatriisi

LIITE 4. Länsi-Euroopan otoksen korrelaatiomatriisi

LIITE 5. Väkiluvun, energiankulutuksen ja BKT per capitaa maakohtaiset arvot

LIITE 6. Energia- ja hiili-intensiteetin maakohtaiset arvot

LIITE 7. Kiinteiden vaikutusten malli klusterirobusteilla keskivirheillä

## **KUVALUETTELO**

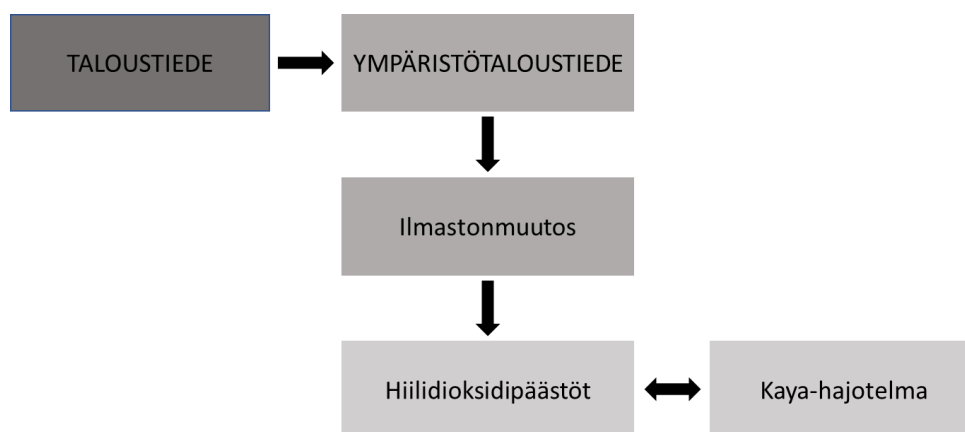
Kuva 1. Tutkielman teoreettinen viitekehys

## 1. Johdanto

Nykypäivänä maapallon ilmakehän lämpeneminen on erittäin suuri huolenaihe. Tähän ilmiöön osaltaan syynä on kasvihuonekaasupäästöjen, erityisesti hiilidioksidipäästöjen eli CO<sub>2</sub>-päästöjen kasvu ilmakehässä. Kahden viime vuosikymmenen nopean globaalin talouskehityksen seurauksena energian kysyntä on noussut, samoin myös hiilidioksidipäästöt. Näin ollen hiilidioksidipäästöjen taustatekijöiden ymmärtäminen on välttämätöntä tulevaa energiasuunnittelua ja politiikkaa varten. (Pui & Othman 2019, 468) Hiilidioksidipäästöjen haastavaa ongelmaa varten poliittisille päätöksentekijöille on kehitetty tekniikoita, joita käytetään tunnistamaan energiankulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen taustatekijöitä. (Lima, Nunes, Cunha & Lucena 2016, 1361) Tekniikka, jota myös tässä kandidaatintutkielmassa käytetään, on Kaya-hajotelma, jonka puitteissa yritetään selvittää hiilidioksidipäästöjen taustatekijöitä ja niiden vaikutuksia päästöihin.

Ympäristön kasvihuonekaasupäästöjen ja ihmisen toiminnan välille on löytynyt merkittävä yhteys. Tätä suhdetta on alettu tutkimaan ja Hallitustenvälinen Ilmastonmuutospaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) on todennut ihmisten toiminnan aiheuttaneen yli 90 prosenttia historiassa tapahtuneesta lämpötilojen noususta 1900-luvulta lähtien. (Tavakoli 2018, 257) IEA:n (International Energy Agency) viimeaikaisten arvioiden valossa hiilidioksidipäästöt kasvavat 1,5 prosenttia vuosittain ja tämän seurauksena hiilidioksidipäästöjen odotetaan kasvavan merkittävästi vuoteen 2030 mennessä. Päästöjen kasvun syynä nähdään kehittyvien maiden nopeampi teollistuminen. (Naudé 2011, 1006) Saavutettavin ja käytännössä paras toimi ilmastonmuutoksen torjumiseksi ja sen seurauksien hillitsemiseksi on nopea kasvihuonekaasupäästöjen, erityisesti hiilidioksidipäästöjen vähentäminen. Ilmastonmuutos on maailmanlaajuinen haaste, joka ei kunnioita kansallisia rajoja. (Tavakoli 2018, 254) Kaya-hajotelma on yksi työkalu hiilidioksidipäästöjen tutkimukselle, joka yhdistää hiilidioksidipäästöt ja ihmisen toiminnan. Naudén (2011, 1006) mukaan Kaya-hajotelma on paljon käytetty menetelmä, koska sen avaintekijöiden valossa voidaan ennustaa ihmisen toiminnasta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Se huomioi väkiluvun, energian käytön ja bruttokansantuotteen eli BKT:n hiilidioksidipäästöjen tutkimuksessa.

Taloustiede ei ole pelkkiä taloudellisia tuloja ja menoja markkinoilla vaan hinnattomat tai markkinattomat palvelut, joita luonnollinen ympäristö tarjoaa, ovat sen tutkimuksen kohteita yhtä lailla. (Hanley, Shogren & White 2013, 4) Ympäristotaloustiede keskittyy ympäristön laadun, yksilöiden, ryhmien ja organisaatioiden taloudellisen käyttäytymisen väliseen suhteeseen (Field & Field 2009,106). Ympäristotaloustiede tarjoaa perinteisessä muodossaan hyvän tarkastelukehikon ympäristöongelmien syiden ja sääntelyn tarpeen ymmärtämiseksi (Määttä & Pulliainen 2003, 115). Nykypäivänä ihmiset kiinnittävät enemmän huomiota taloudellisen toiminnan ympäristöseurauksiin ja ympäristön taloudelliseen arvoon. Lisäksi yhä enemmän huomio kiinnittyy ympäristön pilaantumiseen ja sen laadun alenemiseen sekä ekosysteemin tarjoamiin etuihin. (Hanley et al. 2013, 3) Näin ollen emme halua menettää meille tärkeää ympäristöä, joten ensimmäiseksi täytyy hyväksyä, että ihmisen tuottama talous on loppujen lopuksi riippuvainen ympäristöstään. Tutkielman teoreettinen viitekehys on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Tutkielman teoreettinen viitekehys.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää kvantitatiivisen analyysin perusteella, miten Kaya-hajotelman osatekijät vaikuttavat valituilla alueilla, joista toinen on pitkälle kehittynyt alue Euroopassa ja toinen kehityksessä hieman jäljessä oleva alue Aasiassa. Tutkimuksen osalta Kaya-hajotelmassa käytetään alkuperäisiä muuttujia eli väkilukua, BKT:ta ja energiankulutusta. Tämän työn lähtökohta on etsiä suurimmat vaikuttavat tekijät hiilidioksidipäästöissä Kaya-hajotelman puitteissa Länsi-Euroopassa ja Itä-Aasiassa. Tarkoituksena on selvittää mikä tekijä vaikuttaa eniten hiilidioksidipäästöihin

kohdealueilla ja miten vaikutukset eroavat kyseisten alueiden välillä. Tutkimuksen tavoitteiden perusteella on muodostettu yksi päätutkimuskysymys ja kaksi alatutkimuskysymystä, jotka ovat seuraavat:

Päätutkimuskysymys:

1. Minkälainen vaikutus Kaya-hajotelman taustatekijöillä on hiilidioksidipäästöihin Länsi-Euroopassa ja Itä-Aasiassa?

Alatutkimuskysymykset:

- Mitkä ovat tärkeimmät selittäjät hiilidioksidipäästöissä valituilla alueilla?
- Miten Kaya-hajotelman taustatekijät eroavat kehittyneemmällä alueella verrattuna kehittyvään alueeseen?

Ilmastonmuutoksesta ja sitä aiheuttavista hiilidioksidipäästöistä on tehty paljon tutkimuksia ja sen vaikutuksista tiedetään jo aika paljon. Tutkimus hiilidioksidipäästöistä eri alueilla on kuitenkin erityisen tärkeää, koska tarvitsemme paljon enemmän tietoa talouden ja luonnon ekosysteemin välisestä riippuvuudesta, jotta nämä voidaan keskenään sovittaa parhaiten yhteen (Borg & Joutsenvirta 2015, 229). Aikaisemmat tutkimukset ovat kohdistuneet usein maiden väliseen vertailuun, joten maanosien välinen vertailu on jäänyt vähemmälle huomiolle. Tarkasteltaviksi alueiksi rajautui niiden erilaisuuden vuoksi Länsi-Eurooppa ja Itä-Aasia. Itä-Aasian otosta on laajennettu tutkimuksen luotettavuuden takia ja datan rajallisuuden vuoksi ottamalla tarkasteluun mukaan muutama maa Kaakkois-Aasiasta. Tarkastelu molempien maiden osalta koskee vuosia 1970-2015.

Tutkielma on jaettu kahteen osaan, joista ensimmäisessä käsitellään tutkielmaan liittyvää teoriaa ja toisessa osassa keskitytään empiiriseen osaan. Tutkielma etenee seuraavasti. Johdannossa esitellään tutkimuksen aihepiiriä yleisellä tasolla, tutkimusongelma ja sen perusteella muodostetut tutkimuskysymykset, joihin tällä tutkimuksella on tarkoitus löytää vastaus. Näiden lisäksi esitellään teoreettinen viitekehys, jota tutkimuksessa käytetään sekä perustelut tutkielman rajauksille. Toisessa luvussa syvennyttään



tarkemmin tutkielman aihepiiriin ilmastonmuutoksen ja hiilidioksidipäästöjen tarkastelulla ja pohditaan näiden välisiä yhteyksiä ja suhdetta toisiinsa. Lisäksi esitellään tutkielman tärkein työkalu, Kaya-hajotelma ja sen teoriaa. Alaluvuissa esitellään vielä Kaya-hajotelman komponentit. Toinen luku päättyy Kaya-hajotelman aikaisempien tutkimusten keskeisimpien löydöksiä esittelyyn. Kolmannessa luvussa alkaa Kaya-hajotelman estimointi. Ensiksi esitellään ja kuvataan aineistoa, josta siirrytään estimointimenetelmään ja sen valintaan. Neljännessä luvussa esitetään estimoinnin perusteella saadut keskeisimmät tulokset. Viimeisessä luvussa kootaan tutkimuksen keskeisimmät tulokset yhteen ja esitetään mahdollisia ehdotuksia jatkotutkimukselle.

## 2. Teoreettinen tausta

Kasvihuoneilmiön voimistumisesta aiheutuva maapallon ilmaston muuttuminen eli ilmastonmuutos muodostaa merkittävän globaalisen uhkatekijän nykypäivänä. Kasvihuoneilmiön voimistumisen taustalla on ihmisen toiminta, joka vahingoittaa elintärkeää ympäristöä yhä enemmän. (Mattila 1991, 1) Ilmastonmuutos vaikuttaa kielteisesti ihmisiin ja luontoon koko maapallolla. Se tulee muun muassa vaikuttamaan veden saantiin, ruoan tuotantoon, helleaaltojen lisääntymiseen ja elinympäristöön yleisesti. Fakta on, että se koskettaa kaikkia maapallon ihmisiä. Luonnonolot, ympäristön monimuotoisuus ja useat eläinlajit tulevat kärsimään siitä myös globaalisti. (Vitanen & Rohweder 2011, 11) Maapallon voimakas muutostila on tieteellisesti todistettu ja sitä on turha kiistää (Borg & Joutsenvirta 2015, 7). Ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat laajat, jonka vuoksi se on tärkeä tutkimusaihe, josta myös yhä enemmän tarvitaan tietoa.

Ihminen on kiistatta ollut merkittävä kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttaja viimeisen sadan vuoden aikana. Käsitys siitä, että ilmastonmuutos on seurausta ihmisen toiminnasta, on saanut vahvistusta niin Sternin (2006) artikkelista kuin hiljattain julkaistusta Hallitustenvälisen Ilmastopaneelin (IPCC, 2019) raportistakin. Honkatukian (2008, 72) mielestä taloudellisena ongelmana ilmastonmuutoksen torjunta on haastava. Ilmastonmuutos tulee aiheuttamaan peruuttamattomia muutoksia, jotka voivat pahimmillaan olla erittäin kauaskantoisia.

Taloukasvu ja siihen liittyvä elintason nousu on vaatinut energian suurempaa hyödyntämistä, mutta erityisesti fossiilisten polttoaineiden hyödyntäminen energiantuotannossa on tuottanut ilmakehään valtavasti päästöjä. (Aaltola & Ollikainen 2011, 121) IPCC (2019) raportin mukaan ilmakehän lämpenemistä ei voida enää estää, mutta vähimmäistavoitteena on rajoittaa päästöjä niin paljon, että keskilämpötilan muutos maapallolla jäisi kahteen asteeseen tai alle sen. Jos päästöjä onnistutaan hillitsemään, vaikuttaa se ratkaisevasti siihen, kuinka suuriin ilmaston lämpenemisestä aiheutuviin muutoksiin ihmiskunta joutuu sopeutumaan. Ilmastomuutoksessa on siis kaksi puolta, hillintä ja sopeutuminen, ja näillä on kriittinen vaikutus toisiinsa. Myös Stern (2006, 4) korostaa, että hiilidioksidipäästöjen tehokas rajoittaminen ja hillitseminen tulee halvemmaksi kuin sopeutuminen globaaliin ilmastomuutokseen.

Hiilidioksidipäästöjen hillintäpolitiikka on globaalia. Vähennettiinpä päästöjä missä tahansa, se vaikuttaa koko maapallon ilmastoon. Toisin kuin hillintä, sopeutuminen ilmastomuutokseen on paikallista ja resurssit sopeutumiseen eivät ole samanlaisia joka puolella maapalloa. (Aaltola et al. 2011, 122) Ilmasto ja luonto voidaan nähdä siis julkishyödykkeenä, jolloin ketään ei voida sulkea pois niiden kuluttamisesta. Julkishyödykkeen tapauksessa esiintyy aina vapaamatkustajan ongelma, juurikin siitä syystä, että sen tuottamisen jälkeen hyödyke on kaikkien kulutettavissa ja kuka vain voi hyötyä siitä maksamatta. (Hyytinen & Maliranta 2015, 29) Julkishyödykkeen käyttö ei näin ollen vähennä muiden mahdollisuuksia käyttää sitä (Määttä & Pulliainen 2003, 28). Ilmastomuutosongelmassa esiintyy vapaamatkustajan ongelman lisäksi aina ulkoisvaikutuksia. Ulkoisvaikutukset ovat seurausta ihmisten itsekkyydestä ainakin luonnon pilaantumisen tapauksessa. Ihminen kuluttaa luontoa ja ei ota huomioon tekonsa seurauksia, jotka voivat aiheuttaa merkittävää haittaa ympäristölle, jolloin ulkoisvaikutuksia syntyy. Ympäristön saastumisen kohdalla on kysymys haitallisista ulkoisvaikutuksista eli ulkoishaitoista. (Hyytinen & Maliranta 2015, 27) Esimerkiksi Kiina on yksi suurimmista saastuttajista, jolloin yhteiskunnan rajakustannus on suurempi kuin maan yksityinen rajakustannus. Tällöin tuotannon taso on suurempi kuin koko yhteiskunnan kannalta olisi optimaalista.

Jotta päästöjen vähentämisessä voitaisiin päästä tavoiteltuun tasoon, edellyttää se globaalin päästöjen rajoittamista koskevan sopimuksen solmimista. Yhdistyneillä kansakunnilla on ollut keskeinen rooli ilmastosopimusten aikaansaamisessa. (Aaltola et

al. 2011, 122) Pariisin ilmastopöytäkirja, joka laadittiin vuonna 2015 on toiminut vaikuttajana päästöjen vähentämisessä, mutta se on ollut kaikkea muuta kuin helppo tehtävä (Ympäristöministeriö 2018). Nykyään tarkoituksenmukaisen kansainvälisen yhteistyön saavuttaminen on edelleen ylitsepääsemätöntä. Vaikka eri maat ovatkin kiinnostuneita ilmastomuutoksesta, monet ovat silti haluttomia vähentämään päästöjä vapaaehtoisesti. Näin esiintyy vapaamatkustajan ongelma, jolloin maat hyötyvät muiden maiden päästöjen vähentämisestä riippumatta siitä, vähentävätkö he itse päästöjä. Kehitysmaissa puhdas vesi ja vakaa elintarvikehuolto nähdään kiireellisimpinä ongelmina kuin ilmastomuutospolitiikka. Kehitysmailla on myös vähemmän taloudellisia ja teknisiä toimintamahdollisuuksia sekä erilaiset käsitykset siitä, mikä on vaivan oikeudenmukaista jakautumista. (Hanley et al. 2013, 178) Monet ekonomistit ennustavatkin, että maiden välinen yhteistyö päästöjen rajoittamisessa tulee olemaan vaikeaa. Peliteoria (Game Theory) on osoittanut yhä enemmän, että mailla on kannustin vapaamatkustaa muiden toimilla ja välttää kansainvälisten sopimusten allekirjoittamista maailman päästöjen vähentämiseksi. (Hanley et al. 2013, 8)

Koska ulkoisvaikutukset ja vapaamatkustajan ongelma eivät tule poistumaan, päästöjen vähentäminen ei tule koskaan olemaan helppoa. Puhdasta ilmaa ei pystytä tuottamaan markkinoilla, joten julkisen vallan on puututtava tähän ongelmaan. Julkisella vallalla on onneksi muutamia keinoja, joilla se voi pakottaa talousyksiköt parantamaan ilman laatua. (Määttä & Pulliainen 2003, 29) Erilaisia markkinoiden toiminnan korjaamiseen tähtäviä veroja kutsutaan taloustieteessä pigou-veroiksi (Hyytinen & Maliranta 2015, 30). Pigou-veroista esimerkkinä ovat erilaiset ympäristöverot, jotka ovat saaneet jalansijaa ympäristöpolitiikassa enenevässä määrin erityisesti Pohjoismaissa ja Länsi-Euroopassa. Ympäristöverojen ideana on, että talousyksiköt tekisivät päätöksensä yhteiskunnallisten kustannusten perusteella eli ottaen huomioon paitsi heille lankeavat yksityiset kustannukset myös ulkopuolisille aiheutuvat ulkoiskustannukset. Tällä tavoin ulkoiskustannukset sisäistettäisiin talousyksiköiden toiminnassa ja voimavarat allokoituisivat tehokkaasti. (Määttä & Pulliainen 2003, 123) Pigou-verojen kaltaiset ratkaisut ympäristön laadun paranemisesta ovat sisäistetty myös Pariisin ilmastopöytäkirjaan.

Pahimmillaan ilmastonmuutos tulee aiheuttamaan suuria vahinkoja ja se tulee vaikuttamaan eri alueilla eri tavalla. Ensinnäkin kehitysmaat ovat maantieteellisesti epäsuotuisassa asemassa. Ne ovat keskimäärin jo lämpimämpiä kuin kehittyneet alueet ja kärsivätkin kuivuudesta. Jatkuva lämpeneminen aiheuttaa köyhille maille korkeampia kustannuksia samalla kun ilmastonmuutoksen edut jäävät vähäisiksi. Toiseksi heidän alhaiset tulonsa ja muut heikot olot vaikeuttavat sopeutumista ilmastonmuutokseen. Näiden syiden vuoksi, ilmastonmuutos todennäköisesti lisää köyhyyttä ja vähentää kotitalouksien kykyä investoida parempaan tulevaisuuteen. (Stern 2006, 7)

Suuremmilla leveysasteilla, kuten Kanadassa, Venäjällä ja Skandinaviassa, ilmastonmuutos voi johtaa nettohyötyihin lämpötilan nousun myötä. Kun lämpötila nousee, maataloudesta saadaan isompia satoja, talven aiheuttama kuolleisuus laskee ja matkailu lisääntyy alueellisesti. Skandinaviassa vaikutus matkailuun on päinvastainen, jos kunnan talvia ei enää ole. Suuremmilla leveysasteilla kuitenkin nopea lämpeneminen vahingoittaa infrastruktuuria ja muuttaa biologista monimuotoisuutta. Alemmilla leveysasteilla sijaitsevat maat ovat haavoittuvaisempia. Esimerkiksi veden saatavuuden ja sadontuotannon odotetaan laskevan Etelä-Euroopassa 20 prosentilla. Lisäksi alueilla, joilla vettä on jo niukasti, tullaan kohtaamaan vakavia vaikeuksia ja kasvavia kustannuksia. Äärimmäisten sääolosuhteiden, kuten esimerkiksi myrskyjen, taifuunien, hurrikaanien, tulvien, kuivuuden ja lämpöaaltojen riski kasvaa korkeammassa lämpötiloissa. (Stern 2006, 8; Naudé 2011, 1007) Taulukossa 1 on listattu ilmastonmuutoksen vaikutuksia luontoon ja ihmiseen.

Taulukko 1. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia alueittain, mukailten Stern (2006)

Ilmastonmuutos	Luonto	Ihminen
<b>lämpötila nousee</b>	- äärimmäiset sääolosuhteet lisääntyvät korkeammissa lämpötiloissa	- kuolleisuus kuumuuden takia nousee - tartuntataudit lisäänty
kehitysmaat	- kuivuus lisääntyy	- korkeammat kustannukset jatkuvasta lämpenemisestä - köyhyys - kyky investoida parempaan tulevaisuuteen heikkenee
suuremmat leveysasteet	- biologinen monimuotoisuus muuttuu	- Maataloudesta isompia satoja, toisaalta kasvitaudit ja tuhohyönteiset leviävät - talvikuolleisuus laskee - matkailu lisääntyy
Eurooppa	- veden saatavuus vähenee	- sadoista saatavat tuotot laskee - helleaallot - metsäpalot
<b>jäätiköt sulaa</b>	- aiheuttaa merenpinnan nousua	- merenpinta nousee tuhoten asuinalueita
<b>merenpinta nousee</b>	- saaria jää merenpinnan alle - veden lämpeneminen lisää veden tilavuutta	- tulvat lisääntyvät tuhoten eri alueita - Suolavesi pilaa juomaveden

Seuraavissa aluvuissa tullaan käsittelemään tarkemmin ilmastonmuutosta aiheuttavia hiilidioksidipäästöjä ja niiden taustatekijöitä. Tarkasteluun otetaan myös Kaya-hajotelma, joka on taloustieteellinen malli, jonka avulla selitetään hiilidioksidipäästöjä.

## 2.1. Hiilidioksidipäästöt

Kasvihuonekaasupäästöjen ja varsinkin hiilidioksidipäästöjen vaikutukset maapallolle ovat suuri kansainvälinen uhka sekä kasvava huolenaihe. Tuore IPCC (2019) julkaisu esittää, että rajoittaakseen maapallon ilmastonlämpenemisen 1,5°C, pitää hiilidioksidipäästöjä vähentää 45 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Jos lämpeneminen halutaan rajoittaa 2°C, on vastaava luku 25 prosenttia. Molemmissa tapauksissa ilmastonlämpeneminen aiheuttaa silti suuria vahinkoja maapallolle, joten päästöjen hillitsemistä ei voida tarpeeksi korostaa. (IPCC 2019)

Ilmastopimuksilla hiilidioksidipäästöjä on yritetty saada vähennettyä, mutta maailmanlaajuisten päästöjen epätasaisen jakautumisen on nähty olevan keskeinen syy sille, miksi kansainväliset ilmastopimukset ovat kiistanalaisia. Maailman rikkaimmissa maissa asuu puolet maailman kokonaisväestöstä, ja niiden päästöt kattaa 86 prosenttia koko maapallon hiilidioksidipäästöistä. (Ritchie & Roser 2018) Huomio hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä tulisi kohdistaa ensimmäiseksi näille alueille, mutta ihmisen toiminnan aiheuttamat ulkoisvaikutukset ympäristölle ja vapaamatkustajan ongelma tekevät päästöjen vähentämisestä yhä hankalampaa.

Borgin ja Joutsenvirran (2015, 152) mukaan ihmisen toiminta lisää hiilidioksidin määrää ilmakehässä pääasiassa kolmella tavalla. Ensinnäkin hiilinieluminen väheni, kun metsiä hävitettiin, poltettiin ja muutettiin viljelyalueiksi. Näin ollen metsät sitovat nykyään entistä vähemmän hiilidioksidia. Toiseksi sementin valmistaminen tuottaa hiilidioksidia suuret määrät. Siinä luonnon hiilivarastoja muutetaan sementiksi ja betoniksi, jolloin hiilidioksidia vapautuu ilmakehään. Suurin hiilidioksidin aiheuttaja ilmakehässä on kuitenkin fossiilienergian polttaminen eli uusiutumattomien luonnonvarojen käyttö energian tuotannossa. Lähes 90 prosenttia ihmisen käyttämästä energiasta tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, kuten kivihieillä, öljyllä ja kaasulla. Ne ovat Borgin ja Joutsenvirran (2015, 152) mukaan halvimpia tapoja tuottaa lämpöä, sähköä ja liikennepolttoaineita. Tällä hetkellä fossiilisten polttoaineiden osuus kaikista hiilidioksidipäästöistä on noin 75 prosenttia. (MayorsIndicators 2019) Fossiilisilla polttoaineilla on edelleen hallitseva rooli globaaleissa energiajärjestelmissä ja tämän seurauksena energian rooli olisi tasapainotettava sosiaalisessa ja taloudellisessa kehityksessä. Siirtyminen kohti energianlähteitä, jotka aiheuttavat vähemmän hiilidioksidipäästöjä, olisi suotavaa. (Ritchie & Roser 2018)

Vaikka kasvavilla hiilidioksidipäästöillä on selviä kielteisiä ympäristövaikutuksia, on myös totta, että ne ovat olleet historiallisesti sivutuotos, joka on kertonut ihmisten elinolojen paranemisesta. Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on kuitenkin tärkeää tulevien sukupolvien elinolojen suojelemiseksi. Tätä näkökulmaa ei voida sivuuttaa, mikäli haluamme tulevaisuuden, joka on kestävä ja tarjoaa korkeat elintasot kaikille. (Ritchie & Roser 2018) Kestävä kehitys onkin osoittautunut hyvin tärkeäksi. Siitä käytävä keskustelu on auttanut ihmisiä ymmärtämään, etteivät taloustoimet ole irrallaan luonnosta ja, että taloudellisella kasvulla, luonnonvarojen riittävyydellä ja ympäristön säilymisellä

elinkelpoisena on omat roolinsa paremman tulevaisuuden tavoittelussa. (Määttä & Pulliainen 2003, 40)

## 2.2. Kaya-hajotelma

Ensimmäisen kerran Kaya-hajotelma esiteltiin japanilaisen energia-alan professorin Yoichi Kayan toimesta vuonna 1989 IPCC seminaarissa, mutta se vakiintui vasta hänen kirjassaan *Ympäristö, energia ja talous: Kestävän kehityksen strategiat* vuonna 1997. (Wu, Shen, Zhang, Skitmore & Lu 2016, 591; Giraud, Lantremange, Nicolas & Rech 2017, 5) Kaya löysi merkittävän yhteyden hiilidioksidipäästöjä tarkasteltaessaan ihmisen toiminnan ja kasvihuonekaasupäästöjen välillä, jonka olivat jo aiemmin todistaneet myös monet muut tutkijat (Jancovici 2014). Tästä syystä Kaya-hajotelmaa voidaan käyttää kasvihuonekaasupäästöjen yhteydessä, jolloin lähtökohtana on tunnistaa avaintekijät, jotka vaikuttavat kokonaispäästöihin. Tämän lisäksi hajotelman joustavuus sallii sen käytön myös poliittisten ja teknologisten toimintojen tehokkuuden arvioimisessa. (Mavromatidis, Orehounig, Richner & Carmeliet 2014, 344) Myös IPCC käyttää kyseistä hajotelmaa ja se luokin perustan tulevaisuuden päästöskenaarioiden kehitykselle päästöjen erityisraportoinnissa (Jancovici 2014).

Kaya-hajotelma on laajasti tunnettu ja esitetään usein yhtälön muodossa, joka käsittää kokonaisuudessaan neljä tekijää. Yhtälön suuruusmerkin vasemmalla puolella määritetään kohdemuuttuja, joka usein on hiilidioksidipäästöt ja suuruusmerkin oikealle puolelle kirjataan vaikuttavat tekijät. Vakiintuneet vaikuttavat tekijät ovat väkiluku, energiankulutus ja BKT. (Mavromatidis et al. 2014, 344)

Kaya-hajotelman yhtälön muoto saattaa vaihdella, mutta idea kaikissa muodoissa on sama (Mavromatidis et al. 2014, 344). Yhtälö on esitetty kaavassa 1:

$$C = cap \times \frac{GDP}{cap} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{C}{E}, \quad (1)$$

jossa cap on väkiluku, GDP on bruttokansantuote ja E energiankulutus. C kuvaa hiilidioksidipäästöjä. BKT on usein huomioitu taloudellisena kehityksenä. Yhtälöä lähemmin tarkastelemalla, tekijät voidaan jakaa vielä energiaintensiteettiin ja hiili-intensiteettiin, joista ensimmäisessä energiankulutus on suhteutettuna BKT:hen ja jälkimmäisessä mitataan hiilidioksidipäästöjä kulutettua energiayksikköä kohden. (Jancovici 2014) Hiili- ja energiaintensiteetistä puhuminen ja niiden käyttäminen on vakiintunut tutkijoiden joukossa, niiden monipuolisemman tiedon vuoksi. Hiili- ja energiaintensiteetistä kerrotaan tarkemmin alaluvuissa 2.2.1 ja 2.2.3.

Mavromatidis et al. (2014, 344) mielestä yhtälölle on ominaista sen tekijöiden muutoksien vaikutukset toisiinsa. On ilmeistä, että jos jokin Kaya-hajotelman vaikuttavista tekijöistä vähenisi, se johtaisi kokonaispäästöjen vähenemiseen, jos muita tekijöitä ei lisittäisi tasolle, joka kompensoisi tätä muutosta. Ne muutokset, jotka vähentäisivät päästöjä, eivät kuitenkaan ole ilmeisiä.

Kaya-hajotelman taustatekijöissä tapahtuvat muutokset joko ennustavat päästöjen nousua tai laskua. Maailmanlaajuinen talouskasvu yhdessä energian kysynnän kasvun kanssa on avainasemassa päästöjen lisääntymisessä. Koska energiaa tarvitaan enemmän talouskasvun takia, päädytään käyttämään helpommin saatavilla olevia energialähteitä, esimerkiksi kivihiltä. Hiili-intensiteetin voidaan siis olettaa kasvavan ajan saatossa, jos energian lähteenä käytetään uusiutumattomia energialähteitä. Myös talouskasvu kasvattaa päästöjä aina siihen pisteeseen asti, kunnes saavutetaan tietty taso, jolloin voidaan omaksua parempi teknologia. Kehittyneissä maissa taloudellinen kasvu on opittu saavuttamaan saastuttamalla vähemmän, mutta kehittyvät ja vähemmän kehittyneet maat ovat vasta tämän siirtymävaiheen alkuvaiheessa, jolloin päästöjä syntyy enemmän. Väkiluku ja väestönkasvun vaikutus päästöissä oletetaan olevan kiistämätön. Karkeasti voidaan ennustaa, että jos väkiluku kasvaa kaksinkertaiseksi, myös päästöt kaksinkertaistuvat. (Tavakoli 2018, 257-258)

### 2.2.1. BKT per capita

Talouskasvu viittaa tyypillisesti kaikkeen maassa tuotettujen tavaroiden ja palveluiden muutokseen yhden vuoden aikana. (Everett, Ishwaran, Ansaloni & Rubin 2010, 13)



BKT per capita eli asukasta kohden lasketun BKT:n määrän kasvulla mitataan talouskasvua. Se on aineellisen elintason kasvua siinä mielessä, että asukasta kohden käytävissä olevien tavaroiden ja palveluiden määrä sekä niiden hankkimiseksi tarvittavat tulot kasvavat. Kansakunnan hyvinvointia se lisää siten lähestulkoon samalla tavoin eli yhtä hyvin tai huonosti. (Ollikainen & Pohjola 2013, 6) Hyvinvoinnin tarkastelu BKT:n kautta on kuitenkin kiistanalainen, koska talouden tuotannon merkitys korostuu suhteettomasti kyseisessä mittarissa ja muut elämänlaatuun keskeisesti vaikuttavat asiat jäävät vähälle huomiolle. (Hoffrén 2008)

BKT on tulojen mittari, jonka tarkoituksena on saada aikaan EKC-käyrän (Environmental Kuznets Curve) kaltainen vaikutus. Vaikutuksen seurauksena tulojen kasvu alkaa lopulta vaikuttaa vähentävästi ympäristön saasteisiin ja näin ollen parantaa ympäristönlaatua. (Hanley et al. 2013, 164) Ympäristötaloudellinen Kuznets-käyrää tunnistettiin ensimmäisen kerran Grosmanin ja Kruegerin toimesta vuonna 1995. Sitä kuvataan alaspäin aukeavana paraabelina, jossa tarkastellaan ympäristön saastumisen tai pilaantumisen ja asukasta kohden lasketun BKT:n suhdetta. (Hanley et al. 2013, 113) Kuznets-käyrän muoto voidaan Everett et al. (2010, 16) mukaan selittää seuraavasti: kun BKT asukasta kohden laskettuna nousee, huononee myös ympäristönlaatu. Tietyn ajankohdan jälkeen BKT:n kasvu asukasta kohti johtaa kuitenkin ympäristövahinkojen laskuun. (Everett et al. 2010, 16-17) Talouskasvu siis johtaa resurssien käytön lisääntymiseen, mikä lisää myös jätteiden määrää. Tätä kutsutaan mittakaavavaikutukseksi (Scale Effect). (Hanley et al. 2013, 113)

Hypoteesin mukaan myös varhaisessa kehitysvaiheessa olevan talouden kasvu kasvattaa päästöjä enemmän, kun tehokkaampi tuotanto vie jalansijaa maataloudelta ja energiankulutus lisääntyy. Toisin sanoen kasvu liittyy talouden rakennemuutokseen, joka johtaa korkeimpiin päästölukemiin aina käännepisteeseen asti. Vasta muun muassa ympäristönlaadun kasvava kysyntä käännepisteen jälkeen vaikuttaa alentavasti ympäristöongelmiin. (Hanley et al. 2013, 113-114) Toisaalta teollistuneiden valtioiden päästöt alkavat laskea osittain myös siitä syystä, että tuotantoa siirretään halvemman tuotannon maihin, joissa on jo valmiiksi korkea hiilidioksidipäästöjen taso. (Everett et al. 2010, 18)

Taloudellinen kehitys ja kasvu liittyvät läheisesti siis energiankulutukseen, josta syntyy hiilidioksidipäästöjä. Loogista on, että mitä enemmän talous kasvaa, sen enemmän energiaa kulutetaan, koska kasvava talous tarvitsee energiaa toimiakseen tehokkaasti. On todennäköistä, että taloudellinen kehitys voi johtaa energian tehokkaampaan käyttöön ja siten vähentää energiankulutusta, mutta niin ei aina käy. Tästä syystä energiankulutus ja taloudellinen kehitys voidaan liittää toisiinsa, mutta syy-yhteyttä ei voi määrittää etukäteen. Havaittavissa kuitenkin on, että energiankulutuksella on vahva korrelaatio hiilidioksidipäästöjen, fossiilisten polttoaineiden ja taloudellisen toiminnan välillä. (Lottfalipour, Falahi & Ashena 2010, 5115) Tällä hetkellä energian osuus on kaksi kolmasosaa kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärästä ja kattaa jopa 80% hiilidioksidin määrästä ilmakehässä (IEA 2017).

### 2.2.2. Energiaintensiteetti

Energiaintensiteetti on energian kokonaiskulutus kansantalouden arvonlisäystä kohti (E/GDP) ja toimii energiatehokkuuden mittarina. Se on vähentynyt teollistumisen alusta alkaen, koska edistyneempää teknologiaa on otettu käyttöön. Energiaintensiteetti vaihtelee maittain ja alueittain taustalla olevien tekijöiden mukaan. Muun muassa taloudellinen rakenne, ilmasto, maantiede ja energiatehokkuus vaikuttavat tähän. Globaalisti energiaintensiteetti laski lähes kolmanneksella vuosina 1990-2015 ja sen onkin nähty olevan ainoa tekijä, joka on tähän mennessä vaikuttanut laskevasti hiilidioksidipäästöihin. Sen on nähty olevan myös ainoa tekijä, jolla päästöjen kasvua voidaan tulevaisuudessa kompensoida. (Henriques & Borowiecki 2014, 21)

Vaikka talouskasvu on tuottanut monia etuja, kuten parantanut elämänlaatua ja nostanut elintasoa, se on johtanut myös luonnonvarojen ehtymiseen ja ekosysteemin hajoamiseen. (Everett et al. 2010, 13) Talouskasvun kielteiset vaikutukset ovat jatkaneet kasvuaan viime aikoina. Muun muassa kasautuvat ympäristöongelmat ovat seurausta liiallisesta talouskasvusta ja ne vaativatkin nyt entistä enemmän huomiota. (Hoffrén 2008) Talouskasvulla on suora vaikutus käytettävään energian määrään ja näin ollen myös hiilidioksidipäästöihin. Suurin osa aiemmasta kirjallisuudesta viittaa siihen, että suhde talouskasvun ja hiilidioksidipäästöjen välillä on olemassa ja vaikuttaa näin ollen

käytettäviin energianlähteisiin ja energiatehokkuuteen. Lisäksi BKT:n ja hiilidioksidipäästöjen välistä suhdetta on pidetty lineaarisena. (Robalino-López, Mena-Nieto, García-Ramos & Golpe, 2015, 603)

Toisaalta ympäristöongelmien ja tulotason suhdetta on tarkasteltu myös käänteisen U:n muotoisena suhteena Kuznets-käyrän tapauksessa, jolloin suhde on epälineaarinen. Tulotason kasvu lisää ympäristöongelmia käännepisteeseen asti, kunnes paremman teknologian omaksumisen vuoksi, ympäristölaatu alkaa paranemaan. Talouskasvun ja ympäristöongelmien välistä suhdetta on siis tarkasteltu paljon historiallisesti. (Hanley et al. 2013, 112-113) Hiilidioksidipäästöjen ja talouskasvun suhde on yhtä lailla ollut tutkimuksen kohteena. Useimpien tutkimusten tuloksista voidaan todeta, että kun kulutus lisääntyy kasvavan väestön ja talouskasvun seurauksena, hiilidioksidipäästöt kasvavat myös. (Everett et al. 2010, 21)

Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että suhde BKT:n ja ympäristön laadun heikkenemisessä, eli tässä tapauksessa hiilidioksidipäästöjen kasvussa, on olemassa. Näin ollen taloudellisen kasvun mahdollisuuksien, että sen luonteen pohtimiseksi tarvitaan analyysia siitä, kuinka kasvu vaikuttaa luonnonvarojen hyödyntämiseen ja ympäristön laadun pilaantumiseen. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että kuinka nämä vaikutukset kytkeytyvät takaisin talouteen. (Ollikainen & Pohjola 2013, 12)

### 2.2.3. Väkiluvun kehitys

Väestön kehityksen vaikutus nähdään olevan kiistaton päästöjen tarkastelussa. Väestön kasvu johtaa nopeaan energian kysynnän lisääntymiseen, jotta välttämättömät tarpeet voidaan täyttää. (Tavakoli 2018, 255) Ilmiönä väestönkasvu on monisyinen ja vaatii usein yhteiskunnallisten näkökulmien laajamittaista huomioimista. Mitä suurempi väkiluku on, sitä nopeammin ekologiset rajat ja maapallon kantokyky tulevat vastaan. Väestön suurta määrää ongelmallisempaan nähdään kuitenkin elintapojen muuttuminen kasvavan kulutuksen suuntaan. (Borg & Joutsenvirta 2015, 178) Väestö ei tule kuitenkaan jakaantumaan tasaisesti ympäri maailmaa vaan aiheuttaa väistämättä alu-

eellista epätasa-arvoa. Epätasa-arvo näkyy myös päästöissä, josta seuraa muun muassa maiden välinen erilainen vastuun jakautuminen ilmastonmuutosongelmassa (Duro & Padilla 2006, 172).

Teollisen vallankumouksen alussa, vuonna 1750, maailman väkiluku oli 791 miljoonaa ja nykyään se on yli 7,7 miljardia. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on hyvä osoitus siitä, kuinka paljon fossiilisia polttoaineita on poltettu, koska se on lähes kaksinkertaistunut esiteollisesta ajasta. Näin ollen väkiluku on hyvä mittari selittämään hiilidioksidipäästöjen kasvua. Myös tilastot vahvistavat sen, että väkiluvun ja hiilidioksidipäästöjen kasvun välille on löydetty positiivinen yhteys (Tavakoli 2018, 256). Lisäksi väkiluvun kasvua voidaan pitää päätekijänä hiilidioksidipäästöjen kasvussa varsinkin kehittyvissä maissa (Tavakoli 2017, 92). On todettu myös, että väkiluvun vaikutus on jaettu, ei ainoastaan sen määrään vaan myös varakkuuteen samalla kun tulovaikutus ei ole homogeeninen maiden välillä (Cicea, Marinescu, Popa & Doprin 2014, 558).

#### 2.2.4. Hiili-intensiteetti

Hiili-intensiteetti eli hiilidioksidipäästöjen suhde energiankulutukseen (C/E) tarkoittaa sitä määrää hiilidioksidia, jota syntyy, kun käytetään energiaa. Aikaisempien tutkimusten mukaan hiili-intensiteetti eri energiankulutuksilla voi vaihdella paljon riippuen siitä energialähteiden yhdistelmästä, jota käytetään. Suurin osa maailmassa kulutetusta energiasta johtaa hiilidioksidipäästöihin ja ainoa tapa vähentää energian hiilipitoisuutta on lisätä uusiutuvien energianlähteiden käyttöä. (Jankovici 2014)

Hiili-intensiteetin historiallinen kehitys tunnetaan melko tarkkaan ja siitä on tehty paljon tutkimusta. Hiili-intensiteetti kasvoi aluksi sen takia, että maissa alettiin käyttää fossiilisia polttoaineita energianlähteinä, mutta hiilidioksidipäästöjen kasvulla nähdään olevan käännepointti. Muun muassa monessa kehittyneessä valtiossa, toisen maailmansodan jälkeen, siirtyminen öljyn ja maakaasun käyttöön, laski hiili-intensiteettiä. Päästöjen huipun saavuttamisen jälkeen hiilen käyttö muuttui olennaisesti erilaiseksi eri maissa, mikä johtui pääsääntöisesti maiden erilaisista energiapolitiikoista ja luonnolli-

sista resurssimääräyksistä. Nykyään hiili-intensiteetti voidaan nähdä olevan melko homogeeninen ainakin Euroopan kehittyneiden maiden osalta. (Henriques & Borowiecki 2014, 16-17)

Energiankulutuksella on siis vaikutusta taloudelliseen kasvuun, joka taas vaikuttaa käytettävään energiarakenteeseen ja -lähteisiin. Uusiutuvan energian osuuden lisääminen fossiilisten energialähteiden tilalle, tulee avainasemaan hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä. (Wang, Zhang & Liu 2019, 2) Koska kulutetusta energiasta suurin osa johtaa hiilidioksidipäästöjen kasvuun, energiankulutuksen vaikutus päästöissä on todella tärkeä tekijä (IEA 2017). Tavakolin (2018, 258) mukaan hiili-intensiteettiä voitaisiin pienentää kahdella tavalla: energialähteiden muuttamisella ja energiaintensiteetin laskulla. Kivihiili energianlähteenä on paljon saastuttavampaa kuin esimerkiksi maakaasu, joten siirtyminen vähemmän hiili-intensiivisempiin energianlähteisiin johtaisi hiili-intensiteetin laskuun. Myös uusiutuvien energialähteiden, esimerkiksi aurinko-, vesi- ja geotermisen energian käyttö voisi tarjota suurempia hyötyjä. (Tavakoli 2018, 258)

### **2.3. Kaya-hajotelman aikaisempia tuloksia**

Kaya-hajotelmaa on käytetty apuna monissa tutkimuksissa, kun on haluttu tutkia hiilidioksidipäästöjä ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Tavakolin (2018, 263) mielestä Kaya-hajotelma sopii mainiosti hiilidioksidipäästöjen tutkimiseen sen yksinkertaisuuden ja selkeän mallin vuoksi. Aikaisempien tutkimuksien tulokset ovat olleet melko yhteneviä riippuen tutkimuksen kohteesta ja mihin tekijään tai tekijöihin tutkimuksessa on haluttu keskittyä. Tärkein löydös on kuitenkin ollut Henriquesin ja Borowieckin (2014, 21) mukaan se, että energiaintensiteetti on ollut ainoa tekijä, joka on tähän mennessä vaikuttanut hiilidioksidipäästöihin laskevasti.

Pui ja Othman (2019) totesivat tutkimuksessaan, että kahden viime vuosikymmenen nopean globaalien talouskehityksen seurauksena energian kysynnän kasvu on myös kasvattanut hiilidioksidipäästöjä. He tutkivat päästöjä Malesiassa vuosina 2002-2016. Tulokset yksinkertaisuudessaan osoittivat taloudellisen toiminnan liittyvän aina hiilidi-

oksidipäästöihin, mutta tehokkaampi energiankäyttö ja vihreät valinnat tuotantopanoksissa auttaisivat hillitsemään päästöasteen nousua estämättä talouskasvua taloudellisesta rakenteesta riippumatta. Samaan tulokseen päätyivät tutkimuksessaan Henriques ja Borowiecki (2014) tutkimalla 12:ta kehittyneen maan hiilidioksidipäästöjä Kaya-hajotelmalla vuosina 1800-2011. He totesivat, että alhainen tulotaso ja fossiilisten polttoaineiden käyttö olivat tärkeimmät tekijät päästöjen kasvussa. Teknologinen muutos oli siis tärkein kompensoiva tekijä.

Tavakoli (2018) tutki neljää kasvihuonekaasupäästöjen taustatekijää 40 vuoden aikana kymmenen suurimman päästövähentäjän joukossa, hyödyntäen Kaya-hajotelmaa. Tutkimukseen mukaan otetut maat vastasivat 67% kaikista syntyneistä kasvihuonepäästöistä vuonna 2015. Tavakolin (2018) tutkimus osoitti, että tärkeimpien taustatekijöiden tunnistaminen ja tehokkuus päästöjen hallinnassa voivat pienentää hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen tarvittavaa vaivaa. Tästä syystä nopea kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen olisi asetettava etusijalle kansainvälisellä tasolla. Lisäksi yksittäisten muuttujien globaali arviointi tutkimuksessa osoitti, että väestö ja BKT asukasta kohden laskettuna kasvattavat päästöjä, kun taas energiantensiteetti laskee niitä. Väestön nähtiin olevan globaalisti tärkein selittäjä, jota energiantensiteetin paraneminen kompensoisi. Hiili-intensiteetin vaikutus verrattuna muihin tekijöihin on vähemmän merkittävä.

Lima, Nunes, Cunha ja Lucena (2016) etsivät tutkimuksessaan maiden välisiä tuloksia tärkeimmistä energiaan liittyvistä hiilidioksidipäästöjen aiheuttajista. Tutkittavina maina olivat Portugali, Yhdistynyt Kuningaskunta, Brasilia ja Kiina, joiden kaikkien polttoaineiden osuuksien osuutta hiilidioksidipäästöissä tutkittiin vuosina 1990-2010. Lähestymistapana käytettiin Kaya-hajotelmaa ja LMDI:tä (Logarithmic Mean Divisia Index). Tutkijat kertovat viitekehyksen auttaneen paljastamaan hiilidioksidipäästöjen ja ihmisen toiminnan välistä yhteyttä. Tärkeimmät tulokset tutkimuksessa olivat energiantensiteetin ja vaurauden vaikutus sekä uusiutuvien energialähteiden osuuden tärkeys päästövaikuttajissa. Tutkijat osoittivat myös välittömien energiapolitiittisten päättäjiä toimien tärkeyttä.

Duro & Padilla (2006) tutkivat tutkimuksessaan hiilidioksidipäästöjen epätasaista jakaantumista 114:ta maan otoksessa vuosina 1971-1990. He käyttivät tutkimuksessaan

myös Kaya-hajotelmaa, jota laajennettiin Theil-indeksillä, koska heidän tavoitteenaan oli kehittää sellainen mittari, jolla voitaisiin analysoida hiilidioksidipäästöjä maissa, maiden välillä sekä niiden sisällä ja juuri Theil-indeksi mahdollisti tämän tarkastelun. Tärkeimpänä tuloksena tutkimuksessaan, Duro ja Padilla (2006) pitivät taloudellisen kehityksen epätasaista jakautumista, jonka seurauksena hiilidioksidipäästöjä syntyy epätasaisesti.

Kaya-hajotelman soveltuvuutta erilaisiin tutkimuksiin tutkivat Mavromatidis, Orehou-nig, Richner ja Carmeliet (2014). He testasivat menetelmää rakennusalaan Sveitsissä ja hyödynsivät analyysissään Sveitsin vuoteen 2050 laadittua energiastrategiaa. Tarkoituksena oli tutkia Sveitsin energiajärjestelmää ja siitä aiheutuvia päästöjä, johon käytettiin Kaya-hajotelmaa sen joustavuuden takia. Tutkijat sovelsivat menetelmää, muuttamalla sitä paremmin kyseistä tutkimusta mittaavaan muotoon muun muassa poistamalla tulojen vaikutuksen ja korvaamalla sen lattian pinta-alalla. Tutkimus osoitti menetelmän sopivuuden tämänkin kaltaisiin tutkimuksiin.

Toinen tutkimus Kaya-hajotelman joustavuudesta ja sen muuntautumiskykyisyydestä tehtiin Wu et al. (2016) toimesta. Tutkimuksessa tutkittiin Kiinaa ja tarkoituksena oli ennustaa Kiinan hiilidioksidipäästöt vuoteen 2030 asti. Tutkimuksessa huomioitiin Kaya-hajotelman perinteisten taustatekijöiden lisäksi kaupungistuminen. Sen odotettiin tarjoavan parempia tuloksia kuin aikaisemmat tutkimukset ja Kaya-hajotelma modifioitui tämän ansiosta U-Kaya-hajotelmaksi. Kaupungistuminen haluttiin liittää juuri kyseiseen tutkimukseen, koska Kiinassa eri alueiden välillä on suuria eroja, joten oli hyödyllistä tutkia kaupungistumisen alueellisia eroja. Samalla poliittiset tekijät voitiin huomioida paremmin. Tuloksista ilmeni, että hiilidioksidipäästöjä pystytään Kiinassa hallitsemaan tietyssä määrin ja alhaisin päästökerroin Kiinassa tulisi olemaan vuonna 2020.

Taulukossa 2 on listattu aikaisempia tutkimuksia taulukon muodossa. Kaikissa tutkimuksissa tutkimuksen kohteena on ollut hiilidioksidipäästöt tai kasvihuonekaasupäästöt kokonaisuudessaan. Lisäksi kaikki tutkijat ovat käyttäneet tutkimuksissaan Kaya-hajotelmaa.

Taulukko 2. Aikaisempia tutkimuksia hiilidioksidipäästöistä

Kirjoittajat & vuosi	Maantieteellinen alue / Tutkimuksen kohde	Aikaväli	Päätulokset
Pui & Othman, 2019	Malesia	2002-2016	vihreät valinnat hillitsevät päästöjä taloudellisesta rakenteesta riippumatta
Tavakoli, 2018	10 suurinta päästövähentäjää	40 vuotta	väestö ja BKT kasvattavat päästöjä, energiantensiteetti laskee päästöjä
Lima, Nunes, Cunha & Lucena, 2016	Portugali, UK, Brasilia ja Kiina	1990-2010	energiaintensiteetin ja vaurauden vaikutus sekä uusiutuvien energialähteiden tärkeys päästövaikuttajissa
Henriques & Borowiecki, 2014	12 kehittynyttä maata	1800-2011	alhainen tulotaso ja fossiilisten polttoaineiden käyttö tärkeimmät selittäjät päästöjen kasvussa, teknologinen muutos tärkein kompensoiva tekijä
Duro & Padilla, 2006	114 maata	1971-1990	Tulojen epätasainen jakaantuminen pääaiheuttaja hiilidioksidipäästöissä

### 3. Tutkimusaineisto ja -menetelmät

Tässä luvussa tarkastellaan tilastollisin menetelmin saatavan analyysin perusteella Kaya-hajotelman taustatekijöiden vaikutuksia sekä eroja valituilla alueilla. Ensimmäisessä alaluvussa esitellään tutkimuksessa käytettävää aineistoa. Toinen alaluku kertoo yleisesti estimointimenetelmistä ja viimeisessä alaluvussa muodostetaan estimoitava yhtälö.



### **3.1. Aineisto**

Datan saatavuuden takia, aineisto rajattiin koskemaan vuosia 1970-2015. Tutkimuksessa käytettävä data on kerätty kahdesta eri avoimesta tilastolähteestä. Väkiluvut, energiankulutus ja BKT asukasta kohden saatiin Maailmanpankin (World Data Bank) tietokannasta ja hiilidioksidipäästöjen arvot kerättiin Global Carbon Atlas -tietokannasta. Maantieteellisiksi alueiksi valikoitui tutkimuksessa Länsi-Eurooppa ja Itä-Aasia kokonaisuudessaan. Länsi-Euroopan otoksesta jouduttiin jättämään pois Liechtenstein ja Monaco, koska niistä ei ollut tarpeeksi dataa saatavilla. Näin ollen lopullisen Länsi-Euroopan otoksen muodostavat Itävalta, Belgia, Ranska, Saksa, Luxembourg, Hollanti ja Sveitsi.

Myös Itä-Aasian otosta jouduttiin hieman muokkaamaan datan riittämättömyyden ja puuttuvien tietojen takia. Tarkastelusta jouduttiin jättämään pois Mongolia, Pohjois-Korea ja Taiwan, samoista syistä kuin Monaco ja Liechtensteinkin karsittiin. Koska Itä-Aasia olisi yksinään ollut liian pieni alue tarkasteltavaksi suhteutettuna Länsi-Euroopan otokseen, sitä laajennettiin ottamalla tarkasteluun mukaan muutama Kaakkois-Aasian maa. Lopullinen Aasian otos koostuu siis kahdeksasta eri Aasian valtiosta, jotka ovat Kiina, Japani, Etelä-Korea, Malesia, Thaimaa, Indonesia, Myanmar ja Filippiinit. Jatkossa tutkimuksessa Itä-Aasiasta käytetään nimeä Aasia.

Tarkastelussa malli jaettiin kahteen eri ryhmään valittujen maantieteellisten alueiden mukaan. Ensimmäisen ryhmään kuuluvat Länsi-Euroopan maat ja toiseen ryhmään Aasian maat. Tämän tarkempaa jaottelua ei tehty, koska alueita haluttiin tarkastella maantieteellisinä alueina. Tällä jaottelulla on pyritty tarkastelemaan kehittyneen Länsi-Euroopan ja kehittyvän Aasian välisiä eroja hiilidioksidipäästöissä sekä niiden aiheuttajissa.

#### **3.1.1. Muuttajat**

Hiilidioksidipäästöjen ja niiden taustatekijöiden tutkiminen oli olennainen tutkimuksen tavoite. Tarkemmin hiilidioksidipäästöjä tarkastellaan Kaya-hajotelmalla, jonka olen-

naiset muuttujat, niin kuin aikaisemmin on mainittu, ovat BKT, energiankulutus, väkiluku ja hiilidioksidipäästöt. Hiilidioksidipäästöjen yksikkönä on miljoona tonnia. Hiilidioksidipäästöistä käytetään nimeä *CO2paastot*. Selitettävästä muuttujasta, eli hiilidioksidipäästöistä, on otettu myös luonnollinen logaritmi, josta käytetään nimeä *In\_CO2paastot*.

BKT on muuttuja, joka kuuluu olennaisesti hiilidioksidipäästöjen taustatekijöihin. Sitä tarkastellaan asukasta kohti laskettuna, koska se on todistetusti parempi mittari kuin pelkkä BKT sellaisenaan. BKT on muuttujissa kuvattu vuoden 2010 dollareina. BKT asukasta kohden muuttujasta käytetään nimeä *BKTasuk*. Myös tästä muuttujasta on otettu luonnollinen logaritmi, jolloin kyseinen muuttuja tunnetaan nimellä *In\_BKTasuk*.

Toinen vaikuttava tekijä hiilidioksidipäästöihin on energiankulutus, jota tutkimuksessa on käytetty ja se on suhteutettu jokaisen maan BKT:hen, jolloin uudeksi muuttujaksi on saatu energiaintensiteetti. Energiankulutus on ilmoitettu öljyekvivalentteina kilogrammoissa asukasta kohden laskettuna. Energiaintensiteettiä kuvaavasta muuttujasta käytetään nimeä *energiaint*. Kun tästäkin muuttujasta otetaan luonnollinen logaritmi, nimeksi saadaan *In\_energiaint*.

Hiilidioksidipäästöt ovat suhteutettu energiankulutukseen, jolloin toiseksi uudeksi muuttujaksi saadaan hiili-intensiteetti. Hiili-intensiteettiä kuvaavat nimet ovat *hiili\_int* sekä *In\_hiili\_int*. Väkiluku on myös jokaisen maan osalta maan kokonaisväkiluku, jota kuvaa muuttuja *vakiluku*. Loogisesti myös tästä muuttujasta tehdään luonnollinen logaritmi, joka saa nimekseen *In\_vakiluku*. Muuttujien perustietoja on koottu taulukon muotoon liitteessä 1. Taulukkoon 3 on koottu muuttujien nimet, joita on käytetty Statassa.

Taulukko 3. Muuttujat Statassa

Kaavan muuttujat	Muuttujat Statassa	Logaritmiset muuttujat
C	CO2paastot	In_CO2paastot
cap	vakiluku	In_vakiluku
GDP/cap	BKTasuk	In_BKTasuk
E/GDP	energiaint	In_energiaint
C/E	hiili_int	In_hiili_int

### 3.1.2. Aineiston kuvailu

Tutkimuksessa käytettävä aineisto sisältää dataa 46 vuodelta 15 maan osalta. Se on siis paneelidata-aineisto, koska dataa on useasta yksiköstä eri vuosilta. Taulukkoon 4 on koottu valtioiden keskiarvoja tutkimuksessa käytettävistä tekijöistä. On huomiotava, että tulokset taulukossa 4 ovat keskiarvoja vuosilta 1970-2015, joten ne ovat suuntaa antavia.

Taulukko 4. Muuttujien keskiarvot maittain

Maa	Hiilidioksidipäästöt	Väkiluku	Energian kulutus	BKT / asukas
Itävalta	62.83	7 890 238	3352.70	35424.32
Belgia	119.60	10 196 469	4954.24	34147.82
Ranska	425.31	59 113 228	3746.02	32763.37
Saksa	960.69	80 153 911	4191.49	32851.70
Luxembourg	10.71	416 192	8941.85	71342.04
Hollanti	165.12	15 173 559	4557.32	38584.28
Sveitsi	42.37	6 953 300	3276.62	62653.94
Kiina	3721.19	1 142 764 022	986.58	1745.64
Japani	1094.98	121 751 109	3427.91	35539.18
Etelä-Korea	309.83	43 170 685	2787.03	11278.62
Malesia	98.64	19 755 812	1609.60	5647.31
Thaimaa	135.85	56 195 411	958.05	2924.67
Indonesia	227.95	187 493 581	578.47	1958.05
Myanmar	8.04	41 564 414	280.49	413.37
Filippiinit	54.56	66 893 054	455.80	1678.59

Kun tarkastellaan taulukkoa 4, huomataan, että hiilidioksidipäästöjen osalta Euroopassa ehdottomasti suurin päästöjen aiheuttaja on Saksa (960 miljoonaa tonnia) ja pienin Luxembourg (10.7 miljoonaa tonnia). Saksan nousu isoimmaksi saastuttajaksi Länsi-Euroopassa ei ole yllättävä, koska Saksan talous on maailman neljänneksi suurin markkinahinnoin laskettuna, jolloin energiankulutuskin on suuri ja päästöjä syntyy enemmän (OECD 2018). Myös väkiluku Saksassa on suurin Länsi-Euroopan maista, joka osaltaan vaikuttaa hiilidioksidipäästöjen korkeaan tasoon. Väkiluvuissa on paljon vaihtelua maiden välillä, mutta huomiotavaa kuitenkin on, että BKT asukasta kohden

laskettuna on melko tasaista. Sen sijaan energiankulutusta tarkasteltaessa Luxembourg sijoittuu Länsi-Euroopan kärkipäähän ja summa onkin yli kaksinkertainen verrattuna yksittäisten maiden keskiarvoon energiankulutuksessa.

Aasiassa Kiina erottuu varsin hyvin muiden joukosta. Siellä väkiluvun keskiarvo (1 142 764 022) on ehdottomasti korkein kuin myös hiilidioksidipäästöjen määrä (3721 miljoonaa tonnia). Kiinassa kuitenkin energiankulutus (986.58) on alhainen verrattuna Japanin (3427.91) ja Etelä-Korean (2787.03) arvoihin. Japanissa kulutetaan energiaa kolme kertaa enemmän kuin Kiinassa ja Etelä-Koreassa energian kulutus on 2.8-kertainen verrattuna Kiinaan. Etelä-Koreassa hiilidioksidipäästöjen määrä on kuitenkin suhteellisen pieni (309.83 miljoonaa tonnia), vaikka energian kulutuksen taso onkin korkea. Näin ollen Etelä-Korean energiarakenteen ja energianlähteiden voidaan olettaa olevan parempia kuin esimerkiksi Kiinassa, jossa käytetään paljon fossiilisia polttoaineita energianlähteinä. Myanmarissa kulutetaan kaikista maista vähiten energiaa (280.49), jolloin myös hiilidioksidipäästöt ovat vähäiset (8.04 miljoonaa tonnia).

Aikaisempien tutkimustulosten mukaan, Länsi-Euroopan ja Aasian hiilidioksidipäästöjen taustatekijät voivat erota paljonkin toisistaan ja se olisi myös toivottavaa tutkimusten tulosten kannalta. Eroavaisuuksiin vaikuttaa muun muassa jokaisen valtion erilaiset teknologiset ja taloudelliset rakenteet sekä niiden kehittyneisyyden aste. Euroopassa on tiukka ympäristöpolitiikka, johon myös Länsi-Euroopan valtiot ovat sitoutuneita, jolloin siellä päästöjä voidaan olettaa syntyvän vähemmän. Aasian kehittyneisyyden aste ei ole niin korkealla tasolla vielä kuin Euroopassa ja päästöjen hillitsemistä ei oteta niin tosissaan useissakaan Aasian valtioissa.

### 3.1.3. Muuttujien välinen korrelaatio

Korrelaatio kuvaa kahden muuttujan välistä riippuvuutta, johon myös regressioanalyysi perustuu. Korrelaatiokerroin voi saada arvoja  $-1:n$  ja  $+1:n$  välillä. Mitä suurempi korrelaatiokertoimen itseisarvo on, sitä enemmän muuttujien välillä on yhteyttä. Kertoimen etumerkki kertoo riippuvuussuhteen suunnan. (Hill et al. 2018, 773) Mikäli korrelaatio on suurta selittävien muuttujien välillä, se voi aiheuttaa ongelmia tulosten tarkkuudessa. Tätä ongelmaa kutsutaan multikollineaarisuusongelmaksi. Multikollineaarisuus

saattaa hankaloittaa regressiomallin estimointia ja tilastollista päättelyä. (Mellin 2006, 402-403) Jos korrelaatiokerroin on esimerkiksi yli 0.9 muuttujien välillä, kyseessä saattaa olla multikollineaarisuusongelma (KvantiMOTV 2003).

Muuttujien väliset korrelaatiot on esitetty erikseen Aasian ja Länsi-Euroopan osalta liitteissä 3 ja 4 ilman logaritimuunnoksia. Kummassakin maanosassa selittävien muuttujien korrelaatiot ovat lähestulkoon saman suuntaisia, ja niissä ei esiinny multikollineaarisuutta lähes kaikkien kertoimien ollessa alle 0.9. Länsi-Euroopan otoksessa väkiluku korreloi kuitenkin melko voimakkaasti hiilidioksidipäästöjen kanssa (0.948). Korrelaatio on selitettävissä väkiluvun voimakkaalla vaikutuksella hiilidioksidipäästöjen määrään, jolloin niiden välillä on suora verrannollisuus. Aasian otoksessa suurin korrelaatio on energiankulutuksen ja BKT asukasta kohden välillä, lähes 0.85. Tämä voisi kertoa siitä, että talouskasvu vaikuttaa suoraan käytettävän energian määrään.

Taulukossa 5 on esitetty Aasian otoksen logaritmisten muuttujien korrelaatiomatriisi, josta huomataan, että BKT asukasta kohden korreloi voimakkaasti energiantensiteetin kanssa (-0.8779). Tämä oli kuitenkin odotettavissa, koska energiantensiteetti on energiankulutuksen suhde BKT:n, joten energiantensiteetin sama arvo riippuu suoraan BKT:n saamasta arvosta. On siis loogista, että energiantensiteetti ja BKT asukasta kohden korreloivat keskenään. Miinusmerkkinen kerroin kertoo myös siitä, että BKT:n kasvaessa, energiantensiteetti laskee. Myös hiili-intensiteetti ja väkiluku korreloivat voimakkaasti toistensa kanssa (0.9405). Hiilidioksidipäästöjen ja hiili-intensiteetin välillä on myös korkea korrelaatio (0.8851). Korrelaatio oli odotettavissa, koska hiili-intensiteetti on hiilidioksidipäästöjen suhde energiankulutukseen.

Hiili-intensiteetin ja väkiluvun korkea korrelaatio voidaan havaita myös Länsi-Euroopan osalta, jonka logaritmisten muuttujien korrelaatiomatriisi on esitetty taulukossa 6. Länsi-Euroopan otoksessa hiili-intensiteetin ja väkiluvun korrelaatiokerroin (0.9916) on isompi kuin Aasian otoksessa. Niin kuin Aasian otoksessa, hiili-intensiteetti korreloi hiilidioksidipäästöjen kanssa myös Länsi-Euroopan otoksessa. Korrelaatio kyseisten muuttujien välillä (0.9815) on korkeampi Länsi-Euroopan otoksessa kuin Aasian otoksessa. Korrelaatio tässäkin oli odotettavissa samasta syystä kuin Aasian otoksessakin.

Hiili-intensiteetin ja väkiluvun korkea korrelaatio voi riippua monesta tekijästä. Kun tarkastellaan Aasiaa ja Länsi-Eurooppa erikseen väkiluvun ja hiili-intensiteetin osalta (liitteet 5 ja 6) huomataan, että Länsi-Euroopassa väkiluvultaan suurin valtio on Saksa, jolla on myös korkein hiili-intensiteetti. Aasian otoksessa korkein väkiluku ja hiili-intensiteetti on Kiinalla.

Taulukko 5. Aasian otoksen korrelaatiomatriisi logaritmisilla muuttujilla

<b>AASIA</b>	In_CO2paastot	In_vakiluku	In_energiaint	In_hiili_int	In_BKTasuk
In_CO2paastot	1				
In_vakiluku	0.7303	1			
In_energiaint	-0.2894	0.2225	1		
In_hiili_int	0.8851	0.9405	0.0134	1	
In_BKTasuk	0.5633	-0.0860	-0.8779	0.1573	1

Aasiassa väkiluvut ovat korkeampia kuin Länsi-Euroopassa, ja Aasian otoksesta muiden joukosta erottuukin Kiina, jolla on suurin väkiluku. Toiseksi suurin väkiluku on Indonesialla, jolla myös hiili-intensiteetin arvo vuodelta 2014 on toiseksi korkein. (Liitteet 5 ja 6) Väkiluvun ja hiili-intensiteetin korkean korrelaation taustalla voisi olla kaupungistuminen, jolla näyttäisi olevan positiivinen yhteys energiankulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin. Hiili-intensiteetti on hiilidioksidipäästöjen suhde energiankulutukseen, joten korrelaatio on näin ollen ilmeinen. Korkealla väestötiheydellä on kuitenkin nähty olevan alhaisempi vaikutus energian kulutuksen tasoon ja päästöihin. (Liddle 2014, 286)

Taulukko 6. Länsi-Euroopan korrelaatiomatriisi logaritmisilla muuttujilla

<b>LÄNSI-EUROOPPA</b>	In_CO2paastot	In_vakiluku	In_energiaint	In_hiili_int	In_BKTasuk
In_CO2paastot	1				
In_vakiluku	0.9631	1			
In_energiaint	0.2288	0.0194	1		
In_hiili_int	0.9815	0.9916	0.1037	1	
In_BKTasuk	-0.6188	-0.5693	-0.6561	-0.6265	1

Länsi-Euroopan osalta korrelaatio väkiluvun ja hiili-intensiteetin välillä on vielä korkeampi kuin Aasian otoksessa. Länsi-Euroopassa kehittyneisyyden tason voitaisiin olettaa kertovan myös korkeammasta kaupungistumisen asteesta, jolloin kertoimen voidaankin olettaa olevan isompi. Muiden demograafisten tekijöiden lisäämisellä mallin voitaisiin yhteyttä väkiluvun ja hiili-intensiteetin välillä selittää paremmin.

Estimoitavassa mallissa, joissa selittävinä tekijöinä ovat hiili-intensiteetti sekä väkiluku, voi esiintyä multikollineaarisuusongelmaa, jolloin tulokset ovat harhaanjohtavat. Sama tapahtuu, kun selittävänä muuttujana on BKT asukasta kohden, joka korreloi energiantensiteetin kanssa. Multikollineaarisuusongelman seurauksena voi olla vaikeaa havaita kyseisten muuttujien yksilöllisiä vaikutuksia selitettävään muuttujaan. Tutkimuksessa päädyttiin jättämään pois sekä väkiluku että BKT asukasta kohti, koska ne eivät tuottaisi raportoitavia tuloksia ja aiheuttaisivat muutenkin ongelmia tulosten tarkkuuden osalta. Näin ollen mallissa selittävinä muuttujina ovat ainoastaan energia- ja hiili-intensiteetti. Vaikka yhtenä tutkimuskysymyksenä oli tutkia Kaya-hajotelma taustatekijöiden eroavaisuuksia valituilla alueilla, voidaan havainnot väkiluvusta ja BKT:sta tehdä aikaisempien tutkimusten pohjalta. Estimoitavassa mallissa keskitytään siis energia- ja hiili-intensiteetin vaikutuksiin hiilidioksidipäästöissä.

### **3.2. Paneelidatan estimointimenetelmät**

Paneelidata koostuu poikkileikkausyksiköiden satunnaisotannasta, joita on tarkkailtu monena eri ajankohtana. Paneelidatassa on aikasarja- että poikkileikkausaineistolle tyypillisiä elementtejä. Paneelidataa käyttämällä, tutkimuksessa voidaan tutkia dynaamisista sopeutumista, politiikkamuutosten vaikutuksia ja näiden lisäksi huomioida yksikökohtaiset erot eli heterogeisuus. (Hill, Griffiths & Lim 2018, 635) Aikasarjojen ja poikkileikkaustietojen kanssa työskenneltäessä tarvitaan paneelidataan perustuvaa lähestymistapaa. (Cicea, Marinescu, Popa & Doprin 2014, 555). Näin ollen tutkimuksesta saadaan kattavampi kuva ja enemmän tietoa, kun tutkimustapa on moniulotteisempi verrattuna pelkkään aikasarja- tai poikkileikkausaineistoon. Tämän kaltainen lähestymistapa sallii myös monimutkaisempien yhteyksien analyysin. Paneelidatan avulla Kaya-hajotelmaan liittyvien taustatekijöiden laajempi tarkastelu on mahdollista.

Paneelidata luokitellaan tyypillisesti kolmeen eri kategoriaan sen mukaan, millaista aineistoa käytetään. Hill et al. (2018, 635) mukaan aineisto voi olla pitkä ja kapea, lyhyt ja leveä tai pitkä ja leveä. ”Pitkässä ja kapeassa” aineistossa tarkastelujakso on pitkä ja tarkasteltavien yksiköiden määrä pieni. ”Lyhyessä ja leveässä” aineistossa havaittuja yksiköitä on paljon, mutta tarkastelujakso sen sijaan suhteellisen lyhyt. ”Pitkässä ja leveässä” aineistossa sekä tarkasteluväli että poikkileikkausyksiköiden määrä ovat suuria.

Paneeliaineiston estimointimenetelmiä on erilaisia, esimerkiksi pienimmän neliösumman menetelmä (Pooled OLS), kiinteiden vaikutusten malli (Fixed Effects model, FE) sekä satunnaisten vaikutusten malli (Random Effects model, RE). Jos mallissa ei esiinny yksilöllisiä eroja, voidaan Pooled OLS -mallia, jota kutsutaan myös yhdistetyksi OLS malliksi, käyttää tutkimuksen estimoinnissa. (Koop 2008, 256) Tällöin estimoitava yhtälö olisi muotoa (kaava 2):

$$y_{it} = \alpha + \beta x_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

Paneeliaineiston tapauksessa sitä on kuitenkin epäkäytännöllistä käyttää, koska usein muuttujien välillä esiintyy yksikkökohtaisia eroja. Mallit, jotka huomioivat yksikkökohtaisia eroja, ovat kiinteiden vaikutusten malli sekä satunnaisten vaikutusten malli. (Koop 2008, 255)

Kiinteiden vaikutusten mallia käytetään, kun ollaan kiinnostuneita ajassa muuttuvien muuttujien vaikutuksesta esimerkiksi johonkin havaintoyksikköön. Malli tutkii selitettävän ja selittävien muuttujien välistä suhdetta, kun otetaan huomioon myös kiinteät yksikkövaikutukset. Malli olettaa, että poikkileikkausyksikössä voi olla sellaisia yksilöllisiä piirteitä, jotka vaikuttavat selitettävään muuttujaan, joten ne tulee huomioida mallissa. Kiinteiden vaikutusten malli kontrolloi näiden ajassa muuttumattomien piirteiden vaikutukset, jotta tuloksissa voidaan keskittyä selittäviin muuttujiin, jotka vaikuttavat mallin selitettävään muuttujaan ajan kuluessa. Malli sallii korrelaation kiinteiden tekijöiden ja mallin muiden selittävien tekijöiden välillä, mutta sen sijaan mallin virhetermit eivät saisi korreloida keskenään eivätkä selittävän muuttujan kanssa. (Torres-Reyna 2007, 9) Kun kiinteiden vaikutusten mallia käytetään estimoinnissa, yhtälö on usein seuraavaa muotoa (kaava 3):



$$y_{it} = \beta_{1i} + \beta_2 x_{2it} + \beta_3 x_{3it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

Missä  $\varepsilon_{it}$  riippumattomia,  $E(\varepsilon_{it}) = 0$  ja  $\text{var}(\varepsilon_{it}) = \sigma_e^2$ . Vain vakiotermin  $\beta_{1i}$  vaihtelee yksiköiden välillä muttei kuitenkaan yli ajan. Lisäksi vakiotermin ilmentää kaikkia eroja yksiköiden välillä. (Hill et al. 2018, 640)

Kiinteiden vaikutusten mallissa hyvänä puolena pidetään sen kykyä eliminoida heterogeenisuus, jolloin mahdollista endogeenisuusongelmaa ei esiinny. Endogeenisuusongelma voisi aiheutua, jos ei-havaitun heterogeenisuuden ja selittävien muuttujien välillä olisi korrelaatio. (Hill et al. 2018, 651) Toisaalta huonona puolena kiinteiden vaikutusten mallissa voidaan pitää sitä, että siihen ei voida ottaa mukaan yli ajan vakiona säilyviä muuttujia (Hill et al. 2018, 637). Kiinteiden vaikutusten malli on paljon käytetty tutkijoiden joukossa, koska sitä käytettäessä vältytään juurikin endogeenisuusongelmalta.

Satunnaisten vaikutusten mallissa oletuksena on, että vaihtelu yksiköiden välillä on satunnaista ja riippumatonta. Mallia käytetään, jos on syytä epäillä, että yksiköiden väliset satunnaiset erot vaikuttavat selitettävään muuttujaan. Satunnaisten vaikutusten mallin etuna on, että analyysiin voidaan sisällyttää ajassa vakiona säilyviä muuttujia, joita on esimerkiksi sukupuoli. Etuna mallissa verrattuna kiinteiden vaikutusten malliin on myös se, että analyysin tuloksia voidaan yleistää otannan ulkopuolelle. (Torres-Reyna 2007, 25-26) Satunnaisten vaikutusten malli on usein seuraavassa muodossa (kaava 4):

$$y_{it} = \beta_{1i} + \beta_2 x_{2it} + \beta_3 x_{3it} + v_{it} \quad (4)$$

Missä  $i = 1, \dots, N$  ja  $v_{it} = u_i + \varepsilon_{it}$ . Tilastollinen tarkastelu kohdistuu koko populaatioon. Vakiotermin  $\beta_{1i}$  on satunnainen ja  $u_i$  on satunnainen virhetermi, joka vastaa eroista yksiköiden välillä. Lisäksi  $u_i$ :t ovat riippumattomia toisistaan ja  $\varepsilon_{it}$ :stä.  $E(u_i) = 0$  ja  $\text{var}(u_i) = \sigma_u^2$ . (Hill et al. 2018, 651-652)

Satunnaisten vaikutusten mallia kutsutaan joskus myös virhekomponenttimalliksi (Error Components model), jonka mukaan residuaali  $v_{it}$  koostuu yksikkökohtaisesta

osasta  $u_i$ , ja yleisestä residuaalista  $\varepsilon_{it}$ . Satunnaisten vaikutusten mallissa on olennaista, että eri yksiköiden residuaalit eivät ole korreloituneet keskenään eikä eri yksiköiden välillä eri ajankohtina ole korrelaatiota. Sen sijaan saman yksikön eri ajankohtina residuaalit ovat korreloituneet keskenään. Satunnaisten vaikutusten mallin tärkein piirre on kuitenkin korrelaation suuruus. Mallissa olennaista on tutkia myös heterogeenisuutta ja jos  $u_i$  jokaiselle yksikölle on nolla ( $u_i = 0$ ), ei yksiköiden välillä ole heterogeenisuutta. (Hill et al. 2018, 647-649) Tällaisessa tilanteessa satunnaisten vaikutusten mallista ei ole hyötyä ja näin ollen voitaisiin käyttää Pooled OLS -mallia.

Satunnaisten vaikutusten malli kärsii valitettavan usein endogeenisuusongelmasta, jolloin menetelmää ei ole suotavaa käyttää. Tässä tilanteessa residuaali  $v_{it}$  korreloi jonkin selittävän muuttujan kanssa, mikä aiheuttaa kyseisen ongelman. Endogeenisuutta satunnaisten vaikutusten mallissa tutkitaan Hausman-testillä (Hausman Test), joka on ehdoton testi kyseisen ongelman tutkimiseksi. Hausman-testissä nollahypoteesina on, että kiinteiden ja satunnaisten vaikutusten mallien kertoimissa ei ole eroja, ja mikäli se hylätään, ei satunnaisten vaikutusten mallia saada käyttää, joten tulokset tulee raportoida kiinteiden vaikutusten mallilla. Kiinteiden vaikutusten mallissa endogeenisuusongelmaa ei esiinny, koska se eliminoi vakiona yli ajan säilyvät selittäjät ja satunnaisvaikutuksen  $u_i$ . (Hill et al. 2018, 655)

Endogeenisuuden lisäksi paneelidata-aineistossa on tärkeä tutkia mallin heterogeenisuus ja yksikkökohtaiset erot. Yksikkökohtaisten erojen tutkimisessa hyödynnetään F-testiä, kun estimoidaan kiinteiden vaikutusten estimaattorilla. F-testi vertaa kiinteiden vaikutusten mallia suhteessa Pooled OLS malliin. Jos mallissa nollahypoteesi hylätään, kannattaa käyttää kiinteiden vaikutusten mallia mieluummin kuin Pooled OLS mallia, koska tällöin maiden välillä on yksikkökohtaisia eroja. Heterogeenisuutta tutkitaan Breusch-Pagan testillä, joka tarkastelee, onko mallissa satunnaisia vaikutuksia. Mikäli nollahypoteesi hylätään ja satunnaisia vaikutuksia on, kannattaa estimoinnissa myös huomioida satunnaisten vaikutusten olemassaolo ja käyttää satunnaisten vaikutusten estimaattoria mieluummin kuin Pooled OLS mallia. Hausman-testi toimii endogeenisuuden selvittämisessä apuna. Mikäli endogeenisuutta on, nollahypoteesi hylätään ja tulee tulokset raportoida kiinteiden vaikutusten mallilla, koska satunnaisten vaikutusten malli ei ole tällöin konsistentti. (Hill et al. 2018, 661) Näiden kolmen eri testin avulla määräytyy aineistolle sopivin estimointimenetelmä.

Analyysin ja datan ominaisuuksien syvällisyyttä voidaan laajentaa huomioimalla auto-korrelaatiota ja heteroskedastisuutta klusterirobustien keskivirheiden avulla. Klusterirobustit keskivirheet huomioivat sen, että paneeliaineisto sisältää dataa samoista yksiköistä useilta ajankohdilta. Tyypillisesti samaa yksikköä koskevissa havainnoissa on myös riippuvuutta, jonka klusterirobustit keskivirheet huomioivat. Menetelmässä havaintoryhmiä käsitellään klusterina ja tuloksissa huomioi keskittyä ryhmien sisäiseen korrelaatioon eli *within* vaihteluun. *Within* muunnos poistaa ei-havaitun heterogeenisuuden siten, että jäljelle jää vain idiosynkraattinen virhe  $e_{it}$ . (Hill et al. 2018, 650)

### 3.3. Estimoitava malli

Tutkimuksessa sovelletaan Kaya-hajotelman yhtälöä. Kun alkuperäisestä yhtälöstä (kaava 1) otetaan logaritmit kaikista muuttujista, saadaan estimoitavaksi yhtälöksi seuraava (kaava 6):

$$\ln_{CO2paastot_{it}} = \beta_0 + \beta_1 \ln_{vakiluku_{it}} + \beta_2 \ln_{BKTasuk_{it}} + \beta_3 \ln_{_energiaint_{it}} + \beta_4 \ln_{hiili_{int_{it}}} \quad (6)$$

Korkeiden korrelaatioiden ja multikollineaarisuusongelman vuoksi estimoitavassa mallissa on huomioitu kuitenkin vain energia- ja hiili-intensiteetti selittävinä tekijöinä. Lopulliseksi estimoitavaksi yhtälöksi muodostuu näin ollen seuraava (kaava 7):

$$\ln_{CO2_{paastot_{it}} = \beta_0 + \beta_1 \ln_{_energiaint_{it}} + \beta_2 \ln_{_hiili_{int_{it}} + \varepsilon_{it}} \quad (7)$$

Kaikki mallin muuttujat ovat tutkimuksessa logaritmisessa muodossa, jolloin niitä tulkitaan prosentuaalisina vaihteluina tekijöiden välillä. Logaritmisten muuttujien edessä on lyhenne *ln*, joka tarkoittaa luonnollista logaritmia. Muuttujan koodaaminen logaritmiseksi tehdään usein sen vuoksi, että muuttujan residuaalista saataisiin enemmän

normaalijakautuneempi (Koop 2008, 343) Koopin mielestä (2008, 335) juurikin luonnolliset logaritmiset muunnokset ovat ekonometrisissa malleissa yleisiä, joten siksi niitä käytetään myös tässä tutkimuksessa.

Mallissa energiaintensiteetin etumerkin odotetaan olevan positiivinen molempien maanosien osalta. Sen oletetaan kuitenkin olevan pienempi Länsi-Euroopassa kuin Aasiassa. Tähän vaikuttaa Länsi-Euroopan korkea talouden taso, jolloin teknologian voidaan olettaa olevan tehokkaampaa, jolloin tehokkaampi energiarakenne kasvattaa päästöjä vähemmän kuin Aasian maissa. Aasiassa siis päästöjen odotetaan kasvavan enemmän, koska energian lähteet ovat saastuttavampia.

Hiili-intensiteetin oletetaan olevan etumerkiltään myös positiivinen, kummassakin maanosassa. Tämä kertoisi siitä, että hiili-intensiteetin kasvu aiheuttaa hiilidioksidipäästöjen kasvua, jolloin muuttujien välinen suhde olisi ylöspäin nousevan suoran muotoinen. Länsi-Euroopan otoksessa hiili-intensiteetin saaman kertoimen voidaan olettaa olevan pienempi kuin Aasian otoksessa. Näin ollen hiili-intensiteetin vaikutus hiilidioksidipäästöjen kasvuun olisi korkeampi Aasian maissa kuin Länsi-Euroopassa.

## **4. Tulokset**

Tässä luvussa käsitellään tutkimuksen tuottamia tuloksia. Ensiksi valitaan estimointimenetelmä F-testin, Breusch-Pagan testin ja Hausman-testin perusteella. Toisessa alaluvussa raportoidaan estimoinnin tuottamat tulokset ja lopuksi saatujen tulosten perusteella pyritään vastaamaan tutkimuskysymyksiin.

### **4.1. *Estimointimenetelmän valinta***

Tutkimus tehdään käyttäen StataSE 16-ohjelmistoa. Ensimmäiseksi aineistolle valitaan sopivin estimointimenetelmä F-testin, Breusch-Pagan testin ja Hausman-testin tulosten perusteella. Kaikkien testien tulokset on esitetty taulukossa 7. Testien p-arvoa verrataan jokaisen testin osalta valittuun riskitasoon, joka on 5 prosenttia, jolloin testin nollahypoteesi joko hyväksytään tai hylätään.

Taulukko 7. F-testin, Breusch-Pagan testin ja Hausman testin tulokset

	AASIA		EUROOPPA	
riskitaso 5%	p-arvo		p-arvo	
F-testi	0.0000	H0 hylätään	0.0000	H0 hylätään
Breusch-Pagan	0.0000	H0 hylätään	0.0000	H0 hylätään
Hausman	0.0000	H0 hylätään	0.0000	H0 hylätään

Kummankin maanosan kohdalla kaikkien kolmen testin nollahypoteesit hylätään eli p-arvot ovat pienempiä kuin valittu riskitaso. Myös yhden prosentin riskitasolla kaikkien testien nollahypoteesit hylättäisiin, koska p-arvo on tällöinkin pienempi kuin riskitaso (0.01). F-testin perusteella mallien kertoimet ovat eri eli maiden välillä on eroja, joten tulokset kannattaisi raportoida kiinteiden vaikutusten estimaattorilla enemmän kuin Pooled OLS -estimaattorilla. Tutkimuksessa käytettävä aineisto on Breusch-Pagan testin perusteella heterogeeninen, jolloin Pooled OLS menetelmä ei ole paras vaihtoehto estimointimenetelmäksi, koska aineisto sisältää yksikkökohtaisia eroja. Tässä tilanteessa voitaisiin olettaa, että satunnaisten vaikutusten estimaattori olisi paras valinta, koska malli sisältää yksikkökohtaisia eroja. Sen avulla pystyttäisiin hyödyntämään enemmän informaatiota, jolloin saataisiin parempia tuloksia. Hausman-testin tulos kuitenkin paljastaa, että satunnaisten vaikutusten menetelmää ei saa käyttää, koska kiinteiden ja satunnaisten vaikutusten mallien kertoimet eroavat toisistaan. Satunnaisten vaikutusten mallissa on siis endogeenisuusongelma, joten kertoimet eivät ole konsistenttejä. Tulokset päädytään siis raportoimaan kiinteiden vaikutusten mallilla, joten endogeenisuusongelmalta vältytään.

Erityisesti kun paneelidatassa samasta yksiköstä on havaintoja eri periodeilta, kannattaisi tutkimuksessa käyttää robusteja keskivirheitä, koska saman yksikön havainnot ovat usein yhteydessä toisiinsa. Näin ollen kiinteiden vaikutusten mallin tulosten lisäksi tutkimuksessa päädyttiin raportoimaan malli, joka huomioi klusterirobustit keskivirheet. Testien tulokset on koottu taulukkoon 8.

Taulukko 8. Malli klusterirobusteilla keskivirheillä

	AASIA		EUROOPPA	
riskitaso 5%	p-arvo		p-arvo	
Breusch-Pagan	0.0000	H0 hylätään	0.0000	H0 hylätään
Sargan-Hansen	0.0494	H0 hylätään	0.0000	H0 hylätään

Taulukosta 8 huomataan, että F-testiä ei ole saatavilla klusterirobusteille keskivirheille, koska se on liian monimutkainen toteuttaa, kun mallissa huomioidaan robustit keskivirheet. Aikaisempien F-testien tulosten perusteella voidaan kuitenkin olettaa, että molempien maanosien osalta F-testit hylätään, jolloin valitaan joko kiinteiden vaikutusten malli tai satunnaisten vaikutusten malli. Breusch-Pagan testit hylätään molempien maanosien osalta, joten satunnaisia vaikutuksia on ja estimointimenetelmänä kannattaa käyttää satunnaisten vaikutusten mallia klusterirobusteilla keskivirheillä. Myöskään Hausman-testiä ei ole saatavissa malleille, joissa käytetään robusteja keskivirheitä. Hausman-testiä vastaavalla regressiopohjaisella Sargan-Hansen testillä voidaan kuitenkin tutkia, että käytetäänkö kiinteiden vai satunnaisten vaikutusten mallia. Sekä Aasian että Länsi-Euroopan otoksessa nollahypoteesi hylätään viiden prosentin riskitasolla, joten raportoidaan kiinteiden vaikutusten mallin klusterirobustien keskivirheiden tuottamat tulokset.

#### 4.2. Estimoinnin tulokset

Saadut tulokset ovat kerätty taulukkoon 9. Kummankin maanosan osalta esitetään kiinteiden vaikutusten mallin tulokset. Taulukossa on raportoitu selittävien muuttujien kertoimet kummankin maanosan osalta. Suluissa on p-arvo kullekin muuttujalle, joka kertoo muuttujan merkitsevyyden mallissa. Klusterirobustien keskivirheiden malli on raportoitu liitteessä 7. Sen tuottamat tulokset eivät eronneet kiinteiden vaikutusten mallin tuottamista tuloksista, joten tutkimuksessa keskitytään vain FE-mallin tulosten raportointiin.

Kummankin maanosan osalta hiili-intensiteetti on tilastollisesti merkitsevä 5%:n riskitasolla, kun taas energiaintensiteetti on tilastollisesti merkitsevä vain Länsi-Euroopan

otoksessa. Molempien selittävien muuttujien kertoimet ovat positiiviset niin kuin odotettiin. Länsi-Euroopan osalta energiaintensiteetti on melko lähellä nollaa (0.12) ja tilastollisesti merkitsevä, joten voidaan todeta, että Länsi-Euroopassa päästöt kasvavat vain vähän, kun energiaintensiteetti kasvaa. Mitä isompi energiaintensiteetin saama arvo on, sen enemmän hiilidioksidipäästöt myös kasvavat.

Hiili-intensiteetti (0.41) Länsi-Euroopassa on myös tilastollisesti merkitsevä, joten mitä enemmän hiili-intensiteetti kasvaa, sitä enemmän päästöjä syntyy. Näin ollen Länsi-Euroopan osalta, maiden kannattaa keskittyä yhä enemmän paremman teknologian hyödyntämiseen, jotta päästöjä saataisiin vähennettyä yhä enemmän. Energiaintensiteettiin vaikuttaa energian kulutus ja BKT asukasta kohden, joten huomiota olisi syytä kiinnittää myös näihin tekijöihin, kun taas hiili-intensiteetin osalta hiilidioksidipäästöjen taso vaikuttaa suoraan muuttujan saamaan arvoon.

Aasian otoksessa energiaintensiteetin saama arvo (0.06) on alhaisempi kuin Länsi-Euroopan otoksessa, mutta ei kuitenkaan tilastollisesti merkitsevä. Aasiassa energiaintensiteetin kasvu kasvattaa myös hiilidioksidipäästöjä, mutta koska se ei ole mallissa tilastollisesti merkitsevä, Aasiassa ei olla vielä sillä tasolla, jossa teknologian taso auttaisi vähentämään päästöjä merkittävästi. Hiili-intensiteetti on kuitenkin tilastollisesti merkitsevä, joten hiili-intensiteetin kasvaessa myös hiilidioksidipäästöt kasvavat. Verrattuna Länsi-Eurooppaan, Aasiassa hiili-intensiteetin kasvu kasvattaa hiilidioksidipäästöjä neljä kertaa enemmän kuin Länsi-Euroopassa, josta voidaan todeta Aasian todella korkea hiilidioksidipäästöjen taso.

Taulukko 9. Kiinteiden vaikutusten mallin tulokset

Muuttuja	Aasia (FE)	Länsi-Eurooppa (FE)
ln_energiaint	0.06 (0.407)	0.12 (0.000)
ln_hiili_int	1.82 (0.000)	0.41 (0.000)
_cons	8.37 (0.000)	6.50 (0.000)
R-sq: within	0.69	0.26
R-sq: between	0.80	0.98
R-sq: overall	0.77	0.98

Tutkimuksen toinen alakysymys oli *”Miten Kaya-hajotelman taustatekijät eroavat kehittyneemmällä alueella verrattuna kehittyvään alueeseen?”*. Tutkimuksen tuloksista voidaan todeta, että energiantensiteetin vaikutus on merkittävämpi tekijä hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä kehittyneemmillä alueella kuin kehittyvillä alueilla. Tämä tulos puoltaa myös Tavakolin (2018, 257) löydöksiä, jotka osoittivat sen, että energiantensiteetin vaikutus on kriittisempi kehittyneemmissä valtioissa. Energiantensiteetillä on ollut myös alentava vaikutus päästöjen tasoon vuosina 1970-2015. Myös hiilintensiteetin vaikutus on merkittävä tekijä hiilidioksidipäästöissä ja se saa isompia arvoja vasta kehittyvässä vaiheessa olevissa maissa, joissa hiilidioksidipäästöjen määrä on suurempi. Näin saadaan myös vastaus tutkimuksen ensimmäiseen alatutkimuskysymykseen, joka on *”Mitkä ovat tärkeimmät selittäjät hiilidioksidipäästöissä valituilla alueilla?”*. Tärkein selittäjä molempien maanosien osalta on hiili-intensiteetti. Sen kasvu kasvattaa hiilidioksidipäästöjä kaikissa tilanteissa. Kasvu on kuitenkin riippuvaista kehittyneisyyden tasosta. Jos valtiot voivat hyödyntää parempaa teknologiaa ja ympäristöystävällisempiä energianlähteitä, päästöt kasvavat vähemmän suhteessa tilanteeseen, jossa energianlähteenä käytetään muun muassa fossiilisia polttoaineita, jolloin päästöt kasvavat enemmän.

Aikaisempien tutkimusten mukaan väestönkasvun ja väkiluvun on nähty olevan globaalisti tärkeä selittäjä hiilidioksidipäästöissä, joten tässä tutkimuksessa voidaan myös yleistää, että väkiluvulla on vaikutusta päästöjen kasvuun. Esimerkiksi Kiinan tapauksessa korkea väkiluku tarkoittaa korkeampaa hiilidioksidipäästöjen tasoa. Myös BKT:n kasvu kasvattaa päästöjä siihen asti, että parempaa teknologiaa otetaan käyttöön ja energianlähteinä käytetään ympäristöystävällisempiä valintoja. Vihreiden valintojen tärkeys korostuu ja ne hillitsevät päästöjä taloudellisesta rakenteesta riippumatta. Kaya-hajotelman oletukset siis toteutuvat tässä tutkimuksessa.

## **5. Johtopäätökset**

Hiilidioksidipäästöjen ja ihmisen toiminnan välistä suhdetta on pyritty tutkimaan paljon ja useat tutkijat ovat osoittaneet suhteen näiden välillä. Ilmastonmuutosta aiheuttavien



hiilidioksidipäästöjen voidaan sanoa aiheutuvan suurelta osin ihmisen toiminnasta. Ilmastoa voidaan pitää julkishyödykkeenä, jolloin esiintyy vapaamatkustajan ongelma sekä ulkoisvaikutuksia.

Tässä tutkimuksessa tutkittiin hiilidioksidipäästöjen taustatekijöiden vaikutuksia pitkälle kehittyneessä Länsi-Euroopassa ja kehittyvässä Itä-Aasiassa. Itä-Aasian otosta laajennettiin ottamalla mukaan muutama Kaakkois-Aasian maa. Myös Euroopan otosta muokattiin datan saatavuuden takia. Tutkimuksessa on tarkasteltu hiilidioksidipäästöjen taustatekijöitä Kaya-hajotelman avulla, joka käsittää neljä tekijää, jotka ovat hiilidioksidipäästöt, väkiluku, energiankulutus ja BKT. Lisäksi tutkimus toteutettiin paneelidatalla ja estimointimenetelmäksi valikoitui kiinteiden vaikutusten malli.

Tulokset osoittivat hiilidioksidipäästöjen ja energiantensiteetin positiivisen yhteyden. Energiaintensiteetin kertoimen oletettiin olevan positiivinen. Länsi-Euroopassa yhteys oli tilastollisesti merkitsevä 5%:n riskitasolla, kun taas Aasiassa tilastollista merkitsevyyttä ei löytynyt. Energiaintensiteetin kasvu siis kasvattaa hiilidioksidipäästöjä, mutta muun muassa energiarakenne, kehittyneisyyden taso ja teknologia vaikuttavat ratkaisevasti, kuinka paljon päästöjä syntyy. Vuosina 1970-2015 energiantensiteetti on siis vaikuttanut päästöihin laskevasti Länsi-Euroopan osalta, mutta Aasiassa energiantensiteetti ole laskenut päästöjä tarkasteluajanjaksolla. Näin ollen maiden kannattaa panostaa energiantensiteetin parantamiseen. Energiaintensiteettiä voidaan parantaa ottamalla käyttöön parempia teknologioita ja valita energianlähteiksi ympäristöystävällisempiä lähteitä.

Myös hiili-intensiteetillä oli positiivinen yhteys hiilidioksidipäästöjen kasvuun molemmissa maanosissa. Kun hiili-intensiteetti kasvaa, hiilidioksidipäästöt kasvavat myös. Tulokset kuitenkin osoittivat, että vaikutus on suurempi kehittyvällä alueella verrattuna kehittyneeseen alueeseen. Näin ollen Aasiassa hiili-intensiteetti kasvattaa hiilidioksidipäästöjä paljon enemmän kuin Länsi-Euroopassa. Hiili-intensiteetin korkea taso osoittaa korkean hiilidioksidipäästöjen tason kehittyvillä alueilla. Mitä pienempi arvo on, sitä vähemmän päästöt kasvavat. Tuloksien mukaan hiili-intensiteetin kasvu on tärkein selittäjä hiilidioksidipäästöjen kasvamisessa molemmilla alueilla. Aikaisempien tutkimusten valossa myös väkiluku ja BKT asukasta kohden kasvattavat päästöjä, mutta niiden

sisällyttäminen tämän tutkimuksen malliin ei onnistunut, korkean korrelaation ja ei-raportoitavissa olevien tulosten takia. Näin ollen väkiluvun ja BKT:n tuloksien osalta joudutaan turvautumaan aikaisempaan kirjallisuuteen.

Vaikka tutkimuksia hiilidioksidipäästöjen taustatekijöistä on paljon, tarve tämän kaltaiselle tutkimukselle tulee yhä enemmän kriittisemmäksi tulevaisuudessa. Tulevissa tutkimuksissa olisi tärkeä huomioida uusia näkökulmia Kaya-hajotelman lähestymistavassa. Mallissa voisi korostaa työvoiman tai tekniikan vaikutusta ympäristöön ja kuinka voitaisiin tehdä kestävämpiä investointeja energiaan, jotta energiaintensiteettiä saataisiin parannettua. On tärkeä huomata, että hiilidioksidipäästöjen taustatekijät eivät suinkaan rajoitu Kaya-hajotelman neljään tekijään. Malliin voidaan lisätä uusia tekijöitä tai sitä voidaan modifioida tarpeen mukaan. Kaya-hajotelman yksinkertaisuuden ja onnistuneen kehityksen ansiosta, sitä voitaisiinkin käyttää monimutkaisemmissa tutkimuksissa syvällisimpien tulosten löytämiseksi. Erilaisten energiankulutuksen mittareiden lisääminen malliin antaisi luultavasti syvällisempiä tuloksia, jolloin voitaisiin tutkia energiankulutuksen vaikutusta ympäristön laatuun ja hiilidioksidipäästöjen kasvuun. Tutkijoiden olisi tärkeä keskittyä myös multikollineaarisuusongelmaan, jolloin voitaisiin minimoida muuttujien välinen korkea korrelaatio. Demograafisten tekijöiden tutkiminen voisi tuoda myös lisäarvoa tutkimukseen. Tällä tavalla voitaisiin luultavasti tutkia paremmin väkiluvun ja hiili-intensiteetin korkeaa korrelaatiota.

Tulevissa tutkimuksissa myös maantieteelliseen rajaukseen tulisi kiinnittää huomiota. Maiden välistä kehittyneisyyden tasoa voitaisiin mitata jollakin tekijällä, jolloin siitä saataisiin enemmän tietoa ja maat pystyttäisiin jakamaan paremmin samanlaisiin otoksiin, jolloin myös tulokset olisivat paremmin yleistettävissä. Tämän ansiosta luotettavuuskin paranisi. Lisäksi paneeliaineiston tasapainoisuutta voitaisiin korostaa enemmän ja stationaarisuuden testejä voitaisiin tehdä. Tässä tutkimuksessa paneeliaineisto oli epätasapainoinen Aasian otoksen osalta, joka tarkoittaa sitä, että aineisto sisältää puuttuvia arvoja joidenkin muuttujien osalta. Aineiston laatuun voisi jatkotutkimuksissa panostaa enemmän.

## Lähdeluettelo

Aaltola, P. & Ollikainen, M. (2011) Ilmastonmuutos ja talous: hillinnän ja sopeutumisen ekonomiaa ja politiikkaa. Teoksessa: Virtanen, A. & Rohweder, L. (2011) Ilmastonmuutos käytännössä. 1. p. Helsinki, Gaudeamus.

Cicea, C., Marinescu, C., Popa, I. & Dobrin, C. (2014) Environmental efficiency of investments in renewable energy: Comparative analysis at macroeconomic level. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, pp. 555-564.

Duro, J. & Padilla, E. (2006) International inequalities in per capita CO<sub>2</sub> emissions: A decomposition methodology by Kaya factors. *Energy Economics*, 28(2), pp. 170-187.

Everett, T., Ishwaran, M., Ansaloni, G. & Rubin, A. (2010) Economic growth and the environment. *Defra Evidence and Analysis Series*, 2, pp.1-53

Field, B. & Field, M. (2009) *Environmental Economics: An introduction*. New York, McGraw-Hill.

Giraud, G., Lantremange, H., Nicolas, E. & Rech, O. (2017) National Carbon Reduction Commitments: Identifying the Most Consensual Burden Sharing. IDEAS Working Paper Series from RePEc.

Global Carbon Atlas (2019) CO<sub>2</sub> Emissions. [verkkotietokanta]. Saatavilla <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>

Hanley, N., Shogren, J. & White, B. (2013) *Introduction to Environmental Economics*. Second Edition. Oxford University Press.

Henriques, S. & Borowiecki, K. (2014) The drivers of long-run CO<sub>2</sub> emissions: A global perspective since 1800. IDEAS Working Paper Series from RePEc.

Hill, C., Griffiths, W. & Lim, G. (2018) Principles of econometrics. Fifth edition. Hoboken, John Wiley & Sons.

Hoffrén, J. (2008) Hyvinvoinnin seuranta vaatii uusia mittareita. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.11.2019]. Saatavilla [https://www.stat.fi/artikkelit/2008/art\\_2008-11-12\\_002.html?s=0](https://www.stat.fi/artikkelit/2008/art_2008-11-12_002.html?s=0)

Hyytinen, A. & Maliranta, M. (2015) Yritysjohdon taloustiede: yritykset taloudessa ja taloustieteessä. 1. painos. Helsinki, Spillover Economics Oy.

Honkatukia, J. (2008) Ilmastonmuutoksen torjunnan kustannukset ja hyödyt. [verkkootartikkeli]. [viitattu 1.11.2019]. Saatavilla <http://www.taloustieteellinenyhdistys.fi/images/stories/kak/kak12008/kak12008honkatukia.pdf>

IEA. (2017) Climate change. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.11.2019]. Saatavilla <https://www.iea.org/topics/climatechange/>

IPCC. (2019) Global warming of 1.5°C -Report. [verkkoraportti]. [viitattu 31.10.2019]. Saatavilla [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15\\_Chapter2\\_Low\\_Res.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf)

Jancovici, J. (2014) What is Kaya's equation? [verkkootartikkeli]. [viitattu 28.10.2019]. Saatavilla <https://jancovici.com/en/climate-change/economy/what-is-kayas-equation/>

Joutsenvirta, M. & Borg, P. (2015) Maapallo ja me: Luonnonvarat ja kasvun rajat. Jyväskylä, Docendo.

Koop, G. (2008) Introduction to Econometrics. Wiley.

KvantiMOTV (2003) Regressioanalyysin rajoitteet. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.12.2019] Saatavilla <https://www.fsd.uta.fi/metelmaopetus/regressio/rajoitteet.html>

Liddle, B. (2014) Impact of population, age structure, and urbanization on carbon emissions/energy consumption: Evidence from macro-level, cross-country analyses. *Population and Environment*, 35(3), pp. 286-304.

Lima, F., Nunes, M., Cunha, J. & Lucena, A. (2016) A cross-country assessment of energy-related CO<sub>2</sub> emissions: An extended Kaya Index Decomposition Approach. *Energy*, 115, pp. 1361-1374.

Lotfalipour, M., Falahi, M. & Ashena, M. (2010) Economic growth, CO<sub>2</sub> emissions, and fossil fuels consumption in Iran. *Energy*, 35(12), pp. 5115-5120.

Maailmantalous. (2019) Bruttokansantuote (BKT). [verkkodokumentti]. [viitattu 3.11.2019]. Saatavilla <http://maailmantalous.net/fi/abc/bruttokansantuote-bkt>

Mattila, V. (1991) Hiilidioksidipäästöt, talous ja taloudellinen ohjaus. Helsinki. VATT

Mavromatidis, G., Orehounig, K., Richner, P. & Carmeliet, J. (2014) A strategy for reducing CO<sub>2</sub> emissions from buildings with the Kaya identity - A Swiss energy system analysis and a case study. *Energy Policy*, 88, p. 343.

Mellin, I. (2006) Tilastolliset menetelmät: Lineaarinen regressioanalyysi. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.12.2012]. Saatavilla <https://math.aalto.fi/opetus/sovtoda/oppi-kirja/Regranal.pdf>

Määttä, K. & Pulliainen, K. (2003) Johdatus ympäristötaloustieteeseen. Helsinki, Talentum.

Naudé, W. (2011) Climate change and industrial policy. *Sustainability*, 3, pp. 1003-1021.

OECD (2018) Economic survey of Germany. [verkkodokumentti]. [viitattu 1.12.2019]. Saatavilla <http://www.oecd.org/economy/germany-economic-snapshot/>

Ollikainen, M. & Pohjola, M. (2013) Talouskasvu ja kestävä kehitys. Suomalaisen tiedeakatemian kannanottoja -sarja. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.11.2019]. Saatavilla <https://www.academies.fi/wp-content/uploads/2015/03/talouskasvu.pdf>

Pui, K. & Othman, J. (2019) The influence of economic, technical, and social aspects on energy-associated CO<sub>2</sub> emissions in Malaysia: An extended Kaya identity approach. *Energy*, 181, pp. 468-493.

Ritchie, H. & Roser, M. (2018) CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emission. [verkkoartikkeli]. [viitattu 31.10.2019]. Saatavilla <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>

Robalino-López, A., Mena-Nieto, Á., García-Ramos, J. & Golpe, A. (2015) Studying the relationship between economic growth, CO<sub>2</sub> emissions, and the environmental Kuznets curve in Venezuela (1980–2025). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41(C), pp. 602-614.

Stern, N. (2006) Stern review: The economics of climate Change. Table of contents full report. [verkkoartikkeli]. [viitattu 31.10.2019]. Saatavilla [http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/destaques/sternreview\\_report\\_complete.pdf](http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/destaques/sternreview_report_complete.pdf)

Tavakoli, A. (2018) A journey among top ten emitter country, decomposition of “kaya identity”. *Sustainable Cities and Society*. 38, pp. 254-264.

Tavakoli, A. (2017) How precisely kaya identity can estimate GHG emission: A global review. *Journal of Earth and Environmental Sciences* 2, 8, pp. 91-96

Torres-Reyna, O. (2007) Panel data analysis fixed and random effects using stata. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.11.2019]. Saatavilla <https://www.princeton.edu/~otorres/Panel101.pdf>

Wang, S., Zhang, W. & Liu, L. (2019) Study on the effect energy consumption structure on carbon intensity of Hebei province from the perspective of sensitivity. *Earth and Environmental Science*, 237(4), pp. 1-8

World Bank Group (2019) World development indicators. [verkkotietokanta]. Saatavilla <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>

Wu, Y., Shen, J., Zhang, X., Skitmore, M. & Lu, W. (2016) The impact of urbanization on carbon emissions in developing countries: A Chinese study based on the U-Kaya method. Journal of Cleaner Production, 135, pp. 589-603.

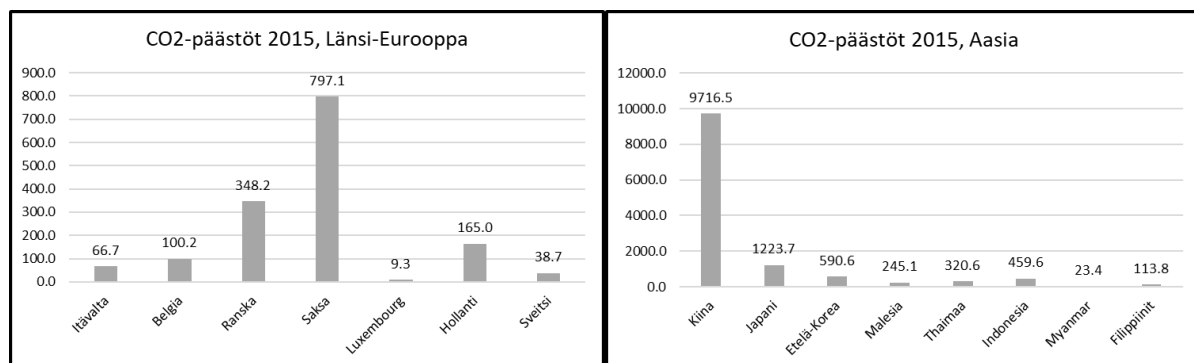
Ympäristöministeriö. (2018) Pariisin ilmastopimus. [verkkodokumentti]. [viitattu 31.10.2019]. Saatavilla [https://www.ymp.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto\\_ja\\_ilma/Ilmaston-muutoksen\\_hillitseminen/Kansainvaliset\\_ilmastoneuvottelut/Pariisin\\_ilmastopimus](https://www.ymp.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmaston-muutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmastoneuvottelut/Pariisin_ilmastopimus)

## LIITTEET

### LIITE 1. Muuttujien perustietoja

Muuttuja	Tunnus	Yksikkö	Havainnot	Keskiarvo	Minimi	Maksimi
Hiilidioksidipäästöt	CO2paastot	1 000 000 tonnia	690	495,84	4,09	9820,36
Väkiluku	vakiluku	total	690	12 400 000 000	339 171	137 000 000 000
Energian kulutus	energia	öljyekvivalentti kilogrammoissa asukasta kohden	677	2978,24	250,42	13023,89
BKT / asukas	BKTasuk	BKT asukasta kohden laskettuna	690	24596,86	161,73	111968,3

### LIITE 2. Hiilidioksidipäästöjen maakohtaiset arvot



### LIITE 3. Aasian otoksen korrelaatiomatriisi

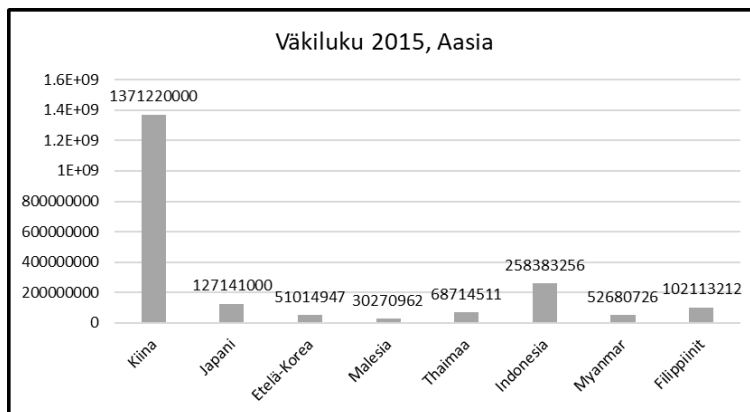
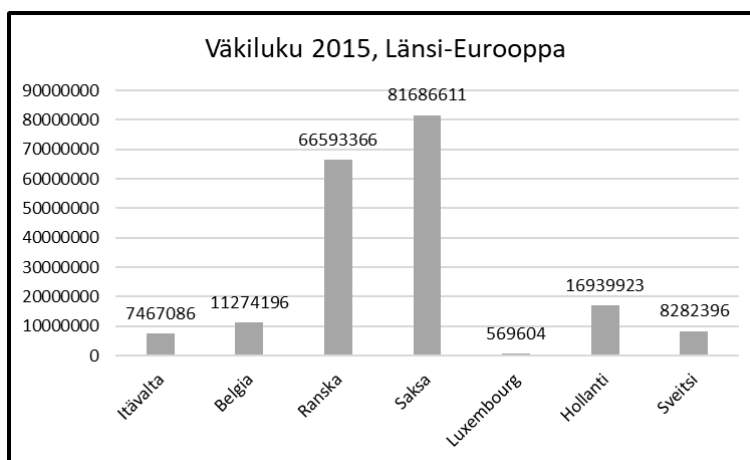
AASIA	CO2paastot	vakiluku	energia	BKTasuk	energiaint	hiili_int
CO2paastot	1					
vakiluku	0.8216	1				
energia	0.1825	-0.0902	1			
BKTasuk	0.1073	-0.1462	0.8495	1		
energiaint	0.0688	0.3935	-0.4084	-0.4055	1	
hiili_int	0.8692	0.9917	-0.0533	-0.1245	0.327	1

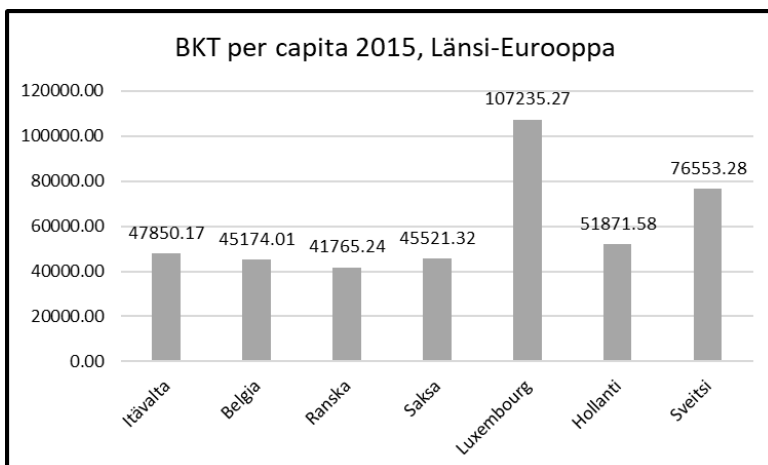
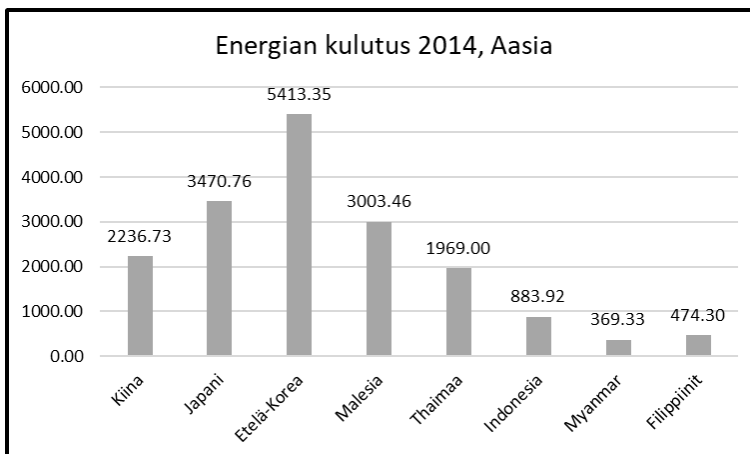
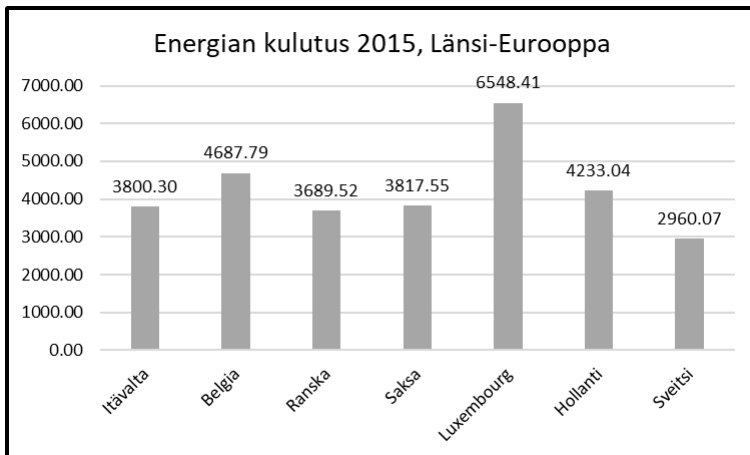


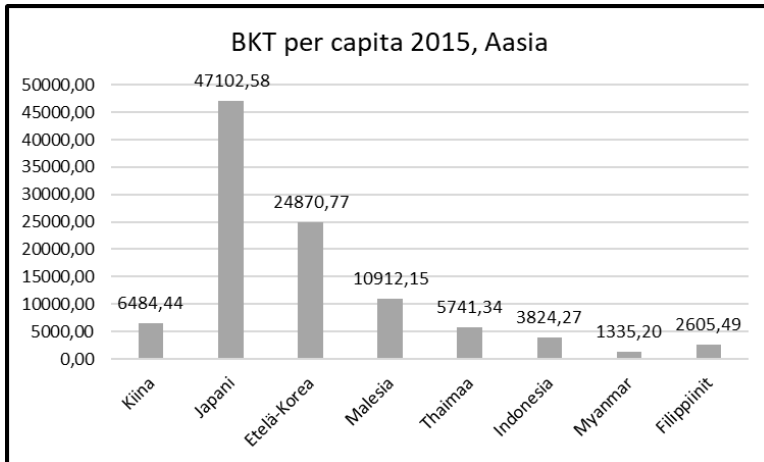
## LIITE 4. Länsi-Euroopan otoksen korrelaatiomatriisi

LÄNSI-EUROOPPA	CO2paastot	vakiluku	energia	BKTasuk	energiaint	hiili_int
CO2paastot	1					
vakiluku	0.948	1				
energia	-0.2309	-0.3004	1			
BKTasuk	-0.4097	-0.4093	0.3881	1		
energiaint	0.1854	0.0916	0.5375	-0.5214	1	
hiili_int	0.9926	0.9605	-0.2670	-0.4223	0.1635	1

## LIITE 5. Väkiluvun, energiankulutuksen ja BKT per capitaan maakohtaiset arvot

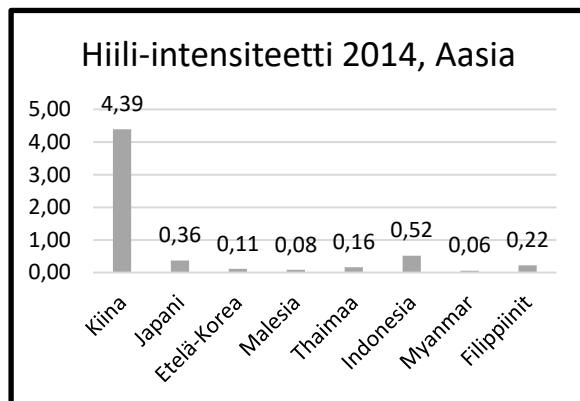
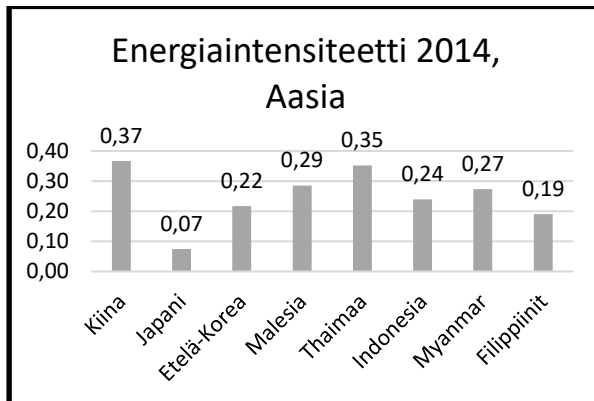




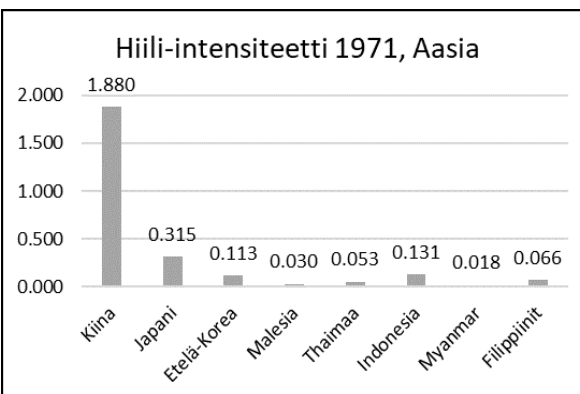
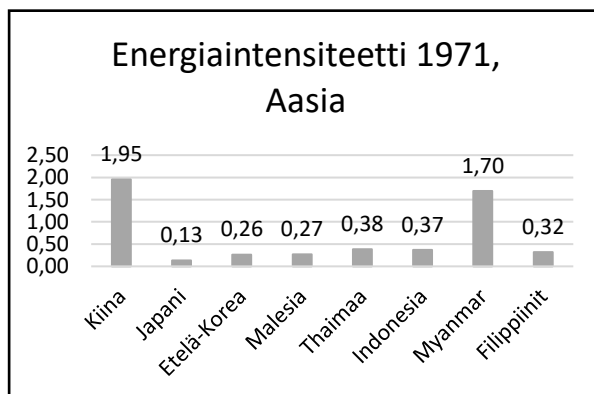


LIITE 6. Energia- ja hiili-intensiteetin maakohtaiset arvot

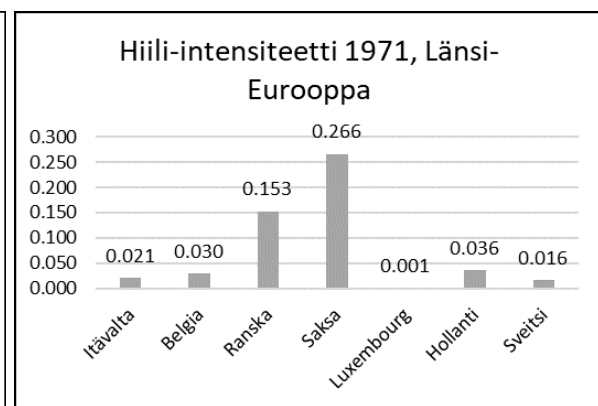
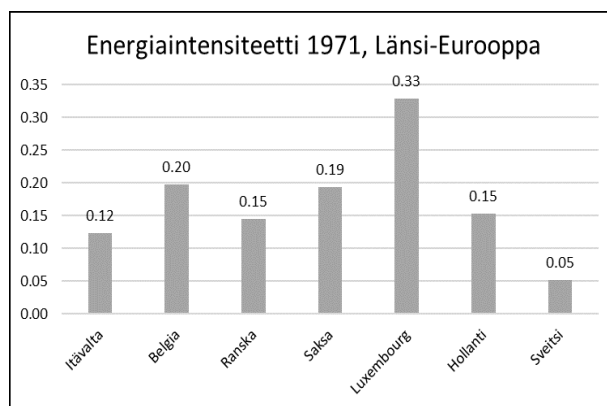
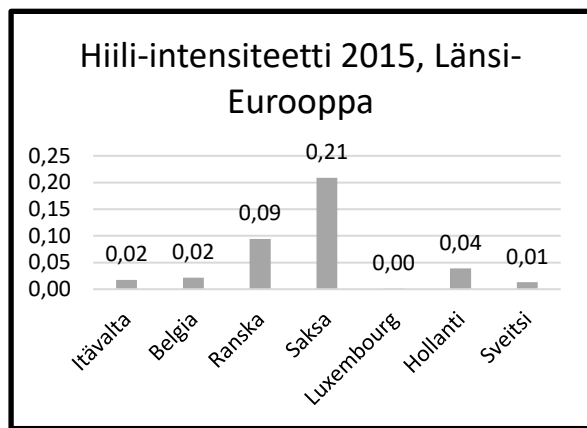
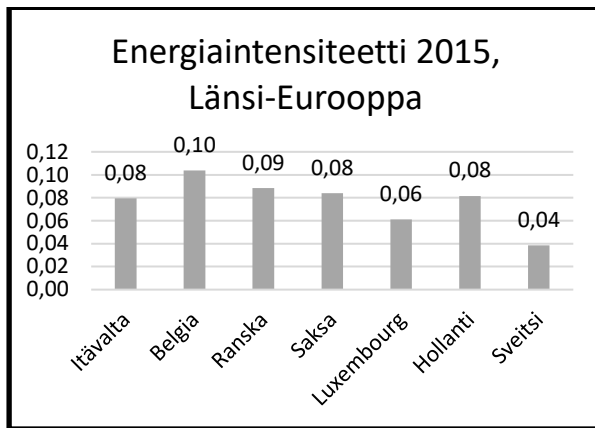
### AASIA



\*Hiili- ja energiantensiteetistä ei dataa saatavilla vuodelta 2015 Aasian osalta



## LÄNSI-EUROOPPA



## LIITE 7. Kiinteiden vaikutusten malli klusterirobusteilla keskivirheillä

Muuttuja	Aasia (FE robust)	Länsi-Eurooppa (FE robust)
ln_energiaint	0.06 (0.852)	0.12 (0.116)
ln_hiili_int	1.82 (0.001)	0.41 (0.001)
_cons	8.37 (0.000)	6.50 (0.000)
R-sq: within	0.69	0.26
R-sq: between	0.80	0.98
R-sq: overall	0.77	0.98