

Onko öljyhuippua yhä syytä pelätä?

Fossiilienergia ei maankuoresta loppu, mutta sen tuottaminen muuttuu innovaatioista huolimatta asteittain resurssi-intensiivisemmäksi.

Voiko fossiilienergian kustannusten kasvu uhata myös vihreän siirtymän investointeja?

Eljas Aalto, Turun yliopisto ja Labore

Öljyntuotannon volyymin maksimipistettä ja sitä seuraavaa tuotannon laskua on usein kutsuttu öljyhuipuksi. Koska historiallisista polkuriippuvuuksista johtuen fossiilisten polttoaineiden kulutus ja taloudellinen tuotanto ovat kulkeneet käsi kädessä, on ajoittain esiintynyt pelko öljyhuipun aiheuttamasta taantumasta helposti ymmärrettävissä.

Vihreä siirtymä ei ole ainoastaan ympäristön kannalta järkevää, vaan kohtuullisen lyhyellä aikavälillä myös talouden kasvun kannalta välttämätöntä.

Tässä muistiossa luon linkin usean erilaisen tutkimusalan välille: energia-analyysin, uusiutumattomien luonnonvarojen teorian, modernin taloustieteellisen kasvuteorian sekä suunnatun teknisen kehityksen kirjallisuuden. Energian tarjontaa ajatellen ongelma ei ole fossiilienergian loppuminen maankuoresta, vaan helposti hyödynnettävissä olevien reservien ehtyminen, mikä muuttaa fossiilienergian tuotannon energiaintensiivisemmäksi ja alkaa syrjäyttää yhä enemmän muuta globaalin talouden tuotantopotentiaalia. Koska myös vihreä siirtymä edellyttää suurta määrää materiaali- ja energiavirtoja, voi siirtymä uusiutuviin energialähteisiin muuttua haastavammaksi ajan kuluessa. Näin vihreä siirtymä ei ole ainoastaan ympäristön kannalta järkevää, vaan myös talouden kasvun kannalta välttämätöntä.

Keskeinen tulos on myös, että energia-analyysin ajoittain esille nostamat synkätkin ennusteet energian tarjonnan romahduksesta ovat taloustieteellisessä tarkastelussa liioiteltuja, sillä markkinoiden kannusteet ohjaavat tuotannon ja innovoinnin resurssseja dynaamisesti kohti uusiutuvia tuotantopanoksia. Optimaalisen talouspolitiikan tulee samalla madaltaa fossiilisten polttoaineiden tuotannon huippua estääkseen energiasektorin oman energiaintensiteetin liiallista kasvua. Se, korostuuko talouspolitiikassa fossiilisten polttoaineiden verotus vai puhtaan energian innovoinnin tukeminen, riippuu vahvasti siitä, kuinka helposti uusiutuvat ja uusiutumattomat energialähteet ovat keskenään korvattavissa.

Tämä muistio on osa kevääseen 2024 jatkuvaa Business Finlandin, Laboren ja VTT:n hanketta "Kestävän kasvun ennakointia – visio vihreän siirtymän jälkeisestä vaurauden ajureista" (ForGrowth).

Labore VTT

Kestävän kasvun ennakointia – visio vihreän siirtymän jälkeisestä vaurauden ajureista (ForGrowth)

**Vuonna 2050
fossiilienergian
tuotantoprosessi voi
kuluttaa käyttöenergiaa
määrän, joka vastaa
noin puolta tuotetusta
fossiilienergian
kokonaismäärästä.**

Johdanto

Fossiilienergiasta peräisin olevien päästöjen aiheuttamat ympäristöongelmat eivät ole ainoa tai alkuperäinen syy sille, miksi nopeaa siirtymää uusiutuviin energialähteisiin on pyritty edistämään. Fossiilisten energialähteiden rajallinen määrä maankuoressa on saanut menneinä vuosikymmeninä monet ennustamaan, että globaali öljyntuotanto saavuttaa vääjäämättömän huippunsa jo lähitulevaisuudessa kääntyen sen jälkeen kiihtyvään laskuun, mikä toisi mukanaan monenlaisia talousongelmia (Campbell ja Laherrère, 1998; Hubbert, 1956).

Öljyhuipun ajankohdalle annetut ennusteet ovat kuitenkin kerta toisensa jälkeen osoittautuneet vääriksi, kun uudet teknologiat ovat mahdollistaneet aiemmin tavoittamattomissa olevien reservien, kuten liuskekaasun, hyödyntämisen. Ilmaston ja ympäristön kannalta vaikuttaakin olevan mielekästä todeta, että fossiilisten energialähteiden niukkuuden sijaan suurempi ongelma on niiden suuri saatavuus (esim. Covert et al., 2016).

Toisaalta uusiutumattomien energiavarantojen loppumisen sijaan energia-analyysi on viime vuosikymmeninä kiinnittänyt enemmän huomiota energialähteiden ”ylijäämään” energian omista yksiköissä. Tähän tarkoitukseen yksi käytetyimpiä indikaattoreita on Hallin et al. (1986) popularisoima EROI (Energy Return On Investment), joka kuvaa tuotetun energian määrää suhteessa sen tuottamiseen itseensä käytettyyn energiaan. Indikaattori on mahdollista laskea eri energialähteille erikseen, ja se antaa näin käytännöllisen tavan eri energiantuotantotapojen tehokkuuden keskinäiselle vertailulle. Esimerkiksi tuuliturbiinin pystyttäminen ja ylläpito vaatii suuria määriä käyttöenergiaa aina raaka-ainetuotannosta turbiinin lopulliseen käyttöön asti, eikä turbiinin tuottama sähkövirta välittömästi kompensoi itseensä liittyvää energiankulutusta. Onkin luontevaa, ettei energialähteitä vertailla vain niiden absoluuttisen tuotantopotentialin suhteen, vaan niiden tuottaman *nettoenergian* määrän suhteen, joka on muun talouden ja yhteiskunnan käyttöön hyödynnettävissä olevaa energiaylijäämää.

On muodostunut vahva konsensus siitä, että fossiilienergian EROI on laskenut pitkällä aikavälillä huomattavasti (esim. Delannoy et al., 2021). Taloustieteelle tutumpaa käsitteistöä hyödyntäen fossiilienergian EROI:n lasku voidaan kuvata fossiilienergian tuotannon energiaintensiteetin kasvuna. Fossiilienergian tuotanto siis ”kannibalisoi” yhä suuremman osan käyttöenergiasta itsestään, mikä on seurausta helpoiten saatavissa ja hyödynnettävissä olevien reservien tyhjenemisestä. Uusien esiintymien etsimiseen ja poraamiseen joudutaan käyttämään aiempaa enemmän resursseja, ja vaikka uudet innovaatiot ovat mahdollistaneet epätavanomaisten energiavarantojen hyödyntämisen, ei teknologinen kehitys ole täysin kompensoinut geologisten lainalaisuuksien aiheuttamaa EROI:n laskua. Delannoy et al. (2021) ovat laskeneet, että vuonna 2050 fossiilienergian tuotantoprosessi tulee globaalisti kuluttamaan käyttöenergiaa määrän, joka vastaa noin puolta tuotetusta fossiilienergian kokonaismäärästä. Siten fossiilienergian tuotannon nettomääräinen huippu, joka taloudellisen kokonaishyvinvoinnin kannalta lienee tärkeämpi kuin absoluuttinen huippu, voi tapahtua klassista öljyhuippua aiemmin.

EROI:n laskun kaksi haastetta

Vaikka fossiilienergian EROI:n lasku luontaisesti kannustaa markkinoita siirtymään uusiutuviin energialähteisiin kustannusten noustessa, on ilmiön arvioitu aiheuttavan kaksi keskeistä ongelmaa myös vihreän siirtymän kannalta.

Vihreä siirtymän resurssi-intensiivisyys voi syrjäyttää muuta tuotantoa ja kasvattaa päästöjä lyhyellä aikavälillä.

Ensinnäkin on usein arvioitu, että uusiutuvien energialähteiden EROI on fossiilienergiaa matalampi, ja näin ollen vihreä siirtymä edellyttää siirtymistä korkeamman EROI:n systeemistä matalamman EROI:n systeemiin aiheuttaen pitkäkestoisen taloudellisen laskukauden (esim. King ja van den Bergh, 2018; Sers ja Victor, 2018). Esimerkiksi säätövirtaa tarjoavien biopolttoaineiden EROI:n on arvioitu olevan hyvin matala, jopa lähellä yhtä (Prananta ja Kubiszewski, 2021). Joidenkin näkemysten mukaan EROI:n arvolle on myös olemassa alaraja, jonka yläpuolella talouskasvu vasta on mahdollista (Fizaine ja Court, 2016; Hall et al., 2014). Toisaalta myös toisenlaisia näkemyksiä on ilmaantunut, sillä uusiutuvien energialähteiden teknologisen kehityksen myötä niiden EROI on noussut huomattavasti, eikä tässä mielessä puhdas energia välttämättä olekaan enää kovin jälkeenjäänyttä fossiilienergiaan nähden (Brockway et al., 2019). Vaikutelma fossiilienergian ylivertauudesta voi olla harhakuva myös siksi, että sen tuotantoa yhä tuetaan globaalisti enemmän kuin uusiutuvaa energiaa.

Toinen nettoenergia-analyysin esiin nostama ongelma liittyy vihreän siirtymän omaan energiaintensiivisyyteen. Esimerkiksi vedyn tuottaminen suuressa mittakaavassa sekä siihen liittyvät investoinnit edellyttävät valtavia resursseja ja materiaalivirtoja (IEA, 2021). Siten siirtymän itsensä toteuttamiseen tarvitaan globaalisti riittävä määrä käyttöenergiaa, joka toistaiseksi on vielä enimmäkseen fossiilisten polttoaineiden tuotannon varassa. Jos fossiilienergian EROI laskee, voi vihreän siirtymän taloudellisesti mielekkäällä toteuttamisella olla kiire riittävän käyttöenergian tarjonnan kannalta (Delannoy et al., 2021). Lisäksi vihreän siirtymän energiaintensiivisyys aiheuttaa voimakkaan bruttoenergiantuotannon kasvupaineen, mikä voi tarkoittaa ympäristön kannalta liiallista päästöjen nousupainetta lyhyellä aikavälillä (Slameršak et al., 2022; Pehl et al., 2017).

Mitä suunnatun innovoinnin teoria sanoo energiasiirtymästä?

Nettoenergian käsitettä ei ole talouden kasvuteoriassa juuri hyödynnetty. Kasvuteorian ja energian kontekstissa niin kutsutut suunnatun teknisen kehityksen mallit tarjoavat parhaan viitekehityksen energiasiirtymän analysointiin. Näissä malleissa teknologinen kehitys ei ole eri tuotantopanosten, kuten eri energialähteiden, suhteen neutraalia vaan on suuntautunut johonkin niistä voimakkaammin kuin toisiin. Ympäristöä käsittelevissä suunnatun innovoinnin malleissa (esim. Acemoglu et al., 2012) yleensä seurataan oletusta, jonka mukaan historialliset polkuriippuvuudet suosivat säästuttavia tuotantopanoksia suhteessa puhtaisiin. Näin teorian mukaan vihreän kasvun puute ei johdu itse asiassa siitä, että kasvu ja fossiilisten luonnonvarojen kulutus ovat aina linkittyneitä, vaan pikemminkin kyse on innovoinnin pitkäaikaisesta suuntautumisesta vääränlaisiin teknologioihin.

Useimmat suunnatun teknisen kehityksen mallit tuottavat huomattavasti optimistisempia näkemyksiä energiasiirtymän mahdollisuuksista verrattuna aiemmin mainittuun nettoenergia-analyysin kirjallisuuteen. Tämä johtuu esimerkiksi siitä, että fossiilivarantojen ehtyessä muodostuu markkinoilla luonnollinen kannustin suunnata innovointi kohti uusiutuvia energialähteitä. Casey (2023), Hassler et al. (2021) sekä André ja Smulders (2014) ovat myös osoittaneet energiatehokkuuteen liittyvän innovoinnin reagoivan energian hintashokkeihin: fossiilienergian kallistuessa (EROI:n laskiessa) taloudessa on kannusteita kehittää energiaa säästäviä teknologioita. Lemoine (2021) puolestaan argumentoi, että energia-alan polkuriippuvuus voi purkautua tietyn oletuksen itsestään myös ilman varantojen ehtymistä tai ympäristöpolitiikkaa. Toisaalta siirtymä ei välttämättä tapahdu ympäristön kannalta riittävän aikaisin (esim. Acemoglu et al. 2012). Malleissa ei voida kuitenkaan tarkastella EROI:n ja nettoenergian käsitteitä.

Suunnatun innovoinnin mallit tarjoavat energia-analyysia nyansoidumman tavan tutkia energia-analyysin esille nostamia taloudellisia uhkakuvia.

Nettoenergia-analyysin konsepteja ei ole analysoitu vakiintuneissa talouden kasvumalleissa.

Jos saastuttavien energialähteiden korvaaminen puhtailla on vaikeaa, voi puhtaan energian tukeminen epäintuitiivisesti kasvattaa myös päästöjä.

Nettoenergian huomioiminen talouden kasvumallissa

Olen tuonut nettoenergia-analyysin konseptit eksplisiittisesti mukaan vakiintuneeseen makrotaloudelliseen malliin, jossa teknologinen kehitys tapahtuu suunnatusti eri energialähteiden välillä (Aalto, 2023). Mallissa lopputuotanto syntyy käyttöenergiasta (esimerkiksi sähkö ja polttoaineet) ja muista tuotantopanoksista. Käyttöenergia syntyy yhdistelemällä kahta energialähdettä: puhdasta (uusiutuvat energialähteet) ja liikaista (fossiiliset polttoaineet). Nämä kaksi energialähdettä tuotetaan lopputuotannon tavoin käyttöenergian ja muiden panosten avulla. Näin voidaan tutkia aiemmin mainittuja nettoenergia-analyysiin kytkeytyviä kysymyksiä: millaisia kasvu- ja hyvinvointivaikutuksia fossiilienergian laskevalla EROI:lla on? Voiko vihreä siirtymä aiheuttaa päästöjen kasvua laskevan EROI:n takia? Miten optimaalinen talouspolitiikka kytkeytyy nettoenergia-analyysin käsitteisiin?

Nettoenergian suhteellinen määrä (nettoenergian aste) on epälineaarisessa yhteydessä talouden EROI:n tasoon. Mallissa lopputuotannon taso määräytyy puolestaan tuottavuuden lisäksi myös talouden EROI:n perusteella. EROI:n laskulla on mallissa energia-analyysin esille tuomia jyrkkeneviä negatiivisia hyvinvointivaikutuksia, mikä johtuu energiasektorin suhteellisesta koosta ja syrjäytysvaikutuksesta: kun EROI on korkea, ei energiasektorin resurssien suuri kasvu syrjäytä suurta suhteellista määrää muun talouden resursseja. Sen sijaan kun EROI on matala ja energiantuotannon käytössä on suuri määrä talouden resursseista, EROI:n suhteellinen lasku tarkoittaa hyvin suurta suhteellista syrjäytysvaikutusta muun talouden toiminnan suhteen. Mitä pienemmäksi EROI siis laskee, sitä suurempia ovat sen laskusta koituvat hyvinvointitappiot.

Koko talouden tasolla laskevan EROI:n tulisi tarkoittaa sitä, että käyttöenergia muuttuu kalliimmaksi ja siihen käytetyt menot suhteessa lopputuotantoon kasvavat. Näin ei kuitenkaan näytä tapahtuneen, sillä esimerkiksi OECD-maissa energiamenojen suhde bruttokansantuotteeseen on pysynyt melko vakaana, ja André ja Smuldersin (2014) mukaan energian BKT-osuus on itse asiassa laskenut. Öljyvarantojen hupeneminen ei siis ainakaan vielä ole merkittävästi vaikuttanut energiamenojen BKT-osuuteen, eikä näin ollen voimakkaasta kokonaistaloudellisesta EROI:n laskusta välttämättä ole viitteitä.

Vihreän siirtymän aiheuttama rebound-ilmiö

Voiko puhtaiden energialähteiden kehittyminen kasvattaa päästöjä, jos sen seurauksena bruttoenergiantuotanto kasvaa? Toisaalta voiko puhtaiden, matalamman EROI:n omaavien energialähteiden tukeminen kasvattaa myös fossiilienergian kysyntää puhtaaseen energiaan liittyvän resurssitarpeen seurauksena? Tähän niin kutsuttuun rebound-ilmiöön liittyviä kysymyksiä voidaan tutkia tarkastelemalla mallissa päästöjen joustoja puhtaan energian teknologian ja puhtaan energian hinta- tai tuotantotukien suhteen. Joustot kuvaavat taloustieteessä sitä, miten paljon jokin muuttuja suhteellisesti reagoi toisen muuttujan suhteelliseen muutokseen nähden.

Puhtaan energian teknologian kehitys aiheuttaa kaksi erilaista vaikutusta. Ensin kehitys laskee puhtaan energian suhteellista hintaa fossiilienergiaan nähden, mikä saa aikaan substituutiovaikutuksen käyttöenergian tuotannossa, sillä puhtaan energian suhteellinen kysyntä kasvaa. Mitä helpommin eri energialähteet ovat korvattavissa toisillaan, sitä voimakkaampaa substituutio ja fossiilienergian kysynnän pieneneminen on. Toiseksi teknologinen kehitys aiheuttaa skaalavaikutuksen, joka kasvattaa käyttöenergian bruttokysyntää. Tämä on seurausta käyttöenergian suhteellisen hinnan laskusta, mikä saa koko talouden käyttämään enemmän käyttöenergiaa suhteessa muihin tuotantopanoksiin (mikäli vain energia ja muut panokset ovat vähääkään korvattavissa

toisillaan). Skaalavaikutuksen suuruus riippuu myös nettoenergian asteesta taloudessa: jos nettoenergian aste on matala, vaatii nettoenergian kasvaneen kysynnän tyydyttäminen suurempaa bruttoenergiantuotannon kasvua, koska suurempi osa käyttöenergiasta kuluu energialähteiden omassa tuotannossa. Tällä koko energiantuotannon skaalan kasvulla on positiivinen vaikutus myös fossiilienergian kysyntään. Lopullinen vaikutus fossiilienergian kysyntään ja päästöihin riippuu siitä, kumpi vaikutus dominoi.

Puhtaan energian suhteellisella hintatuella on täsmälleen samat kaksi vaikutusta kuin puhtaan teknologian kehityksellä. Toisaalta se saa aikaan substituutiota likaisesta energiasta puhtaaseen energiaan, mutta toisaalta hintatuen aiheuttama käyttöenergian hinnan lasku kasvattaa myös koko energiantuotannon skaalaa, vaikuttaen positiivisesti likaisen energian kysyntään. Jos nettoenergian aste on matala, voimistuu skaalavaikutus entisestään. On siis teoriassa mahdollista, että päästöjen kitkemiseksi tarkoitettu puhtaan energian hintatuki tai puhtaaseen energiaan liittyvä innovointi voimistaa myös fossiilienergian kysyntää.

Fossiilienergian kysynnän joustoja tarkastelemalla käy ilmi, että skaalavaikutus dominoi substituutiovaikutusta, jos eri energialähteet ovat heikosti toisiaan korvaavia, käyttöenergia ja muut panokset eivät ole toisiaan voimakkaasti täydentäviä ja samalla nettoenergian aste taloudessa on hyvin matala. Vaikka eri panosten makrotaloudellisen korvattavuuden ja täydentävyyden estimoimiseen liittyy suuria hankaluuksia, tukevat sekä intuitio että empiiriset tutkimukset johtopäätöstä siitä, että energialähteet ovat keskenään huomattavasti voimakkaammin korvaavia kuin energia ja muut panokset (ks. esim. Papageorgiou et al., 2017; Casey, 2023). Näitä tuloksia tulkiten rebound-ilmiötä alkaa esiintyä vasta, jos nettoenergian suhteellinen osuus energian tarjonnasta putoaa äärimmäisen matalaksi.

Optimaalinen talouspolitiikka nettoenergian perspektiivistä

Suunnatun teknisen kehityksen malleissa optimaalinen siirtymä energialähteiden välillä saavutetaan yleensä kahden keskeisen politiikkainstrumentin avulla: fossiilienergian verotuksen ja puhtaan energian innovaatiotuen avulla. Nämä instrumentit kompensoivat kahta keskeistä ilmiötä: fossiilienergian hupenemisesta ja päästöistä aiheutuvia negatiivisia hyvinvointivaikutuksia sekä puhtaan energian innovoinnin yli ajan tuottamia positiivisia hyvinvointivaikutuksia. Taloustieteen tutkimukset ovat voimakkaammin korostaneet fossiilienergian verotuksen roolia energiasiirtymän kannalta (esim. Lemoine, 2021; Hart, 2019), mutta toisaalta joskus myös innovaatiotuen on tulkittu olevan merkittävämpi työkalu siirtymän aikaansaamiseksi (Acemoglu et al., 2016; 2012).

Kun energiasiirtymän tarkastelun painopiste on fossiilivarantojen tyhjenemisen vaikutuksissa, ei optimaalisen talouspolitiikan arvioinnissa vaadita erikseen oletuksia siitä, millä mekanismilla päästöt vaikuttavat taloudelliseen tuotantoon ja hyvinvointiin. Esitellyssä tutkimuksessa (Aalto, 2023) käy numeeristen simulaatioiden avulla ilmi, että optimaalisen talouspolitiikan rakenne on sama, vaikkei päästöillä oleteta olevan hyvinvointivaikutuksia: talouspolitiikan tulee silti nojata fossiilisen energian verotukseen ja puhtaan energian innovaatiotukeen. Nämä instrumentit saavat optimissa talouden siirtymään puhtaisiin energialähteisiin huomattavasti puhdasta markkinatasapainoa nopeammin ja vähentävät fossiilienergian kumulatiivista tuotantoa.

Jos eri energialähteet ovat heikommin toisiaan korvaavia, on talouspolitiikan painopiste voimakkaammin fossiilienergian verotuksessa, mutta kun energialähteet korvaavat toisiaan helpommin, on painopiste puhtaan energian innovaatiotuuissa. Intuitiivista on, että mitä voimakkaampaa on eri energialähteiden välinen substituutio, sitä matalampi on vaadittu veron taso, joka saa aikaan halutunlaisen siirtymän puhtaaseen energiaan. Kun

Business Finlandin rahoittamassa innovaatio- ja kasvututkimuksessa tavoitteena on löytää ratkaisuja Suomen talouden ja yhteiskunnan globaaleihin haasteisiin.

Optimaalinen talouspolitiikka, joka nojaa fossiilienergian verotukseen ja puhtaan energian innovaatiotukiin, madaltaa fossiilienergian tuotannon huippua ja pysäyttää EROI:n liiallisen laskun.

fossiilienergian osuus on yhä hallitseva, on lyhyellä aikavälillä liian korkeita veroja vältettävä niiden negatiivisten hyvinvointivaikutusten takia. Pidemmällä aikavälillä optimaalinen vero kuitenkin nousee asteittain. Optimaalisen talouspolitiikan eräänä tärkeänä tavoitteena voidaan nähdä talouden EROI:n pitäminen mahdollisimman korkealla tasolla, jolloin energiantuotanto syrjäyttää mahdollisimman vähän muuta tuotantoa.

Yhteiskunnallisesti polarisoituneena aikana on erityisen huomionarvoista, että optimaalinen talouspolitiikka on hyvin samansuuntaista riippumatta siitä, oletetaanko päästöillä olevan hyvinvointivaikutuksia. Näin ollen on sekä taloudellisesti että ympäristöllisesti järkevää kannustaa markkinoita vallitsevaa nopeampaan siirtymään kohti puhdasta energiaa, koska vihreällä siirtymällä on kulutukseen positiivinen vaikutus myös kohtuullisen lyhyellä aikavälillä.

Taloutta ja energian tarjontaa on syytä ajatella biofysikaalisena systeeminä, jossa energia virtaa talouden sektorilta toiselle. Keskeistä on huomioida, pystyykö kukin puhdas energialähde tuottamaan yhteiskunnalle riittävästi käyttöenergiaa suhteessa energialähteen omaan kulutukseen. Esimerkiksi useat uusiutuva säätovirta tarjoavat lähteet ovat vielä toistaiseksi hyvin energiantensiivisiä, joten niiden hiilijalanjälki saattaa tiettyjen tuotantotapojen kohdalla olla merkittävä. Siten energia-ala voi olla erityisen herkkä katteettomille lupauksille fossiilienergian korvaajien oletetusta vihreydestä.

Lähdeluettelo:

Aalto, E. (2023). Net Energy and Directed Technical Change. Unpublished manuscript.

Acemoglu, D., P. Aghion, L. Burszty, and D. Hemous (2012). The Environment and Directed Technical Change. *American Economic Review* 102 (1), 131–66. <https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131>

Acemoglu, D., U. Akcigit, D. Hanley, and W. Kerr (2016). Transition to Clean Technology. *Journal of Political Economy* 124 (1), 52–104. <https://doi.org/10.1086/684511>

André, F. J., and S. Smulders (2014). Fueling growth when oil peaks: Directed technological change and the limits to efficiency. *European Economic Review* 69, 18–39. <https://doi.org/10.1016/j.eurocorev.2013.10.007>

Brockway, P., A. Owen, L. I. Brand Correa, and L. Hardt (2019). Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources. *Nature Energy* 4, 612–621. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0425-z>

Campbell, C. J. and J. H. Laherrère (1998). The End of Cheap Oil. *Scientific American* 278 (3), 78–83. <https://www.jstor.org/stable/26057708>

Casey, G. (2022). Energy Efficiency and Directed Technical Change: Implications for Climate Change Mitigation. *The Review of Economic Studies* 91(1), 192–228. <https://doi.org/10.1093/restud/rdad001>

Covert, T., M. Greenstone, and C. R. Knittel (2016). Will We Ever Stop Using Fossil Fuels? *Journal of Economic Perspectives* 30 (1), 117–38. <https://doi.org/10.1257/jep.30.1.117>

- Delannoy, L., P.-Y. Longaretti, D. J. Murphy, and E. Prados (2021). Peak oil and the low-carbon energy transition: A net-energy perspective. *Applied Energy* 304, 117843. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117843>
- Fizaine, F. and V. Court (2016). Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society. *Energy Policy* 95, 172–186. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.039>
- Hall, C. A., J. G. Lambert, and S. B. Balogh (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy* 64, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>
- Hall, C. A. S., C. J. Cleveland, and R. Kaufmann (1986). *Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process*. New York, NY: John Wiley and Sons.
- Hart, R. (2019). To everything there is a season: Carbon pricing, research subsidies, and the transition to fossil-free energy. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 6 (2), 135–175. <https://doi.org/10.1086/701805>
- Hassler, J., P. Krusell, and C. Olovsson (2021). Directed Technical Change as a Response to Natural Resource Scarcity. *Journal of Political Economy* 129 (11), 3039–3072. <https://doi.org/10.1086/715849>
- Hubbert, M. K. (1956). *Nuclear Energy and the Fossil Fuels*. Houston: Shell Development Company, Exploration and Production Research Division.
- IEA (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- King, L. C. and J. C. J. M. van den Bergh (2018). Implications of net energy-return-on-investment for a low-carbon energy transition. *Nature Energy* 3 (4), 334–340. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0116-1>
- Lemoine, D. (2021). *Innovation-led Transitions in Energy Supply*. Working Paper 23420, National Bureau of Economic Research. https://www.nber.org/system/files/working_papers/w23420/w23420.pdf
- Papageorgiou, C., M. Saam, and P. Schulte (2017). Substitution between Clean and Dirty Energy Inputs: A Macroeconomic Perspective. *The Review of Economics and Statistics* 99 (2), 281–290. https://doi.org/10.1162/REST_a_00592
- Pehl, M., A. Arvesen, F. Humpenöder, A. Popp, E. G. Hertwich, and G. Luderer (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy* 2 (12), 939–945. <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0032-9>
- Prananta, W., and I. Kubiszewski (2021). Assessment of Indonesia’s Future Renewable Energy Plan: A Meta-Analysis of Biofuel Energy Return on Investment (EROI). *Energies* 14, 2803. <https://doi.org/10.3390/en14102803>
- Sers, M. R. and P. A. Victor (2018). The Energy-emissions Trap. *Ecological Economics* 151, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.004>

Slameršak, A., G. Kallis, and D. W. O'Neill (2022). Energy requirements and carbon emissions for a low-carbon energy transition. *Nature Communications* 13 (1), 6932. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33976-5>