

Perkembangan Teknologi Informasi, TFP, dan Emisi Gas CO₂ di Indonesia *The Development of Information Technology, TFP, and CO₂ Gas Emissions in Indonesia*

Ganiko Moddilani^{a,*}, & Irwandi^b

^aProgram Studi Ekonomi Pembangunan Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Ahmad Dahlan
^bJurusan Ilmu Ekonomi Fakultas Ekonomika dan Bisnis Universitas Gadjah Mada

[diterima: 23 Agustus 2019 — disetujui: 13 Desember 2019 — terbit daring: 26 Januari 2021]

Abstract

This paper examines the development of information technology, total factor productivity (TFP), and urbanization of CO₂ gas emissions in Indonesia from 1975–2014. To discuss empirically, this study uses the Autoregressive Distributed Lag (ARDL) model. There are several results in this study. Firstly, the TFP coefficient value in the short term is lower than the long term, so that the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis is not proven. This is one of the causes of rising CO₂ gas emissions. Secondly, information technology has a significant impact on the increase of CO₂ gas emissions. Thirdly, Indonesia's urbanization has reduced CO₂ gas emissions.

Keywords: ICT; CO₂; Kuznet; urbanization; TFP

Abstrak

Penelitian ini menjelaskan pengaruh perkembangan teknologi informasi, total faktor produktivitas (TFP), dan urbanisasi terhadap emisi gas CO₂ di Indonesia dari tahun 1975–2014. Untuk menguji secara empiris, penelitian ini menggunakan model *Autoregressive Distributed Lag* (ARDL). Ada beberapa hasil dalam penelitian ini. *Pertama*, koefisien nilai TFP pada jangka pendek lebih rendah daripada nilai koefisiennya pada jangka panjang sehingga penelitian ini menunjukkan bahwa hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC) tidak terbukti. Hal ini menjadi salah satu penyebab naiknya emisi gas CO₂. *Kedua*, teknologi informasi memiliki dampak yang signifikan terhadap naiknya emisi gas CO₂. *Ketiga*, urbanisasi di Indonesia mengurangi emisi gas CO₂.

Kata kunci: ICT; CO₂; Kuznet; urbanisasi; TFP

Kode Klasifikasi JEL: O2; O3; Q5

Pendahuluan

Pembangunan yang berkelanjutan tidak akan terwujud apabila tidak adanya perlindungan lingkungan hidup. Ada beberapa elemen utama untuk mengatasi permasalahan lingkungan, seperti akuntabilitas, transparansi, dan partisipasi publik yang luas melalui teknologi informasi (Chemutai, 2009). Partisipasi publik saat ini membutuhkan alat berupa teknologi informasi yang dapat digunakan

untuk mencari penyebab kerusakan lingkungan. Selain itu, teknologi informasi bisa digunakan untuk melakukan efisiensi sebuah industri. Industri 4.0 merupakan salah satu contoh penggunaan teknologi informasi dengan melakukan otomatisasi sistem produksi.

Teknologi informasi dapat memberikan dampak positif maupun negatif bagi lingkungan. Konsumsi listrik dari penggunaan teknologi informasi dapat meningkatkan emisi gas CO₂ yang dapat memberikan dampak negatif bagi lingkungan (Higón *et al.*, 2017). Sektor teknologi informasi diperkirakan menjadi penyumbang *global greenhouse gas emissions*

*Alamat Korespondensi: Gendong Kuning KG 1/133A RT/RW. 04/01 Yogyakarta 55171. E-mail: ganicko@gmail.com.

(GHG) sebesar 2 persen (Mingay, 2007). Di lain pihak, proses produksi industri, sistem transportasi, jaringan listrik, dan pembangunan kota dapat dibangun dengan menggunakan teknologi informasi yang dapat mengurangi emisi gas CO₂ (Watson *et al.*, 2012).

Perkembangan moda transportasi kendaraan bermotor meningkat dari tahun ke tahun. Peningkatan jumlah kendaraan sepeda motor merupakan yang paling tinggi di antara mobil penumpang, mobil bis, dan mobil barang. Menurut Badan Pusat Statistik (BPS, 2018), peningkatan jumlah sepeda motor dari tahun 2015 sampai dengan 2016 sebesar 6.268.815 unit. Peningkatan jumlah sepeda motor ini meningkat sebesar 6,34 persen. Menurut Hendra (2018), kemacetan dan polusi udara saat ini sebagian besar bersumber dari bertambahnya volume kendaraan setiap harinya. Perkembangan teknologi informasi memicu munculnya moda transportasi dalam jaringan (daring). Keberadaan moda transportasi daring merupakan salah satu pemicu makin banyaknya kemacetan dan polusi udara. Transportasi daring memberikan tawaran bisnis yang sangat menarik, misalnya mendapatkan bonus setelah mencapai target tertentu. Akibatnya, banyak orang kemudian beralih profesi menjadi pengemudi transportasi daring, bahkan orang tersebut tidak takut melakukan kredit mobil dan motor dikarenakan adanya jaminan pendapatan yang cukup besar.

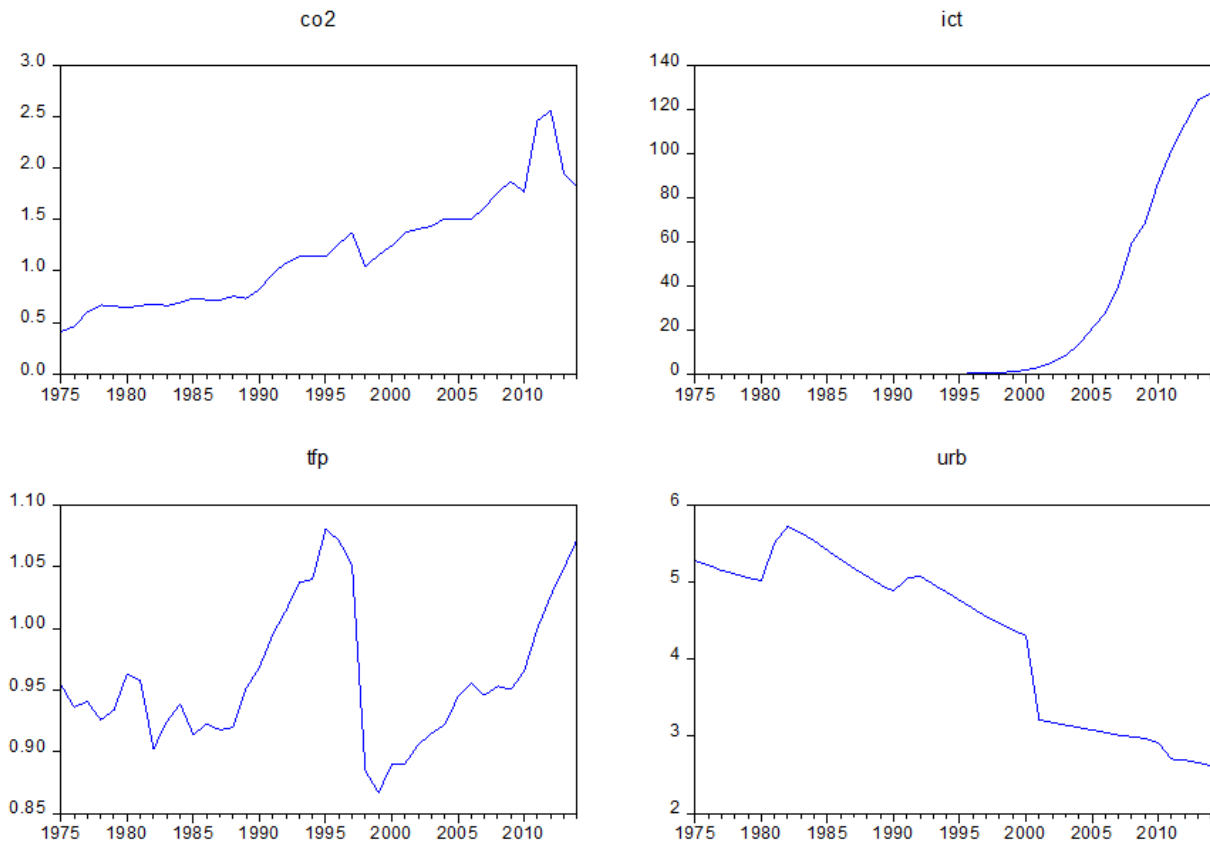
Gambar 1 menunjukkan perkembangan emisi gas CO₂, teknologi informasi, total faktor produktivitas (TFP), dan urbanisasi di Indonesia tahun 1975–2014. Jika dilihat pada Gambar 1, emisi gas CO₂ dan teknologi informasi mengalami tren peningkatan, sedangkan urbanisasi mengalami tren penurunan dari tahun ke tahun. Sementara itu, total faktor produktivitas juga mengalami tren peningkatan walaupun terjadi fluktuasi dari tahun ke tahun.

Peneliti yang lain berpendapat bahwa dampak teknologi informasi terhadap emisi gas CO₂ secara teoritis masih ambigu dan layak untuk dianalisis

secara empiris (Pamlin, 2002). Dampak positif dan negatif teknologi informasi terhadap emisi gas CO₂ belum diteliti secara komprehensif pada skala global (Plepys, 2002; Pamlin & Pahlman, 2008; Melville, 2010). Masalah isu lingkungan mengenai dampak emisi gas CO₂ merupakan salah satu topik yang akhir-akhir ini menarik untuk diteliti. Oleh karena itu, penelitian ini akan meneliti bagaimana pengaruh teknologi informasi terhadap emisi gas CO₂ di Indonesia.

Menurut Ladu & Meleddu (2014), TFP merupakan ukuran yang lebih baik untuk menghitung aktivitas pertumbuhan ekonomi daripada produk domestik bruto. Oleh karena itu, penelitian ini akan menguji validitas hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC) menggunakan TFP sebagai proksi kegiatan ekonomi, *Information and Communication Technology* (ICT) atau Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK) (teknologi informasi), dan urbanisasi sebagai variabel tambahan.

Zhang & Liu (2015) meneliti dampak industri yang menggunakan teknologi informasi terhadap emisi gas CO₂ di tingkat nasional dan regional menggunakan data panel selama periode 2000–2010. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa industri yang berbasis teknologi informasi berkontribusi mengurangi emisi gas CO₂ di Cina. Amri *et al.* (2019) meneliti pengaruh industri berbasis teknologi informasi dengan menggunakan data jumlah data berlangganan telepon seluler dan tetap per 100 orang sebagai proksi ICT terhadap emisi gas di Tunisia dengan hasil teknologi informasi tidak memiliki dampak yang signifikan terhadap emisi gas CO₂. *European Commission* (2010) meneliti hubungan antara teknologi informasi dan emisi gas CO₂ untuk sampel negara-negara Uni Eropa dan menemukan bahwa teknologi informasi secara signifikan mengurangi emisi gas CO₂. Lee & Brahma (2014) meneliti hubungan antara teknologi informasi, emisi gas CO₂, dan pertumbuhan ekonomi untuk sembilan negara *Association of Southeast Asian*



Gambar 1. Emisi Gas CO₂, Teknologi Informasi, Total Faktor Produktivitas, dan Urbanisasi di Indonesia Tahun 1975–2014

Sumber: *World Bank Indicator* (2019a,b,c,de) dan *Economic Research Federal Reserve Bank of St. Louis* (2019), diolah

Nations (ASEAN) untuk periode 1991–2009. Penelitian ini menemukan bahwa teknologi informasi memiliki dampak positif yang signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi dan emisi gas CO₂. Asongu *et al.* (2016) meneliti dampak ICT terhadap emisi CO₂. Penelitian ini menggunakan data panel untuk negara-negara di kawasan Sub-Sahara Afrika. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan telepon seluler sebagai proksi ICT memiliki dampak negatif terhadap emisi CO₂. Grossman & Krueger (1991) adalah peneliti pertama yang menggunakan konsep EKC dalam menganalisis hubungan antara emisi CO₂ dan pertumbuhan ekonomi. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi dapat memengaruhi secara positif emisi CO₂

dalam bentuk linier, tetapi bentuk kuadratnya memiliki dampak negatif pada emisi CO₂, dan penelitian tersebut memvalidasi asumsi EKC. Ekspansi pertumbuhan ekonomi menghasilkan lebih banyak polutan sebelum mencapai tingkat pertumbuhan ekonomi pada titik tertentu. Setelah itu, penambahan pertumbuhan ekonomi dapat membantu memperbaiki kualitas lingkungan. Hipotesis ini dapat diuji dengan membandingkan dampak jangka pendek dan panjang dari Produk Domestik Bruto (PDB) terhadap emisi CO₂. EKC diterima jika koefisien indikator PDB dalam jangka panjang lebih rendah dari yang jangka pendek. Selain itu, hipotesis ini dapat diuji dengan mengintegrasikan ke dalam model yang sama, yaitu PDB dan kuadrat

PDB. Dalam hal ini, EKC diverifikasi jika koefisien PDB positif dan koefisien kuadrat PDB negatif.

Dalam penelitian Amri *et al.* (2019) di Tunisia, jika Tunisia ingin memperbaiki lingkungan negaranya, maka perlu meningkatkan TFP. TFP merupakan ukuran inovasi dan perubahan teknis dalam perekonomian. Di Tunisia, pengeluaran untuk *research and development* masih lebih rendah jika dibandingkan dengan negara-negara *Middle East and North Africa* (MENA) lainnya. Statistik dan laporan *World Bank* tentang pembangunan di Tunisia menunjukkan bahwa pengeluaran Tunisia dalam *research and development* ilmiah tidak pernah melebihi 0,668 persen dari PDB antara tahun 2002 dan 2015.

Metode

Data

Penelitian ini bertujuan untuk menguji secara empiris asumsi EKC untuk hubungan antara kegiatan ekonomi (TFP), emisi gas CO₂, investasi ICT, dan urbanisasi untuk wilayah negara Indonesia pada rentang tahun 1975–2014. Untuk melakukan penelitian tersebut, maka data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang berasal dari *World Bank Indicators* (WBI) *database*. Data TFP yang digunakan sebagai proksi kegiatan ekonomi dikumpulkan dari sumber data *economic research federal reserve Bank of ST. Louis*. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1, sedangkan statistik deskriptif dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

Model dan Metodologi Empiris

Hipotesis EKC diuji dan diteliti dengan mengintegrasikan TFP, ICT, dan URB sebagai penentu emisi CO₂. Dalam kerangka liniernya, *Jurnal Ekonomi dan Pembangunan Indonesia* Vol. 21 No. 1 Januari 2021, hlm. 31–40

model EKC dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\ln CO_{2t} = \beta_0 + \beta_1 \ln TFP_t + \beta_2 \ln ICT_t + \beta_3 \ln URB_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

Penelitian ini menggunakan model *Autoregressive Distributed Lag* (ARDL) yang dikembangkan oleh Pesaran *et al.* (2001) untuk menguji validitas hipotesis EKC. Pendekatan yang disebutkan dapat diterapkan hanya untuk variabel yang terintegrasi orde 1 atau nol (I (0) atau I (1)) dan bukan untuk variabel yang terintegrasi orde dua (I (2)).

Berdasarkan Persamaan (1), model pendekatan ARDL dapat disajikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Delta \ln CO_{2t} = & \beta_0 + \sum_{i=0}^{r_1} \alpha_1 \Delta \ln CO_{2t-1} \\ & + \sum_{i=0}^{r_1} \alpha_2 \Delta \ln TFP_{t-1} + \sum_{i=0}^{r_2} \alpha_3 \Delta \ln ICT_{t-1} \\ & + \sum_{i=0}^{r_3} \alpha_4 \Delta \ln URB_{t-1} + \beta_1 \ln CO_{2t-1} \\ & + \beta_2 \ln TFP_{t-1} + \beta_3 \ln ICT_{t-1} \\ & + \beta_4 \ln URB_{t-1} + \omega_t \end{aligned} \quad (2)$$

dengan ω_t adalah *error term*, Δ adalah operator *first difference*, serta r_1 , r_2 , r_3 , dan r_4 adalah jumlah *lag* yang terkait dengan masing-masing variabel.

Penelitian ini menggunakan metode pemilihan *lag*, *Akaike Information Criteria* (AIC). Metode ini selalu digunakan untuk memilih urutan *lag* optimal dari setiap variabel dalam *first difference* dan diakui sebagai *robust*.

Setelah model ARDL ditentukan, selanjutnya akan dilakukan tes kointegrasi dalam model ARDL. Dalam penelitian ini akan menggunakan tiga langkah untuk menguji hubungan ekuilibrium jangka panjang. Langkah pertama adalah melakukan estimasi model ARDL dengan metode kuadrat terkecil biasa. Langkah kedua adalah menghitung *F-Statistic* dengan hipotesis nol tanpa kointegrasi ($H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$)

Tabel 1. Keterangan Variabel

Variabel	Simbol	Keterangan	Satuan
Emisi CO ₂		Emisi CO ₂ per kapita. Emisi karbon dioksida adalah emisi yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil dan produksi semen. Emisi ini terdiri dari karbon dioksida yang dihasilkan selama konsumsi bahan bakar padat, cair, dan gas serta pembakaran gas.	Metrik ton
Pertumbuhan Urbanisasi	URB	Populasi perkotaan menunjukkan orang-orang yang tinggal di daerah perkotaan. Populasi ini dihitung dengan menggunakan estimasi populasi <i>World Bank</i> dan rasio perkotaan dari <i>United Nations World Urbanisation Prospects</i>	%
Investasi ICT	ICT	Jumlah data berlangganan telepon seluler dan tetap per 100 orang, sebagai proksi ICT	per 100 orang
Total faktor produktivitas	TFP	Indeks total faktor produktivitas untuk Indonesia	Indeks

Tabel 2. Deskriptif Statistik

Statistik	LNCO2	LNTFP	LNICT	LNURB
Mean	0,057332	-0,042712	-0,319327	1,427840
Median	0,132784	-0,053501	0,062635	1,571744
Maksimum	0,941642	0,077229	4,849009	1,743976
Minimum	-0,884448	-0,143098	-6,827,818	0,959814
Std. Dev.	0,455759	0,057870	4,032387	0,268566
Skewness	-0,029336	0,585425	-0,166354	-0,556186
Kurtosis	2,119320	2,417488	1,551966	1,603805
Jarque-Bera	1,298398	2,850351	2,851351	5,311221
Probabilitas	0,522464	0,240466	0,240346	0,070256
Sum	2,293297	-1,708,476	-9,899,149	57,11361
Sum Sq. Dev.	8,100935	0,130610	487,8043	2,812987

Sumber: *World Bank Indicator* (2019a,b,c,d,e) dan *Economic Research Federal Reserve Bank of St. Louis* (2019), diolah

terhadap hipotesis alternatif kointegrasi ($H_a: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq 0$). Langkah ketiga adalah membandingkan *F-Statistic* yang dihitung dengan dua nilai batas kritis berdasarkan Pesaran *et al.* (2001).

Jika nilai *F-Statistic* lebih rendah dari nilai kritis *lower upper*, artinya persamaan tersebut tidak ada kointegrasi. Namun, apabila nilai *F-Statistic* lebih tinggi dari nilai kritis *upper*, artinya persamaan tersebut ada hubungan kointegrasi antara variabel.

Koefisien jangka pendek disimpulkan dari persamaan berikut:

$$\Delta \ln CO_2_t = \gamma_0 + \sum_{i=0}^{m_1} \gamma_{1i} \Delta \ln CO_2_{t-1} + \sum_{i=0}^{m_2} \gamma_{2i} \Delta \ln TFP_{t-1} + \sum_{i=0}^{m_3} \gamma_{3i} \Delta \ln ICT_{t-1} + \sum_{i=0}^{m_4} \gamma_{4i} \Delta \ln URB_{t-1} + ECT_{t-1} + u_t \quad (3)$$

dengan u adalah *error term*, Δ adalah operator *first difference*, $m_1 - m_5$ adalah jumlah *lag* dari setiap variabel pada *first difference* yang dipilih berdasarkan AIC, $\gamma_{1i} - \gamma_{3i}$ adalah parameter jangka pendek pada setiap variabel, dan ECT_{t-1} adalah parameter *error correction*.

Penelitian ini menguji stabilitas model ARDL dengan menggunakan *cumulative sum of recursive residuals test* (CUSUM) dan *cumulative sum of square of recursive residuals test* (CUSUMQ). Selanjutnya, validitas model ARDL diuji dengan menggunakan uji *serial correlation*, heteroskedastisitas, dan normalitas.

Hasil dan Analisis

Sebelum melakukan estimasi, perlu menentukan ordo integrasi untuk semua variabel. Hasil uji *unit root* yang diperlihatkan dalam Tabel 3 menunjukkan

bahwa variabel emisi CO₂ stasioner pada derajat I (0). Sementara itu, variabel emisi CO₂, urbanisasi, investasi ICT, dan TFP stasioner pada I (1). Berdasarkan hasil dari uji *unit roots*, maka model yang baik untuk digunakan adalah ARDL.

Kointegrasi ARDL

Berdasarkan hasil pada Tabel 4, nilai F-statistik (3,596) lebih rendah daripada nilai *upper* dan *lower critical bound* pada tingkat signifikansi 1 persen. Hal ini mengindikasikan bahwa variabel emisi CO₂, TFP, ICT, dan urbanisasi tidak memiliki hubungan kointegrasi jangka panjang. Sementara itu, pada tingkat signifikansi 10 persen nilai F-statistik lebih tinggi daripada nilai *upper* dan *lower critical bound*, yang artinya variabel emisi CO₂, TFP, ICT, dan urbanisasi memiliki hubungan kointegrasi jangka panjang.

Hasil Uji Tes Diagnosis

Dalam Tabel 5 tersebut, hasil uji *serial correlation* menunjukkan nilai probabilitas *chi-square* = 0,359 > 0,05 sehingga dapat disimpulkan dalam model tersebut tidak mengalami masalah *serial correlation*. Sementara hasil uji heteroskedastisitas menunjukkan nilai probabilitas *chi-square* = 0,804 > 0,05 sehingga dapat disimpulkan dalam model tersebut tidak mengalami masalah heteroskedastisitas. Begitu juga hasil uji normalitas menunjukkan nilai probabilitas = 0,063 > 0,05 sehingga dapat disimpulkan data dalam model tersebut berdistribusi normal.

Uji CUSUM dan CUSUMSQ

Pada Gambar 2 ditunjukkan bahwa hipotesis nol stabilitas parameter untuk uji stabilitas CUSUM tidak dapat ditolak pada signifikansi 5 persen *critical bound*, sedangkan uji stabilitas CUSUMSQ garisnya sedikit melintasi batas bawah *critical bound* untuk

periode tahun 2008–2010. Hal tersebut secara statistik mengonfirmasi bahwa modelnya stabil dan tidak ada perubahan sistematis yang teridentifikasi pada tingkat signifikansi 10 persen.

Hasil Estimasi Jangka Pendek dan Panjang

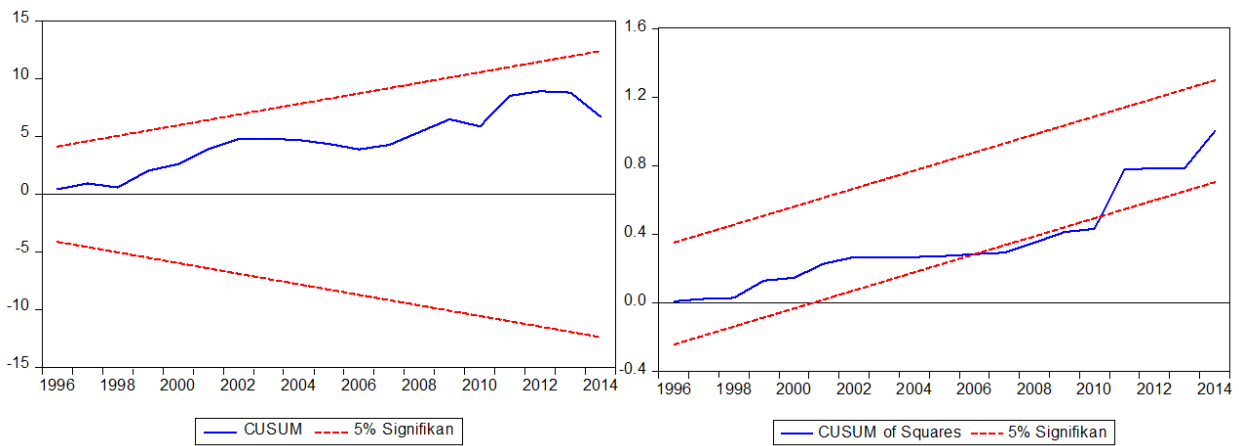
Hasil estimasi model ARDL disajikan dalam Tabel 5. Seperti yang terlihat pada Tabel 5, koefisien nilai TFP pada jangka pendek lebih rendah daripada nilai koefisien TFP pada jangka panjang sehingga hipotesis EKC tidak terbukti pada kasus di Indonesia. Hal ini dikarenakan level TFP Indonesia belum mencapai level yang mampu membuat hipotesis EKC terbukti. Artinya, level TFP Indonesia belum mampu melindungi dan meningkatkan kualitas lingkungan. Untuk meningkatkan kualitas lingkungan Indonesia, maka perlu meningkatkan TFP. TFP dapat ditingkatkan dengan meningkatkan investasi di bidang *research and development*.

Pada Gambar 3 ditunjukkan bahwa pengeluaran untuk *research and development* Indonesia pada tahun 2013 hanya 3 persen dibandingkan dengan seluruh negara ASEAN. Hal ini menunjukkan kualitas TFP di negara Indonesia masih termasuk rendah. Rendahnya TFP Indonesia menjadi salah satu penyebab kurang baiknya kualitas lingkungan.

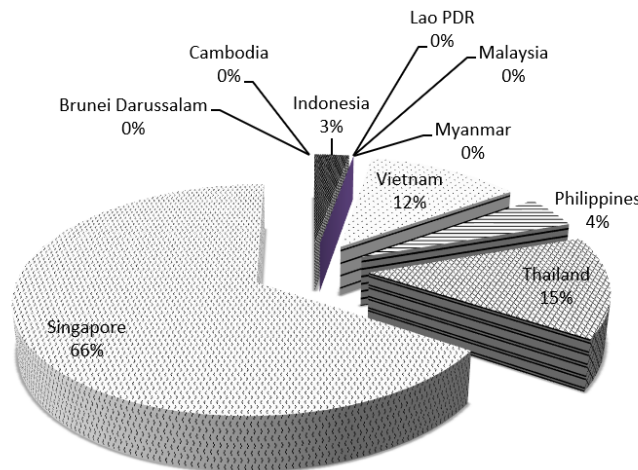
Tabel 3. Hasil Uji Unit Roots

Variabel	Dickey Fuller-GLS		Augmented Dickey-Fuller		Phillips-Perron	
	Intercept and trend	Intercept	Intercept and trend	Intercept	Intercept and trend	Intercept
ln CO2	-3,9596***	-0,1862	-4,6389***	-1,7970	-3,5336**	-1,8438
ln TFP	-2,4125	-2,2191	-2,2601	-2,1203	-1,9069	-1,7123
ln ICT	-0,9275	-0,5736	0,7102	-2,0198	0,2618	-1,4953
ln URB	-1,5447	0,7593	-1,9013	0,4172	-1,9235	0,3752
Δ ln CO2	-5,5483***	-5,6006***	-5,9943***	-6,0639***	-6,0383***	-6,3607***
Δ ln TFP	-4,9658***	-4,7602***	-4,8711***	-4,8828***	-4,8518***	-4,8640***
Δ ln ICT	-3,8096***	-3,0003***	-4,0159***	-3,3891**	-4,0673**	-3,4458**
Δ ln URB	-5,9050***	-5,6538***	-5,7650***	-5,5958***	-5,7520***	-5,5958***

Keterangan: *** signifikan pada taraf 1%
 ** signifikan pada taraf 5%
 * signifikan pada taraf 10%



Gambar 2. Plot CUSUM dan CUSUMSQ



Gambar 3. Research and Development Expenditure (% of GDP) Tahun 2013
 Sumber: World Bank Indicator (2019a,b,c,d,e), diolah

Tabel 4. Hasil Uji *Bound Cointegration*

Model estimasi	$\ln CO_2_t = f(\ln TFP_t, \ln ICT_t, \ln URB_t)$
F-statistik	3,596
Nilai I(0)	3,65
Nilai I(1)	4,66
F-statistik	3,596*
Nilai I(0)	2,37
Nilai I(1)	3,22

Keterangan: * signifikan pada taraf 10%

Tabel 5. Hasil Uji *Serial Correlation*, Heteroskedastisitas, dan Normalitas

Tes diagnosa	Nilai probabilitas
Uji <i>serial correlation</i>	0,359
Uji heteroskedastisitas	0,804
Uji normalitas	0,063

Terdapat beberapa literatur yang membahas mengenai dampak urbanisasi terhadap karbon emisi CO₂. *Pertama*, teori ekologi modern menyatakan bahwa proses modernisasi kota menjadi penyebab utama naiknya emisi gas CO₂ (Mol & Spaargaren, 2000). *Kedua*, teori *Urbanisation Environmental Transition* menyatakan bahwa urbanisasi tidak memberikan efek apapun terhadap emisi gas CO₂ (Bai & Imura, 2000). *Ketiga*, urbanisasi menyebabkan berkurangnya emisi gas CO₂ sebagai akibat dari meningkatnya infrastruktur (Capello & Camagni, 2000). Hasil dari penelitian ini menyatakan bahwa pertumbuhan urbanisasi yang makin menurun menyebabkan berkurangnya emisi gas CO₂. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa dampak naiknya pertumbuhan urbanisasi dapat menyebabkan naiknya emisi gas CO₂ (Mol & Spaargaren, 2000; Wang *et al.*, 2016).

Hasil estimasi jangka panjang juga menunjukkan hasil yang signifikan antara dampak ICT dengan emisi gas CO₂. Hasil ini dapat dijelaskan melalui Gambar 4 yang menunjukkan peningkatan yang pesat pada pertumbuhan ICT Indonesia dari tahun 2000–2017. Jika dibandingkan dengan negara tetangga Indonesia, seperti Singapura yang pada awalnya memimpin dalam bidang ICT, akhirnya pada tahun 2017, Indonesia menjadi pengguna teknologi informasi terbanyak di antara empat negara

tersebut. Penggunaan teknologi informasi yang meningkat ini dapat menyebabkan peningkatan emisi gas CO₂. Keberadaan teknologi informasi menjadi salah satu penyebab meningkatnya aktivitas perjalanan penduduk, apalagi dengan adanya aplikasi ojek daring. Menurut Hendra (2018), keberadaan moda transportasi daring merupakan salah satu pemicu makin banyaknya kemacetan dan polusi udara. Moda transportasi daring ini masih membutuhkan kendaraan yang membutuhkan sumber daya energi yang berasal dari bahan bakar fosil yang dapat menyebabkan naiknya emisi gas CO₂. Hasil ini sejalan dengan penelitian Lee & Brahma (2014) dan Zhang & Liu (2015), namun bertentangan dengan hasil penelitian Asongu *et al.* (2016) dan Amri *et al.* (2019).

Simpulan

Penelitian ini menganalisis dan menguji hipotesis EKC untuk kasus di Indonesia dengan menggunakan data *time series* dalam rentang waktu antara tahun 1975–2014. Penelitian ini memiliki kontribusi secara empiris dengan memperhitungkan urbanisasi, TFP, dan ICT sebagai tambahan persamaan EKC.

Secara empiris, penelitian ini menghasilkan beberapa temuan empiris dan rekomendasi kebijakan. *Pertama*, koefisien nilai TFP pada jangka pendek lebih rendah daripada nilai koefisien TFP pada jangka panjang sehingga hipotesis EKC tidak terbukti pada kasus di Indonesia. Hal ini yang menjadi salah satu penyebab naiknya emisi gas CO₂. *Kedua*, ICT dalam jangka panjang memiliki dampak yang signifikan terhadap naiknya emisi gas CO₂, walaupun nilai koefisiennya rendah. Saran bagi pemerintah Indonesia adalah sebaiknya meningkatkan lagi kualitas dan kuantitas ICT agar dapat berkontribusi menurunkan emisi gas CO₂ dalam jangka panjang. Pemerintah juga perlu membangun infrastruktur yang berbasis pada teknologi informasi agar dapat

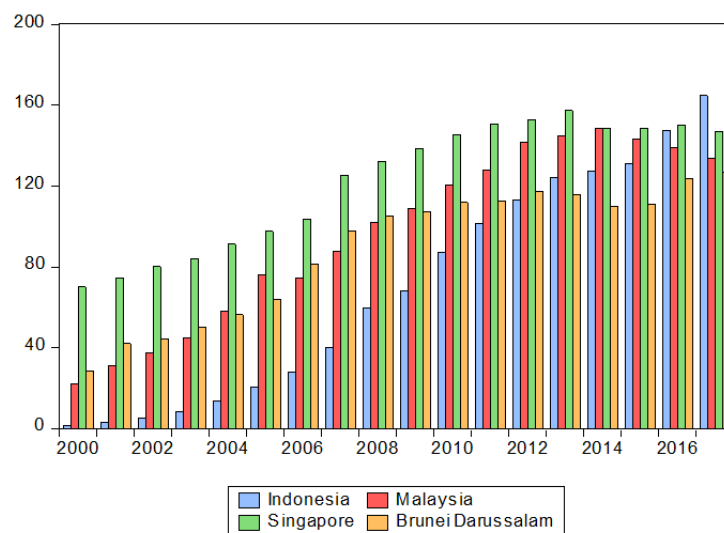
Tabel 6. Hasil Estimasi Jangka Pendek dan Panjang ARDL(4, 3, 0, 1)

Variabel	Koefisien	Standard error	T-statistik	p-Values
Analisis jangka panjang				
Konstanta	0,952**	0,423	2,247	0,036
lnTFP	1,766***	0,361	4,889	0,001
lnICT	0,049**	0,019	2,620	0,016
lnURB	-0,530*	0,304	-1,740	0,098
Analisis jangka pendek				
lnCO2(-1)	1,376***	0,299	4,593	0,000
lnCO2(-2)	0,439	0,265	1,651	0,115
lnCO2(-3)	0,720***	0,173	4,162	0,000
lnTFP	1,723**	0,379	4,536	0,000
lnTFP(-1)	-2,616**	0,604	-4,327	0,048
lnTFP(-2)	-1,266***	0,601	-2,103	0,000
lnURB	-1,863***	0,324	-5,740	0,000
ECT(-1)	-1,699***	0,364	0,364	0,000
R2	0,971			
Adjusted R2	0,955			
F-statistik	59,467***			0,000

Keterangan: *** signifikan pada taraf 1%

** signifikan pada taraf 5%

* signifikan pada taraf 10%

**Gambar 4.** Mobile Cellular Subscriptions (per 100 Orang) sebagai Proksi ICT

Sumber: World Bank Indicator (2019a,b,c,d,e), diolah

meningkatkan efisiensi transportasi. *Ketiga*, urbanisasi negara Indonesia yang mengalami penurunan dari tahun ke tahun memiliki dampak berkurangnya emisi gas CO₂, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang.

Keterbatasan dalam penelitian ini adalah hanya dapat menganalisis dampak teknologi informasi terhadap emisi gas CO₂ di seluruh Indonesia. Se-

mentara itu, penggunaan teknologi informasi setiap daerah dapat berbeda. Oleh karena itu, untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat difokuskan untuk daerah Pulau Jawa atau di luar Pulau Jawa.

Daftar Pustaka

- [1] Amri, F., Zaied, Y. B., & Lahouel, B. B. (2019). ICT, total factor productivity, and carbon dioxide emissions in Tunisia. *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 212-217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.05.028>.
- [2] Asongu, S., El Montasser, G., & Toumi, H. (2016). Testing the relationships between energy consumption, CO₂ emissions, and economic growth in 24 African countries: a panel ARDL approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(7), 6563-6573. doi: 10.1007/s11356-015-5883-7.
- [3] Bai, X., & Imura, H. (2000). A comparative study of urban environment in East Asia: stage model of urban environmental evolution. *International Review for Environmental Strategies*, 1(1), 135-158.
- [4] Capello, R., & Camagni, R. (2000). Beyond optimal city size: an evaluation of alternative urban growth patterns. *Urban Studies*, 37(9), 1479-1496. doi: <https://doi.org/10.1080/00420980020080221>.
- [5] Economic Research Federal Reserve Bank of St. Louis. (2019). *Total factor productivity at constant national prices for Indonesia*. Diakses 22 Januari 2019 dari <https://fred.stlouisfed.org/series/RTFPNAIDA632NRUG>.
- [6] European Commission. (2010). *ICT and e-Business for an innovative and sustainable economy: 7th Synthesis Report of the Sectoral e-Business Watch (2010)*. Diakses 22 Januari 2019 dari <https://www.empirica.com/themen/ebusiness/documents/EBR09-10.pdf>.
- [7] Higón, D. A., Gholami, R., & Shirazi, F. (2017). ICT and environmental sustainability: A global perspective. *Telematics and Informatics*, 34(4), 85-95. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tele.2017.01.001>.
- [8] Ladu, M. G., & Meleddu, M. (2014). Is there any relationship between energy and TFP (total factor productivity)? A panel cointegration approach for Italian regions. *Energy*, 75, 560-567. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.018>.
- [9] Lee, J. W., & Brahmarsene, T. (2014). ICT, CO₂ emissions and economic growth: evidence from a panel of ASEAN. *Global Economic Review*, 43(2), 93-109. doi: <https://doi.org/10.1080/1226508X.2014.917803>.
- [10] Melville, N. P. (2010). Information systems innovation for environmental sustainability. *MIS Quarterly*, 34(1), 1-21.
- [11] Mol, A. P. J., & Spaargaren, G. (2000). Ecological modernisation theory in debate: A review. *Environmental Politics*, 9(1), 17-49. doi: <https://doi.org/10.1080/09644010008414511>.
- [12] Pamlin, D. (Ed.) (2002). *Sustainability at the speed of light: Opportunities and challenges for tomorrow's society*. WWF Sweden. Diakses 22 Januari 2019 dari https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/wwf_ic.1.pdf.
- [13] Pamlin, D., & Pahlman, S. (2008). *Outline for the first global IT strategy for CO₂ reductions: A billion tonnes of CO₂ reductions and beyond through transformative change*. WWF Sweden. Diakses 22 Januari 2019 dari https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/global_strategy_for_the_1st_billion_tonnes_with_ict_by_wwf.pdf.
- [14] Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, 16(3), 289-326. doi: <https://doi.org/10.1002/jae.616>.
- [15] Plepys, A. (2002). The grey side of ICT. *Environmental Impact Assessment Review*, 22(5), 509-523. doi: [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(02\)00025-2](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(02)00025-2).
- [16] Wang, Y., Li, L., Kubota, J., Han, R., Zhu, X., & Lu, G. (2016). Does urbanization lead to more carbon emission? Evidence from a panel of BRICS countries. *Applied Energy*, 168, 375-380. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.105>.
- [17] Watson, R. T., Corbett, J., Boudreau, M. C., & Webster, J. (2012). An information strategy for environmental sustainability. *Communications of the ACM*, 55(7), 28-30. doi: <https://doi.org/10.1145/2209249.2209261>.
- [18] World Bank Indicator. (2019a). *CO₂ emissions (kt) – Indonesia*. Diakses 22 Januari 2019 dari <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT?locations=ID>.
- [19] World Bank Indicator. (2019b). *Mobile cellular subscriptions (per 100 people) – Indonesia*. Diakses 22 Januari 2019 dari <https://data.worldbank.org/indicator/IT.CEL.SETS.P2?locations=ID>.
- [20] World Bank Indicator. (2019c). *Mobile cellular subscriptions (per 100 people) – Indonesia, Malaysia, Singapore, Brunei Darussalam*. Diakses 22 Januari 2019 dari <https://data.worldbank.org/indicator/IT.CEL.SETS.P2?locations=ID>.
- [21] World Bank Indicator. (2019d). *Research and development expenditure (% of GDP) – Indonesia*. Diakses 22 Januari 2019 dari <https://data.worldbank.org/indicator/GB.XPD.RSDV.GD.ZS?locations=ID>.
- [22] World Bank Indicator. (2019e). *Urban population growth (annual %) – Indonesia*. Diakses 22 Januari 2019 dari <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.GROW?locations=ID>.
- [23] Zhang, C., & Liu, C. (2015). The impact of ICT industry on CO₂ emissions: a regional analysis in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 12-19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.011>.