

# Mampukah Pembangkit Listrik Tenaga Air Mendorong Green Economy untuk Indonesia?

Siti Allifah<sup>1</sup>, Pini Wijayanti<sup>2</sup>, dan Yusman Syaukat<sup>3</sup>

<sup>123</sup>Program Studi Ekonomi Sumberdaya dan Lingkungan, Fakultas Ekonomi dan Manajemen, Institut Pertanian Bogor, e-mail: [pini\\_wijayanti@apps.ipb.ac.id](mailto:pini_wijayanti@apps.ipb.ac.id)

## ABSTRAK

Perhatian terhadap dampak negatif pertumbuhan ekonomi terhadap lingkungan telah memunculkan paradigma *green economy*. *Green energy* dapat dicapai melalui penggunaan PLTA. Guna menganalisis peran PLTA dalam mendorong *green energy* di Indonesia, penelitian ini menggunakan metode *the Autoregressive Distributed Lag* (ARDL). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan produksi listrik dari PLTA akan menurunkan kerusakan lingkungan, sedangkan konsumsi bahan bakar fosil akan membahayakan lingkungan dalam jangka pendek maupun panjang. Indonesia masih berada di posisi *scale effect*, artinya kerusakan lingkungan dengan indikator emisi CO<sub>2</sub> terus meningkat akibat aktivitas perekonomian. Selain itu, hasil kausalitas Granger mengungkapkan bahwa hubungan dua arah terjadi pada PDB dengan total emisi CO<sub>2</sub>. Artinya, pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan dibutuhkan Indonesia. Selain itu, hubungan dua arah juga terjadi pada produksi listrik dari PLTA dengan emisi CO<sub>2</sub>, sementara kausalitas searah terjadi dari PDB ke produksi listrik dari PLTA, konsumsi batu bara ke PDB, dan konsumsi minyak bumi dan gas alam ke emisi CO<sub>2</sub>. Pemerintah Indonesia didorong untuk menetapkan kebijakan agar mengurangi konsumsi bahan bakar fosil yang berlebihan, meningkatkan minat investor pada EBT khususnya pada PLTA, melakukan ekspansi ekonomi untuk mencapai titik balik pertumbuhan yang diperkirakan disertai kebijakan terkait lingkungan.

**Kata kunci:** bahan bakar fosil, emisi, pembangunan berkelanjutan, PLTA

## ABSTRACT

Attention to the negative impact of economic growth on the environment has emerged in the green economy paradigm. The utilization of hydropower can achieve green energy. To analyze its role in driving Indonesia's green energy, the Autoregressive Distributed Lag (ARDL) method was employed. The results show that increased electricity production from hydropower will reduce environmental damage. Meanwhile, the use of fossil fuels will harm the environment for short and long periods. Indonesia is still in a scale of effect because environmental damage indicated by CO<sub>2</sub> emission continuously increases due to economic activities. In addition, Granger causality results reveal that there is a bidirectional relationship between GDP and CO<sub>2</sub> emissions. This means that Indonesia needs sustainable economic growth. In addition, there is a bidirectional relationship between electricity production from hydropower and CO<sub>2</sub> emissions. At the same time, a unidirectional causality occurs from GDP to electricity production from hydropower, coal consumption to GDP, and consumption of oil and natural gas to CO<sub>2</sub> emissions. The Indonesian government is encouraged to establish policies to reduce consumption of fossil fuels, increase investor interest in RE, and carry out economic expansion to reach the expected turning point in growth accompanied by policies related to the environment.

**Keywords:** emission, fossil fuel, hydropower, sustainable development

**Citation:** Alifah, S., Wijayanti, P, dan Syaukat, Y. (2023). Mampukah Pembangkit Listrik Tenaga Air Mendorong Green Economy untuk Indonesia?. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(3), 647-658, doi:10.14710/jil.21.3.647-658

## 1. Pendahuluan

Kerusakan lingkungan dan rendahnya kesadaran masyarakat terhadap pentingnya menjaga lingkungan mendorong perlunya penerapan pembangunan berkelanjutan secara konkrit dan sistematis. Kerusakan lingkungan terjadi karena tingginya tingkat eksploitasi sumber daya alam untuk memenuhi kepentingan ekonomi tanpa diiringi kesadaran menjaga lingkungan (Tsujino *et al.*, 2016; Dutu, 2016). Pilar lingkungan ini merupakan salah

satu dari tiga pilar dalam pembangunan berkelanjutan (sosial, ekonomi, dan lingkungan) yang masih terkendala dalam penerapannya di Indonesia (Bappenas, 2014). Hal ini terjadi karena penegakan hukum belum intensif serta tidak adanya indikator terukur dan nilai dampak lingkungan dari *trade-off* antara kualitas lingkungan dan ekonomi (Bappenas, 2014).

Sejalan dengan penerapan pembangunan berkelanjutan, konsep *green economy* dibentuk untuk

mencapai pembangunan berkelanjutan secara bertahap. Konsep ini menekankan ekonomi yang terus tumbuh dengan mengutamakan keadilan sosial dan tanpa mengabaikan perlindungan lingkungan, khususnya fungsi ekosistem dan keragaman hayati (Bappenas, 2014). Selain itu, proses produksi dan konsumsi secara berkelanjutan diterapkan sebagai langkah internalisasi dampak lingkungan dari proses konsumsi dan produksi (Bappenas, 2014). Di sisi produksi, proses tersebut dilakukan melalui berbagai bidang seperti pertanian dan energi dan pertambangan. Di sisi konsumsi, proses ini dilakukan dari tingkat individu dan rumah tangga hingga perusahaan.

Khususnya di sektor energi, penerapan ekonomi hijau masih jauh dari harapan karena ketergantungan pada sumber energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam masih tinggi. Hal ini terjadi dalam proses penambangan, pengolahan menjadi bahan bakar, dan penggunaan yang berdampak pada peningkatan emisi GRK, khususnya emisi CO<sub>2</sub>. Emisi CO<sub>2</sub> merupakan jenis emisi GRK paling dominan di sektor energi Indonesia dengan kontribusi sebesar 93,87% pada tahun 2016 (KESDM, 2017). Di sisi lain, Indonesia memiliki potensi sumber energi terbarukan (EBT) yang besar, seperti tenaga air, matahari, angin, maupun bahan bakar nabati (BNN) yang belum banyak direalisasikan (Bappenas, 2014). Karena itu, konsep energi berkelanjutan (*green energy*) harus diterapkan untuk mengurangi ketergantungan bahan bakar fosil melalui dua aspek, yaitu aspek penyediaan dan penggunaan.

Salah satu penerapan *green economy* adalah pemanfaatan EBT. Namun, pemanfaatan EBT di Indonesia masih menunjukkan capaian yang rendah. Kapasitas terpasang pembangkit listrik EBT di tahun 2015, hanya 2% dari total potensi EBT di Indonesia yaitu sebesar 443.208 MW dan capaian bauran EBT di tahun 2021 baru mencapai 11,70% dengan realisasi penambahan kapasitas terbesar pada PLTA, yaitu 320 MW (Perpes, 2017; DJEBTKE, 2021).

Bauran energi merupakan komposisi setiap jenis energi primer baik fosil maupun nonfosil yang dikonsumsi dalam suatu negara dan merepresentasikan tingkat sustainabilitas energi (DEN, 2015). Berdasarkan PP No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, Indonesia menargetkan EBT setidaknya 23% di tahun 2025 dan 31% di tahun 2050 (DJPPPI, 2017). Target ini setara dengan 45,20 GW pembangkit listrik EBT di tahun 2025 yang terdiri dari Pembangkit Listrik Panas Bumi (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), PLTA, dan lainnya.

Pengembangan EBT berkontribusi pada bauran energi sekaligus akan menurunkan emisi CO<sub>2</sub> yang dapat dievaluasi secara spesifik menurut jenis EBT, khususnya PLTA. Dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030, PLTA merupakan EBT yang memiliki target terbesar dalam penambahan kapasitas pembangkit listrik Indonesia

periode 2021-2030, yaitu sebesar 10,40 GW atau 25,6% dari kapasitas total (PLN, 2021). PLTA memberikan dampak positif bagi lingkungan seperti sumber pasokan air, pengendalian banjir, dan rekreasi, namun dapat berdampak negatif juga pada lingkungan, contohnya terganggunya aliran sungai dan potensi banjir bila terjadi kegagalan konstruksi waduk serta pengaruh dari cuaca ekstrim (Tahseen dan Karney, 2017). Di sisi lain, PLTA memiliki keandalan yang lebih tinggi dibandingkan PLTS, karena biaya investasi pembangunan serta biaya perawatan dan pengoperasian yang rendah (Xu *et al.* 2018; Hartono *et al.*, 2020).

Potensi dampak negatif PLTA terhadap lingkungan memicu berbagai perdebatan dalam aspek keberlanjutan. Salah satunya adalah pendapat bahwa tenaga air memiliki dampak negatif pada lingkungan dan sosial (Degefu *et al.*, 2015). Pendapat itu tidak terkait dengan terbarukan melainkan keberlanjutan yang menjadi kewajiban pemerintah untuk memperhatikan aspek keberlanjutan pada proyek PLTA (Frey dan Linke, 2002). Walau demikian, PLTA telah terbukti memberikan manfaat yang besar pada berbagai sektor serta mendukung pertumbuhan ekonomi dan pembangunan berkelanjutan contohnya di Perancis (Branche, 2017; Nautiyal dan Goel, 2020).

Penelitian terdahulu telah banyak menganalisis pengaruh PLTA serta konsumsi bahan bakar fosil terhadap emisi CO<sub>2</sub>. Secara umum, konsumsi bahan bakar fosil akan meningkatkan emisi CO<sub>2</sub> yang kemudian menurunkan kualitas lingkungan karena polusi udara. Sedangkan, EBT - salah satunya PLTA, dapat meningkatkan kualitas lingkungan secara bertahap. Hal ini ditunjukkan oleh Ridzuan *et al.* (2020) di Thailand, Malaysia, dan Indonesia. Selanjutnya, Murshed *et al.* (2021) melakukan penelitian dengan menggunakan variabel konsumsi bahan bakar fosil yang dibagi atas konsumsi energy dari batu bara, gas alam, minyak bumi, dan *liquefied petroleum gas* (LPG) di Bangladesh. Konsumsi dari batu bara dan minyak bumi menunjukkan pengaruh negatif pada kualitas lingkungan di Bangladesh. Penelitian-penelitian terdahulu menggunakan metode yang sama, yaitu *Autoregressive Distributed Lag* (ARDL). Metode ARDL digunakan untuk memprediksi pengaruh jangka pendek dan panjang dari variabel independen terhadap variabel dependen yang digunakan pada penelitian tersebut. Metode ini dipilih karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode lain seperti dapat digunakan pada variabel-variabel yang terintegrasi dari urutan yang berbeda dan dapat digunakan pada sampel yang kecil (Pesaran *et al.*, 2001). Oleh karena itu, metode ini sesuai dengan sifat kumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini.

Penggunaan teknologi yang lebih modern dan bersih seperti PLTA diprediksi akan menurunkan pencemaran lingkungan sebagai dampak pertumbuhan ekonomi (Murshed *et al.*, 2021). Dalam hipotesis EKC, pertumbuhan ekonomi akan

meningkatkan pencemaran lingkungan dalam jangka pendek namun seiring meningkatnya perekonomian dalam jangka panjang akan menurunkan pencemaran tersebut (Ozatac *et al.*, 2017). Adanya pengembangan PLTA diharapkan dapat memperbaiki kualitas lingkungan di Indonesia dalam jangka pendek maupun panjang. Hal ini disebabkan oleh adanya pengaruh dari pengembangan teknologi yang rendah emisi pada hubungan jangka pendek maupun panjang (Ali *et al.*, 2021). Artinya, teknologi merupakan penggerak utama bentuk EKC karena dapat menentukan kecepatan dan waktu untuk mencapai titik balik EKC (Du dan Xie, 2020).

Terdapat empat hubungan kausalitas antara pertumbuhan ekonomi dan konsumsi energi dalam literatur ekonomi energi. Pandangan pertama berpendapat pertumbuhan ekonomi penyebab konsumsi energi (Base dan Kalayci, 2021). Pandangan kedua berpendapat konsumsi energi penyebab pertumbuhan ekonomi (Ozturk dan Acaravci, 2010). Pandangan ketiga berpendapat konsumsi energi dan pertumbuhan ekonomi penyebab satu sama lain. Pandangan keempat adalah tidak ada kausalitas antara konsumsi energi dan pertumbuhan ekonomi (Ozturk dan Acaravci, 2010). Dari empat pandangan tersebut, isu pertumbuhan ekonomi yang menyebabkan peningkatan konsumsi energi difokuskan pada penelitian ini karena rata-rata pertumbuhan ekonomi Indonesia diperkirakan akan mencapai 5,6% hingga tahun 2045 yang akan diiringi dengan pertumbuhan konsumsi energi (Bappenas, 2019).

Penelitian ini secara umum bertujuan untuk menganalisis peran bauran energi terhadap kualitas lingkungan dan pembangunan ekonomi Indonesia. Tujuan umum tersebut dapat dicapai dengan menjawab tiga tujuan khusus, yaitu 1) mengestimasi pengaruh jangka pendek dan panjang produksi listrik dari PLTA serta konsumsi batu bara, gas alam, dan minyak bumi terhadap emisi CO<sub>2</sub> di Indonesia, 2) mengevaluasi hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC) dalam konteks energi baru terbarukan (EBT) Indonesia, 3) mengestimasi hubungan kausalitas antara produksi listrik dari PLTA, konsumsi batu bara, gas alam, dan minyak bumi, pertumbuhan ekonomi, serta emisi CO<sub>2</sub> di Indonesia.

## 2. Metode

### 2.1. Model dan Metode Analisis Data

Penelitian ini membagi variabel konsumsi bahan bakar fosil menjadi konsumsi batu bara, gas alam, dan minyak bumi serta produksi listrik dari PLTA sebagai alternatif energi. PLTA mendominasi rencana penambahan kapasitas pembangkit listrik berbasis EBT periode 2021-2030 dan tiga jenis bahan bakar fosil tersebut adalah bahan bakar untuk listrik yang tertinggi di Indonesia (DEN, 2019; PLN, 2021). Selain itu, penelitian terdahulu masih berfokus pada konsumsi energi dari PLTA dan penelitian terkait produksi listrik dari PLTA masih terbatas, khususnya

di Indonesia. Model kualitas lingkungan dalam penelitian ini disajikan pada Persamaan 1.

$$\begin{aligned} \ln CO_{2t} = & \gamma_0 + \gamma_1 \ln Hydro_t \\ & + \gamma_2 \ln Coal_t \\ & + \gamma_3 \ln NGas_t \\ & + \gamma_4 \ln Oil_t \\ & + \gamma_5 \ln RGDP_t \\ & + \gamma_6 (\ln RGDP_t)^2 \\ & + u_t \end{aligned} \quad (1)$$

Parameter CO<sub>2t</sub> adalah emisi CO<sub>2</sub>/kapita, Hydro<sub>t</sub> adalah produksi listrik dari PLTA/ kapita, Coal<sub>t</sub> adalah konsumsi batu bara/kapita, NGas<sub>t</sub> adalah konsumsi gas bumi/kapita, Oil<sub>t</sub> adalah konsumsi minyak bumi/kapita, dan RGDP<sub>t</sub> adalah PDB/kapita. Seluruh variabel ditransformasikan ke dalam logaritma natural untuk menunjukkan nilai elastisitas. Hipotesis dari Persamaan 1 adalah  $\gamma_2, \gamma_3, \gamma_4,$  dan  $\gamma_5 > 0$  serta  $\gamma_1$  dan  $\gamma_6 < 0$  (Murhsed *et al.*, 2021).

Metode analisis yang digunakan untuk mengestimasi pengaruh produksi listrik dari PLTA dan konsumsi bahan bakar fosil terhadap emisi CO<sub>2</sub> adalah metode *Autoregressive Distributed-lag* (ARDL). Metode ini digunakan untuk mengestimasi model regresi linear pada data *time series* dalam menganalisis pengaruh jangka pendek dan panjang (Pesaran dan Shin, 1997). Uji praestimasi yang perlu dilakukan sebagai berikut:

#### a. Uji Stasioneritas

Uji *unit root* dilakukan untuk mengevaluasi sifat stasioneritas dari variabel *time series* pada penelitian ini. Variabel yang tidak stasioner akan meningkatkan kemungkinan dalam perkiraan elastisitas palsu atau fenomena regresi palsu (*spurious regression*) (Gujarati, 2003). Uji *unit root* yang digunakan adalah Phillips-Perron *test* (PP *test*). PP *test* memiliki kelebihan, yaitu tes nonparametrik dan dapat digunakan pada variabel-variabel yang memiliki masalah autokorelasi pada residualnya (Gujarati, 2003; Gokmenoglu *et al.*, 2015). Hipotesis nol dari PP *test* adalah adanya *unit root* dalam deret tersebut (Gokmenoglu *et al.*, 2015).

#### b. Uji Kointegrasi

Uji kointegrasi dalam penelitian ini menggunakan *Bounds Testing Cointegration* yang dikembangkan oleh Pesaran dan Shin (1997). Hal ini dilakukan untuk menguji adanya kointegrasi pada model yang memiliki stasioneritas terintegrasi pada level dan *first difference*. Hubungan kointegrasi antar variabel dapat dilihat dengan menggunakan F-statistik. Jika F-statistik yang dihitung lebih besar dari nilai kritis batas atas, H<sub>0</sub> ditolak dan sebaliknya jika F-statistik berada di bawah nilai kritis batas bawah, H<sub>0</sub> tidak dapat ditolak. Selanjutnya, jika nilai tersebut terletak di antara batas bawah dan atas, kointegrasi tidak dapat disimpulkan atau tidak meyakinkan.

c. Uji Lag Optimum

Uji lag optimum digunakan untuk memilih urutan lag optimal dari variabel. Penelitian ini menggunakan Akaike Information Criterion (AIC) untuk memilih maksimal lag yang relevan (Jumhur, 2020). AIC adalah kriteria pemilihan model yang banyak digunakan untuk mengukur the goodness of fit (kecocokan) model (Mondal et al., 2014). Penentuan lag optimum dilakukan dengan memilih lag yang menghasilkan nilai AIC terendah (Cavanaugh dan Neath, 2017).

d. Estimasi Model ARDL

Pemodelan ARDL mencakup model estimasi Unrestricted Error-Correction Model (UECM). Sesuai hipotesis EKC, bentuk kuadrat dari PDB riil per kapita (LnRGDP)<sup>2</sup> diperhitungkan dalam model (Cole et al., 1997). Model UECM dengan emisi CO<sub>2</sub> sebagai variabel dependen dinyatakan pada persamaan (2).

Model Restricted Error Correction Model (RECM) atau model ECM menunjukkan pengaruh jangka pendek atau elastisitas jangka pendek, yang diestimasi dari persamaan (3).

Koefisien ECT<sub>t-1</sub> menunjukkan nilai yang memperkirakan kecepatan penyesuaian dari ketidakseimbangan. Koefisien tersebut harus negatif dan signifikan secara statistik (Khan et al., 2019). Nilai tersebut diestimasi dengan menggunakan residu persamaan jangka panjang. Persamaan jangka panjang tersebut dapat ditentukan melalui persamaan (4).

Model estimasi ARDL dievaluasi dengan menggunakan berbagai uji diagnostik. Uji Breusch Godfrey Lagrange Multiplier (χ<sup>2</sup> LM) digunakan untuk menguji keberadaan masalah korelasi serial atau

autokorelasi. Stabilitas dari model estimasi ARDL dievaluasi dengan menggunakan uji cumulative sum (CUSUM) dan cumulative sum of squares (CUSUMSQ) (Khan et al., 2019).

Berdasarkan Persamaan 4, evaluasi hipotesis EKC dilakukan dengan mempertimbangkan nilai parameter dari PDB per kapita beserta signifikansinya. Hipotesis EKC terbukti apabila β<sub>5</sub> > 0 dan β<sub>6</sub> < 0 dalam jangka pendek maupun panjang (Ahmad et al., 2021). Selanjutnya, titik balik pada kurva EKC ditentukan oleh (-β<sub>5</sub>/2β<sub>6</sub>) dan exp(-β<sub>5</sub>/2β<sub>6</sub>) yang merepresentasikan nilai moneterinya.

Adanya kointegrasi pada dua atau lebih data time series memungkinkan adanya kausalitas di antaranya baik satu atau dua arah. Uji kausalitas Granger menunjukkan X adalah Granger penyebab Y apabila Y dapat diprediksi dengan nilai X masa lalu dan sekarang (Gokmenoglu et al., 2015). Estimasi kausalitas dilakukan antar variabel dalam penelitian ini.

2.2. Jenis dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder time series, yaitu emisi CO<sub>2</sub>, produksi listrik dari PLTA, konsumsi bahan bakar fosil dari batu bara, minyak bumi, dan gas alam, serta PDB Indonesia dalam bentuk per kapita dari tahun 1980-2018. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan data pada setiap variabel. Data bersumber dari Badan Pusat Statistik (BPS) Indonesia, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM), World Bank, US Energy Information Administration (EIA), British Petroleum, dan lainnya.

$$\begin{aligned} \Delta \text{LnCO}_{2t} = & \beta_0 + \beta_1 \text{LnCO}_{2t-1} + \beta_2 \text{LnHydro}_{t-1} + \beta_3 \text{LnCoal}_{t-1} + \beta_4 \text{LnNGas}_{t-1} + \beta_5 \text{LnOil}_{t-1} + \beta_6 \text{LnRGDP}_{t-1} \\ & + \beta_7 (\text{LnRGDP})^2_{t-1} + \sum_{a=1}^m \alpha_a \Delta \text{LnCO}_{2t-a} + \sum_{b=1}^n \alpha_b \Delta \text{LnHydro}_{t-b} + \sum_{c=1}^o \alpha_c \Delta \text{LnCoal}_{t-c} \\ & + \sum_{d=1}^p \alpha_d \Delta \text{LnNGas}_{t-d} + \sum_{e=1}^q \alpha_e \Delta \text{LnOil}_{t-e} + \sum_{f=1}^r \alpha_f \Delta \text{LnRGDP}_{t-f} + \sum_{g=1}^r \alpha_g \Delta (\text{LnRGDP})^2_{t-g} + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (2)$$

dimana:

- β<sub>0</sub> : intersep,
- β, α : koefisien,
- a sampai f : lag,
- Δ : first difference.

$$\begin{aligned} \Delta \text{LnCO}_{2t} = & \delta_1 + \sum_{a=1}^m \alpha_a \Delta \text{LnCO}_{2t-a} + \sum_{b=1}^n \alpha_b \Delta \text{LnHydro}_{t-b} + \sum_{c=1}^o \alpha_c \Delta \text{LnCoal}_{t-c} + \sum_{d=1}^p \alpha_d \Delta \text{LnNGas}_{t-d} \\ & + \sum_{e=1}^q \alpha_e \Delta \text{LnOil}_{t-e} + \sum_{f=1}^r \alpha_f \Delta \text{LnRGDP}_{t-f} + \sum_{g=1}^r \alpha_g \Delta (\text{LnRGDP})^2_{t-g} + \varphi \text{ECT}_{t-1} + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (3)$$

dimana:

- δ<sub>1</sub> : intersep.

$$\begin{aligned} \text{LnCO}_{2t} = & \beta_0 + \beta_1 \text{LnHydro}_t + \beta_2 \text{LnCoal}_t + \beta_3 \text{LnNGas}_t + \beta_4 \text{LnOil}_t + \beta_5 \text{LnRGDP}_t + \beta_6 (\text{LnRGDP})^2_t \\ & + \sigma_t \end{aligned} \quad (4)$$

dimana:

- σ<sub>t</sub> : error term.

**Tabel 1** Rincian variabel dan sumber data

No	Variabel	Definisi (satuan pengukuran)	Sumber
1	$LnCO_{2t}$	Emisi CO <sub>2</sub> (metrik ton/kapita)	World Bank
2	$LnHydro_t$	Total produksi listrik dari PLTA (kWh/kapita dan MWh/kapita)	KESDM, BPS Indonesia, dan British Petroleum
3	$LnCoal_t$	Total konsumsi batu bara (BOE/ kapita dan juta metrik ton/kapita)	KESDM, BPS Indonesia, dan EIA
4	$LnNGas_t$	Total konsumsi gas alam (BOE/kapita dan miliar meter kubik/kapita)	KESDM, BPS Indonesia, dan EIA
5	$LnOil_t$	Total konsumsi minyak olahan (BOE/kapita dan juta metrik ton/kapita)	KESDM, BPS Indonesia, dan EIA
6	$LnRGDP_t$	PDB riil per kapita (konstan 2010 USD)	World Bank
7	$(LnRGDP)^2_t$	PDB riil per kapita (konstan 2010 USD)	World Bank

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Pengaruh jangka pendek dan panjang produksi listrik dari PLTA serta konsumsi batu bara, gas alam, dan minyak bumi terhadap emisi CO<sub>2</sub> di Indonesia

Pengaruh konsumsi batu bara, gas alam, dan minyak bumi serta produksi listrik dari PLTA di Indonesia terhadap emisi CO<sub>2</sub> dapat diketahui dalam jangka pendek maupun panjang. Uji praestimasi model ARDL menunjukkan bahwa semua variabel sudah stasioner pada *first difference*, terdapat kointegrasi, *lag* optimal sebesar satu, dan model stabil pada taraf nyata 5%. Hasil estimasi pengaruh jangka pendek dan panjang disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2** Hasil estimasi model jangka pendek dan panjang

Variabel independen	Nilai koefisien	
	Jangka pendek	Jangka panjang
$LnCoal$	0,115 ***	0,082 ***
$LnOil$	0,463 ***	0,328 ***
$LnRGDP$	-9,617 ***	-6,805 **
$(LnRGDP)^2$	0,670 ***	0,474 ***
$LnHydro$	-0,062 *	-0,044 *
$LnNGas$	0,023	0,016
$ECT_{t-1}$	-1,413 ***	
$C$		24,838 **

Sumber: Hasil olah data (2022)

Keterangan: \*\*\*, \*\*), dan \*) signifikan pada taraf nyata 1 persen, 5 persen, dan 10 persen

Tabel 2 menunjukkan nilai elastisitas dari konsumsi batu bara ( $LnCoal$ ), minyak bumi ( $LnOil$ ), gas alam ( $LnNGas$ ), produksi listrik dari PLTA ( $LnHydro$ ), dan PDB ( $LnRGDP$  dan  $(LnRGDP)^2$ ) dalam bentuk per kapita terhadap emisi CO<sub>2</sub> per kapita ( $LnCO_2$ ). Contohnya, elastisitas produksi listrik dari PLTA per kapita bernilai -0,062 dan -0,044 dalam jangka pendek dan panjang. Artinya, kenaikan produksi listrik dari PLTA per kapita sebesar 1% akan menurunkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 0,062% dan 0,044% dalam jangka pendek dan panjang, *ceteris paribus*. Dari keenam nilai elastisitas tersebut, elastisitas konsumsi gas alam per kapita terhadap emisi CO<sub>2</sub> per kapita merupakan satu-satunya yang tidak signifikan dalam jangka pendek dan panjang. Nilai elastisitas jangka panjang tersebut lebih kecil dibandingkan jangka pendek.

Model konsumsi batu bara, gas alam, dan minyak bumi serta produksi listrik dari PLTA dalam bentuk per kapita terhadap emisi CO<sub>2</sub> per kapita memiliki hubungan jangka panjang. Adanya hubungan jangka panjang menunjukkan adanya penyesuaian pada jangka panjang yang dilihat pada koefisien  $ECT_{t-1}$  (*lihat* Tabel 2). Koefisien  $ECT_{t-1}$  menunjukkan seberapa cepat ekuilibrium tercapai pada keseimbangan jangka panjang. Koefisien ECT model konsumsi batu bara, gas alam, dan minyak bumi dalam bentuk per kapita serta produksi listrik dari PLTA per kapita terhadap emisi CO<sub>2</sub> per kapita sebesar -1,413 yang signifikan dengan taraf nyata 1%, artinya ketidakseimbangan periode sebelumnya terkoreksi sebesar 141,3% pada periode berikutnya.

Koefisien  $ECT_{t-1}$  pada penelitian ini adalah -1,413 yang signifikan pada level 1%. Nilai tersebut sangat signifikan sehingga menguatkan hubungan jangka panjang antar variabel. Meskipun koefisien  $ECT_{t-1}$  umumnya berkisar antara -1 hingga 0, hasil estimasi koefisien  $ECT_{t-1}$  penelitian ini dapat dibenarkan dengan adanya penelitian lain yang memiliki kondisi serupa, seperti Samargandi *et al.*, (2015) dan Wang *et al.*, (2021). Keduanya menegaskan bahwa koefisien  $ECT_{t-1}$  lebih dari -2 dan kurang dari 0 dapat diterima apabila sangat signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa model akan menyesuaikan pada kecepatan 141,3% dan akan memakan waktu sekitar 7 bulan (yaitu  $1/1,413=0.708$ ) untuk menyesuaikan ke keseimbangan. Interpretasi tersebut mengacu pada Dankumo *et al.*, (2019) dan Wang *et al.*, (2021).

#### a. Pengaruh Produksi Listrik dari PLTA terhadap Emisi CO<sub>2</sub>

Nilai elastisitas produksi listrik pada jangka panjang dari PLTA terhadap emisi CO<sub>2</sub> ( $LnHydro$ ) menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan jangka pendek (*lihat* Tabel 2). Kondisi ini pun terjadi di Brazil yang mengembangkan PLTA pada bauran energinya (Zambrano-Monserrate *et al.*, 2016). Di Indonesia, hal ini dapat disebabkan oleh persentase produksi listrik dari PLTA yang menurun dari tahun 2000-2020 karena peningkatan jumlah produksi listrik dari PLTU, sedimentasi, serta lamanya waktu dan mahal biaya pembangunan yang menurunkan kontribusi PLTA pada penurunan emisi

CO<sub>2</sub> di jangka panjang. Persentase produksi listrik yang dihasilkan oleh PLTU mendominasi produksi listrik Indonesia. Sementara itu, sedimentasi akan menurunkan output listrik, produksi, dan pendapatan energi seperti di PLTA Lamajan di Bandung (Wild dan Loucks, 2014).

PLTA berkontribusi paling besar pada bauran EBT di tahun 2021. Kapasitas terpasang PLTA meningkat dari 6141 MW menjadi 6602 MW di tahun 2020 dan 2021 sehingga kontribusi EBT di tahun 2021 menjadi 11,7%. Capaian tersebut masih jauh dari target bauran EBT sebesar 23% di tahun 2025. Menurut DJEBTKE (2021), terdapat satu unit PLTA yang mengalami pergeseran waktu *Commercial Operation Date* (COD) yang awalnya direncanakan akhir tahun 2021 menjadi 2022, yaitu PLTA Jatigede (2 x 55 MW). Walau demikian, kapasitas terpasang PLTA pada tahun 2021 masih jauh dari potensi PLTA yang Indonesia miliki, yaitu sekitar 75.091 MW sehingga sisa potensi yang masih belum terealisasikan untuk berkontribusi dalam bauran energi adalah sebesar 68.489 MW (Perpres, 2017).

b. Pengaruh Konsumsi Batu Bara terhadap Emisi CO<sub>2</sub>

Batu bara berpotensi meningkatkan emisi CO<sub>2</sub> yang lebih rendah daripada minyak bumi dan lebih tinggi dari gas alam pada jangka pendek dan panjang. Hal ini disebabkan oleh konsumsi batu bara meningkat setiap tahunnya hingga melebihi gas alam di tahun 2019 namun lebih rendah dari minyak bumi. Selain itu, potensi emisi CO<sub>2</sub> batu bara lebih tinggi daripada gas alam, yaitu sebesar 1,816 t CO<sub>2</sub>/ton (KLH, 2012). Pengaruh ini diprediksi akan menurun pada jangka panjang karena adanya teknologi untuk mengurangi konsumsi batu bara. Sektor ketenagalistrikan mengembangkan *co-firing*, yaitu pembakaran dua bahan bakar yang berbeda, batu bara dan biomassa, secara bersamaan yang telah diterapkan di 27 lokasi PLTU di tahun 2021 dan akan meningkat hingga 52 unit di tahun 2024, contohnya PLTU Ketapang (DJEBTKE, 2021). Di sektor industri, *co-processing* dapat menurunkan emisi CO<sub>2</sub> dari industri semen dengan penggunaan bahan bakar alternatif, contohnya substitusi batu bara dengan biomassa oleh PT Semen Indonesia (Baidya *et al.*, 2016). Kedua teknologi ini dapat berkontribusi pada penurunan bauran batu bara yang masih tinggi dibandingkan dengan target baurannya, yaitu 37,19% di tahun 2021 dari 30% di tahun 2025. Hal ini berbeda dengan penelitian Khan *et al.*, (2019) di Pakistan.

c. Pengaruh Konsumsi Minyak Bumi terhadap Emisi CO<sub>2</sub>

Konsumsi minyak bumi terhadap emisi CO<sub>2</sub> memiliki pengaruh jangka pendek dan panjang yang lebih tinggi dibandingkan batu bara. Walaupun potensi emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh batu bara lebih besar dibandingkan dengan minyak bumi yang sekitar 0,002 t CO<sub>2</sub>/liter hingga 0,003 t CO<sub>2</sub>/liter, konsumsi energi final Indonesia didominasi oleh minyak bumi

sekitar 46%-73% (KLH, 2012). Pengaruh ini diprediksi akan menurun pada jangka panjang seperti di Peru (Zambrano-Monserrate, 2018). Kondisi yang terjadi di Indonesia dapat dipicu oleh penurunan produksi minyak bumi sebesar 4,9%/tahun karena sumur produksi yang sudah tua, sumur baru yang terbatas, dan lokasi sumber daya di daerah perbatasan (BPPT, 2021). Selain itu, adanya sumber energi alternatif ramah lingkungan seperti bahan bakar nabati (BBN) untuk mengurangi bauran minyak bumi. Bauran minyak bumi pada tahun 2021 masih 32,24% lebih besar dibandingkan dengan target bauran minyak bumi di tahun 2025 yang harus lebih rendah dari 25% (DJEBTKE, 2021).

d. Pengaruh Konsumsi Gas Alam terhadap Emisi CO<sub>2</sub>

Konsumsi gas alam tidak signifikan dalam meningkatkan emisi CO<sub>2</sub> pada jangka pendek dan panjang. Hal ini disebabkan oleh dua faktor, yaitu jumlah konsumsi dari gas alam cenderung stabil dari tahun 2000 hingga tahun 2020 dan potensi emisi CO<sub>2</sub> gas alam lebih rendah dibandingkan dengan batu bara, yaitu sebesar 59,186 x 10<sup>-6</sup> t CO<sub>2</sub>/SCF untuk gas alam dan 1,816 t CO<sub>2</sub>/ton untuk batu bara (KLH, 2012). Gas bumi memiliki target minimum sebesar 22% di tahun 2025 dan 24% di tahun 2050. Pada tahun 2021 capaian gas bumi dalam bauran energi hanya sampai 18,87%, artinya masih lebih rendah dibandingkan target gas alam dalam bauran energi tahun 2025 (DJEBTKE, 2021).

e. Pengaruh PDB terhadap Emisi CO<sub>2</sub>

Pertumbuhan ekonomi Indonesia berpotensi dalam menghasilkan *trade off* antara ekonomi dan kerusakan lingkungan. Hal ini terlihat pada koefisien *LnRGDP* dan  $(LnRGDP)^2$  yang bertanda negatif dan positif (lihat Tabel 2). Koefisien *LnRGDP* dan  $(LnRGDP)^2$  bernilai -9,617 dan 0,670 dalam jangka pendek serta -6,805 dan 0,474 dalam jangka panjang. Artinya, kenaikan dari PDB akan memicu kenaikan emisi CO<sub>2</sub> baik dalam jangka pendek maupun panjang. Pertumbuhan ekonomi membutuhkan peningkatan produksi secara konsisten yang kemudian menimbulkan kerusakan lingkungan melalui emisi yang dihasilkan (Marsiglio dan Privileggi, 2021). Di sisi lain, kelestarian lingkungan juga berperan penting dalam kegiatan ekonomi karena emisi cenderung akan mengurangi jumlah output yang dapat dihasilkan perekonomian. Kondisi ini serupa dengan hasil penelitian AL-Mulali *et al.* (2015) di Vietnam.

3.2. Evaluasi hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC) dalam konteks energi baru terbarukan (EBT) Indonesia

Hasil evaluasi hipotesis EKC dengan menggunakan periode data 1980-2018 menunjukkan kondisi Indonesia akan sejalan dengan hipotesis EKC dalam jangka panjang yang disajikan pada Gambar 1 (a). Kondisi ini terlihat dari nilai  $\beta_5$  dan  $\beta_6$  yang berubah menjadi sebesar 5,635 dan -0,335 dalam

jangka panjang. Hasil ini menunjukkan hubungan yang berbentuk U terbalik antara emisi CO<sub>2</sub> dan PDB di Indonesia. Hasil estimasi titik balik dari kurva U terbalik adalah sebesar 8,406 dalam jangka panjang yang diestimasi dengan data periode 1980-2018. Dalam bentuk moneter, titik balik terjadi pada USD 4473.

Tercapainya penurunan emisi CO<sub>2</sub> di Indonesia diperkirakan akan membutuhkan waktu yang lebih lama. Hal ini disebabkan oleh titik balik kurva U terbalik, USD 4473, lebih tinggi dari nilai maksimum pendapatan dalam periode penelitian, yaitu USD 4285 dengan nilai logaritma naturalnya sebesar 8,363. Selain itu, titik balik tersebut lebih tinggi dari PDB per kapita Indonesia tahun 2021, yaitu USD 4350 (BPS, 2022). Nilai titik balik tersebut mendekati nilai PDB per kapita Indonesia tahun 2021, artinya Indonesia akan segera mencapai pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan. Penurunan emisi CO<sub>2</sub> akan tercapai seiring peningkatan PDB Indonesia apabila perkembangan teknologi ramah lingkungan ditingkatkan. Artinya, Indonesia perlu meningkatkan upaya penurunan emisi CO<sub>2</sub> baik melalui mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dengan teknologi bersih maupun melalui peningkatan produksi listrik dari energi terbarukan, khususnya PLTA.

Dalam jangka pendek, kondisi Indonesia belum dapat sejalan dengan hipotesis EKC (*lihat Gambar 1 (b)*). Hal ini disebabkan oleh nilai  $\beta_5$  negatif dan  $\beta_6$  positif sebesar -42,773 dan 2,773. Titik balik diestimasi akan terjadi pada titik 7,714 dengan nilai moneter sebesar USD 2239. Titik balik tersebut jauh lebih rendah dibandingkan dengan nilai maksimum pendapatan penelitian yang sebesar 8,363 dengan nilai moneter sebesar USD 4285. Dengan tidak adanya pengaruh teknologi pada jangka pendek, Indonesia membutuhkan waktu yang jauh lebih lama dibandingkan dengan adanya pengaruh teknologi pada jangka panjang.

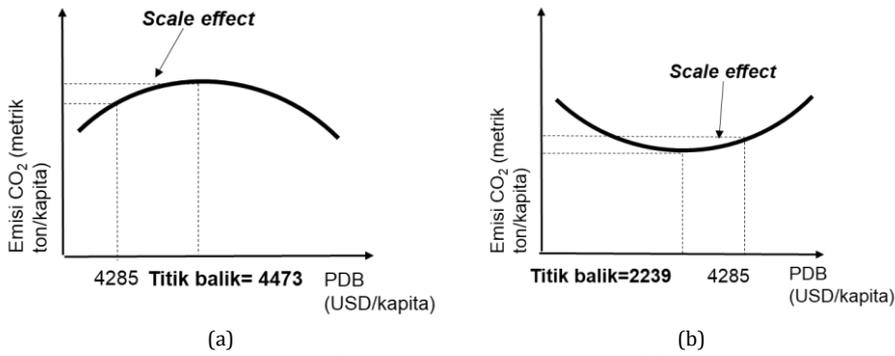
Eksplorasi sumber daya alam memicu peningkatan degradasi lingkungan di Indonesia. Beberapa eksternalitas negatif yang diakibatkan oleh eksploitasi sumber daya alam di Indonesia, antara lain deforestasi untuk pembukaan lahan pertambangan dan perkebunan, pencemaran lingkungan akibat bakar fosil dan pertambangan, dan degradasi lahan akibat lahan bekas tambang (Tsujiro *et al.*, 2016; Dutu, 2016). Kondisi tersebut menyebabkan pencemaran air, peningkatan emisi CO<sub>2</sub>, dan kerusakan ekosistem (Tsujiro *et al.*, 2016; Dutu, 2016). Eksternalitas negatif yang timbul dari eksploitasi SDA untuk pertumbuhan ekonomi ini sejalan dengan penjelasan jalur pertumbuhan EKC yang membutuhkan sumber daya secara intensif dan menimbulkan biaya lingkungan yang besar (Gill *et al.*, 2018). Dalam aspek energi, inefisiensi dalam konsumsi maupun pengelolaan energi menjadi permasalahan selain tingginya ketergantungan pada bahan bakar fosil. Contohnya, inefisiensi konsumsi energi di sektor industri terjadi karena ketersediaan

teknologi yang relatif tidak berubah atau stagnan. Kondisi ini disebabkan oleh aktivitas produksi dan lainnya masih menggunakan mesin-mesin tua dan terbatas dalam mengadopsi teknologi modern yang hemat energi (Kartiasih *et al.*, 2012). Di sektor transportasi, inefisiensi disebabkan oleh konsumsi energi yang terus meningkat karena jumlah kendaraan meningkat seiring meningkatnya populasi dan pendapatan masyarakat kemudian memicu kemacetan (Kartiasih *et al.*, 2012; Bappenas, 2014). Di sektor ketenagalistrikan, inefisiensi pengelolaan energi disebabkan karena kurang perhatian pada penggunaan sumber lokal menyebabkan distribusi energi tidak efisien atau boros dan mengurangi energi yang dapat digunakan untuk masyarakat dan sektor industri (Nugroho dan Chasanah, 2011).

Emisi CO<sub>2</sub> berpotensi akan terus meningkat apabila ketergantungan Indonesia terhadap bahan bakar fosil masih dominan dibandingkan dengan EBT. Pada tahun 2020, bahan bakar fosil masih mendominasi bauran energi nasional. Untuk mengurangi hal tersebut, pengembangan EBT menjadi salah satu solusi. Mitigasi penurunan emisi CO<sub>2</sub> melalui EBT menghasilkan penurunan emisi CO<sub>2</sub> sekitar 30 juta ton CO<sub>2</sub>e dengan total kapasitas terpasang 10.889 MW di triwulan tiga tahun 2021, artinya prediksi rata-rata penurunan emisi yang dihasilkan sebesar 2787 tCO<sub>2</sub>e/MW (DJEBTKE, 2021). Total kapasitas terpasang terbesar dihasilkan oleh PLTA sebesar 6432 MW (59% dari total kapasitas terpasang EBT) kemudian PLTP sebesar 2186 MW (20% dari total kapasitas terpasang EBT) sehingga menghasilkan potensi penurunan emisi yang terbesar.

Pengembangan PLTA melalui peningkatan kapasitas memiliki potensi besar dalam penurunan emisi CO<sub>2</sub> di Indonesia. Pada tahun 2021 triwulan tiga, kontribusi PLTA dalam penurunan emisi CO<sub>2</sub> diprediksi sebesar 17 juta tCO<sub>2</sub>e dari total penurunan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 30 juta tCO<sub>2</sub>e (DJEBTKE, 2021). Apabila kapasitas terpasang PLTA meningkat di tahun 2022 menjadi 6809 MW, prediksi total penurunan emisi CO<sub>2</sub> menjadi 18 juta tCO<sub>2</sub>e. Namun, peningkatan kapasitas dari PLTA memiliki beberapa hambatan dibandingkan dengan jenis EBT yang lain di antaranya biaya pembangunan bendungan yang sangat mahal, berpotensi banjir di hilir apabila tidak dikelola dengan baik, mempengaruhi ekosistem dari sungai seperti habitat ikan, dan kekeringan (Bagher *et al.*, 2015).

Walaupun penambahan kapasitas PLTA dilakukan akhir-akhir ini, realisasinya masih rendah dari target penambahan kapasitas PLTA tahunan Indonesia. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kapasitas PLTA masih harus terus diintensifkan untuk percepatan bauran EBT dan membantu Indonesia mencapai titik balik dari kurva EKC atau pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan. Pada triwulan empat tahun 2021, bauran energi masih didominasi oleh bahan bakar fosil, yaitu batu bara (37,19%), minyak bumi (32,24%), dan gas bumi



Sumber: Hasil olah data penelitian  
**Gambar 1** Hasil estimasi EKC (a) Jangka panjang (b) Jangka pendek

(18,87%) (DJEBTKE, 2021). Karena itu, emisi CO<sub>2</sub> diprediksi akan terus meningkat akibat bahan bakar fosil yang masih mendominasi bauran energi Indonesia. Hal ini menyebabkan Indonesia masih berpotensi berada pada posisi *scale effect* dalam kurva EKC sehingga masih jauh untuk dapat mencapai titik balik dan sejalan dengan hipotesis EKC.

### 3.3 Hubungan Kausalitas antara Produksi Listrik dari PLTA, Konsumsi Batu Bara, Gas Alam, dan Minyak Bumi, Pertumbuhan Ekonomi, serta Emisi CO<sub>2</sub> di Indonesia

Hubungan kausalitas antara produksi listrik dari PLTA, konsumsi bahan bakar fosil (batu bara, gas alam, dan minyak bumi), pertumbuhan ekonomi, serta emisi CO<sub>2</sub> dalam bentuk per kapita diestimasi untuk menunjukkan hubungan sebab akibat antar variabel. Hal ini dilakukan untuk mengetahui lebih lanjut arah pengaruh setiap variabel yang tidak seluruhnya dijelaskan pada hasil estimasi model ARDL. Selain itu, estimasi ini dapat memberikan informasi tambahan yang mendukung hasil estimasi ARDL pada penelitian ini. Hasil estimasi kausalitas granger disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 menunjukkan bahwa guna berkontribusi dalam penurunan emisi CO<sub>2</sub>, Indonesia perlu mengembangkan energi yang bersih salah satunya PLTA. Pembangunan PLTA terus diupayakan secara bertahap oleh Indonesia dengan target penambahan kapasitas yang paling besar dibandingkan dengan EBT lain di periode 2021-2030 (PLN, 2021). Pengembangan PLTA merupakan salah satu upaya menuju *green economy*, yaitu suatu konsep ekonomi yang terus tumbuh dengan mengutamakan keadilan sosial dan tanpa mengabaikan perlindungan lingkungan (Bappenas, 2014). Pengaruh PLTA terhadap emisi CO<sub>2</sub> serta emisi CO<sub>2</sub> terhadap pengembangan PLTA di Indonesia ditunjukkan pada hubungan kausalitas dua arah antara total emisi CO<sub>2</sub> dengan produksi listrik dari PLTA (lihat Tabel 3). Berbeda dengan konsumsi minyak bumi dan gas alam sebagai bahan bakar fosil, Indonesia perlu mengurangi konsumsi kedua bahan bakar tersebut karena meningkatkan emisi CO<sub>2</sub>.

Hubungan kausalitas antara PLTA dan emisi CO<sub>2</sub> telah diteliti pada penelitian sebelumnya. Namun, sebagian besar penelitian mengestimasi dengan menggunakan konsumsi energi yang berasal dari PLTA bukan produksi listrik dari PLTA. Penelitian Umalla dan Samal (2018) mengenai dampak konsumsi energi PLTA terhadap pertumbuhan ekonomi dan emisi CO<sub>2</sub> menunjukkan adanya hubungan kausalitas antara konsumsi energi PLTA terhadap pertumbuhan ekonomi dan emisi CO<sub>2</sub> di China selama periode 1965–2016. Pada penelitian ini produksi listrik dari PLTA lebih tepat digunakan apabila dibandingkan dengan konsumsi listrik dari PLTA karena dikaitkan dengan konteks bauran energi dan konsumsi listrik yang berasal dari EBT di Indonesia tidak dibedakan dengan listrik konvensional.

Potensi pengurangan emisi CO<sub>2</sub> diprediksi akan meningkat seiring peningkatan kapasitas PLTA yang akan beroperasi di Indonesia antara tahun 2022 hingga tahun 2025 sebesar 14%. Penambahan kapasitas tersebut menghasilkan peningkatan potensi pengurangan emisi CO<sub>2</sub> dari 10.839 ribu tCO<sub>2e</sub> di tahun 2021 menjadi 11.146 ribu tCO<sub>2e</sub> di tahun 2022, 11.391 ribu tCO<sub>2e</sub> di tahun 2023 dan 2024, serta 12.367 ribu tCO<sub>2e</sub> di tahun 2025. Total potensi pengurangan emisi CO<sub>2</sub> di tahun 2024 bernilai sama dengan potensi di tahun 2023 karena pada tahun 2024 diprediksi tidak ada penambahan kapasitas dari PLTA yang akan beroperasi. Penambahan kapasitas PLTA sebesar 14% dari total kapasitas di tahun 2021 juga akan meningkatkan potensi penurunan emisi CO<sub>2</sub> menjadi sebesar 0,868% dan 0,616% dari 0,062% dan 0,044% pada jangka pendek dan panjang, ceteris paribus. Peningkatan potensi pengurangan emisi CO<sub>2</sub> berimplikasi bahwa pemerintah Indonesia perlu menambah kapasitas terpasang PLTA di masa yang akan datang tetapi dengan perencanaan yang baik agar tidak menimbulkan permasalahan yang telah terjadi sebelumnya.

Hubungan kausal antara PDB dengan produksi listrik dari PLTA pada Tabel 3 menunjukkan bahwa kondisi perekonomian Indonesia yang baik dan stabil akan mendorong pengembangan EBT salah satunya

PLTA. Hal ini disebabkan oleh pengeluaran investasi yang bergantung pada output perekonomian dan suku bunga, artinya investasi merupakan fungsi dari pendapatan nasional dan suku bunga (Mankiw, 2003). Banyak penelitian juga mengungkapkan bahwa peningkatan pendapatan merupakan pendukung penting di balik pengembangan EBT, contohnya di Turki (Ocal dan Aslan, 2013). Kondisi ini terlihat pada Tabel 3 bahwa adanya hubungan kausal searah dari PDB terhadap produksi listrik dari PLTA. Pada realitanya hubungan kausal ini akan terkendala pada harga listrik PLTA yang lebih mahal dibandingkan listrik konvensional, biaya investasi yang mahal, dan teknologi EBT yang terbatas.

**Tabel 3** Arah hubungan kausalitas

No.	Hubungan kausalitas	Signifikansi
1	Emisi CO <sub>2</sub> ↔ PDB	**
2	Emisi CO <sub>2</sub> ≠ Konsumsi batu bara	
3	Emisi CO <sub>2</sub> ← Konsumsi minyak bumi	***
4	Emisi CO <sub>2</sub> ← Konsumsi gas alam	**
5	Emisi CO <sub>2</sub> ↔ Produksi listrik dari PLTA	**
6	PDB → Produksi listrik dari PLTA	***
7	PDB ← Konsumsi batu bara	***
8	PDB ≠ Konsumsi minyak bumi	
9	PDB ≠ Konsumsi gas alam	
10	Konsumsi batu bara ≠ Konsumsi minyak bumi	
11	Konsumsi batu bara ≠ Konsumsi gas alam	
12	Konsumsi minyak bumi ≠ Konsumsi gas alam	
13	Produksi listrik dari PLTA ≠ Konsumsi batu bara	
14	Produksi listrik dari PLTA ≠ Konsumsi minyak bumi	
15	Produksi listrik dari PLTA ≠ Konsumsi gas alam	

Sumber: Hasil olah data (2022)

Keterangan: Tanda ↔, →, dan ≠ pada setiap hubungan kausalitas menunjukkan hubungan kausal dua arah, searah, dan tidak berhubungan. Hubungan kausalitas yang disertai dengan tanda \*\*\*, \*\*, dan \*) berarti signifikan pada taraf nyata 1%, 5%, dan 10%.

Perubahan dalam produksi listrik PLTA diprediksi tidak mempengaruhi PDB Indonesia secara signifikan. Hal ini disebabkan oleh kontribusi EBT pada PDB Indonesia masih sangat kecil dibandingkan dengan energi berbahan bakar fosil. *Share* EBT terhadap bauran energi sebesar 11,13 % di tahun 2020 dan 11,70% di tahun 2021, artinya masih jauh lebih rendah dibandingkan bauran bahan bakar fosil (DJEBTKE, 2021). Di sisi lain, total kapasitas terpasang yang dihasilkan oleh PLTA hanya sekitar 50% dari total bauran EBT (DJEBTKE, 2020). Karena itu, kontribusi PLTA terhadap pada PDB Indonesia tidak signifikan.

Pada periode 2000-2018, PDB Indonesia dipengaruhi oleh tingkat konsumsi batu bara (*lihat* Tabel 3). Hal ini disebabkan oleh PDB Indonesia didukung oleh batu bara sebagai bahan bakar utama. Secara teori, PDB (Y) merupakan fungsi dari konsumsi

(C), investasi (I), pengeluaran pemerintah (G), dan net ekspor (X-M) (Mankiw, 2019). Batu bara paling banyak dikonsumsi oleh sektor ketenagalistrikan dan industri masing-masing sebesar 56,4% melalui PLTU di tahun 2018 dan 90% melalui industri semen hingga tahun 2050 (DEN, 2019). Selain itu, industri pertambangan berkontribusi sekitar 5% hingga 8% dari PDB nasional dalam 10 tahun terakhir dan 80% berasal dari industri batu bara (Arinaldo dan Adiatama, 2019).

Selain digunakan untuk konsumsi dalam negeri, sebagian besar produksi batu bara diekspor oleh Indonesia. Produksi batu bara antara tahun 2009-2018 meningkat dengan total produksi tahun 2018 sebesar 557 juta ton. Dari total produksi tersebut, 63% produksi batu bara diekspor ke China dan India. Di tahun 2019, Arinaldo dan Adiatama (2019) menyebutkan bahwa lebih dari 80% produksi batu bara Indonesia diekspor. Hal ini menjadikan Indonesia sebagai eksportir batu bara terbesar kedua di dunia dan eksportir utama untuk negara-negara Asia seperti China, India, Jepang, Korea, Taiwan, Hongkong, dan lainnya (Arinaldo dan Adiatama,

2019). Pada tanggal 1-31 Januari 2022 pemerintah melarang ekspor batu bara bagi pemegang Izin Usaha Pertambangan (IUP) atau IUPK tahap kegiatan Operasi Produksi, IUPK. Hal ini dilakukan untuk menjamin terpenuhinya kebutuhan batu bara pembangkit listrik. Apabila kebijakan tersebut tidak dilakukan, sekitar 20 PLTU dengan total daya sebesar 10.850 MW akan mati sehingga mengganggu kestabilan perekonomian nasional.

Hasil estimasi hubungan kausalitas pada Tabel 3 menunjukkan beberapa variabel yang tidak memiliki hubungan kausalitas atau tidak signifikan. Tidak adanya hubungan kausalitas terjadi antara konsumsi batu bara, minyak bumi, dan gas di Indonesia. Konsumsi ketiga bahan bakar tersebut pun tidak mempengaruhi produksi listrik dari PLTA di Indonesia. Konsumsi batu bara tidak memiliki hubungan kausalitas langsung pada emisi CO<sub>2</sub>. Selanjutnya, konsumsi minyak bumi dan gas alam juga tidak memiliki hubungan kausalitas langsung pada PDB Indonesia.

#### 4. Kesimpulan

Konsumsi batu bara dan minyak bumi memicu peningkatan emisi CO<sub>2</sub> per kapita di Indonesia baik jangka pendek maupun panjang sementara gas alam tidak signifikan meningkatkan emisi CO<sub>2</sub>. Hal ini dipengaruhi oleh jumlah konsumsi dan potensi emisi CO<sub>2</sub> dari batu bara dan minyak bumi yang tinggi dibandingkan gas alam. Selanjutnya, peningkatan produksi listrik dari PLTA berpotensi dalam menurunkan emisi CO<sub>2</sub> per kapita. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan produksi listrik dari PLTA diperlukan untuk mencapai *green economy* karena Indonesia masih belum mencapai tingkat PDB per kapita yang berkelanjutan sejak tahun 1980 hingga tahun 2018 akibat aktivitas ekonomi yang

tidak ramah lingkungan (*scale effect*). Meskipun emisi CO<sub>2</sub> dapat diturunkan dengan meningkatkan produksi listrik dari PLTA, pertumbuhan ekonomi yang baik dan stabil diperlukan Indonesia untuk meningkatkan kapasitas PLTA. Strategi yang tepat dalam pengurangan konsumsi batu bara agar tidak menurunkan pertumbuhan ekonomi juga diperlukan oleh Indonesia mengingat konsumsi batu bara memiliki hubungan searah pada PDB Indonesia.

Temuan penelitian ini merekomendasikan beberapa kebijakan utama. Pertama, Indonesia idealnya harus meningkatkan kontribusi EBT pada bauran energi dengan meningkatkan produksi listrik dari PLTA dan mengurangi konsumsi bahan bakar fosil secara perlahan dengan implementasi teknologi yang bersih serta efisiensi energi. Kedua, kebijakan Indonesia saat ini secara umum masih berpihak pada bahan bakar fosil sehingga disarankan untuk menetapkan kebijakan terkait EBT secara spesifik untuk meningkatkan minat investor pada EBT, seperti kebijakan pembelian listrik dari EBT. Terakhir, titik balik pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan Indonesia diprediksi lebih tinggi dari PDB per kapita tahun 2021. Pemerintah harus melakukan ekspansi ekonomi untuk mencapai titik balik pertumbuhan yang diperkirakan melalui langkah-langkah fiskal dan moneter yang tepat dan perlu didukung oleh kebijakan terkait lingkungan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M., Jabeen, G., & Wu, Y. 2021. Heterogeneity of pollution haven/halo hypothesis and Environmental Kuznets Curve hypothesis across development levels of Chinese provinces. *Journal of Cleaner Production*, 285(xxxx), 124898. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124898>
- Al-Mulali, U., Saboori, B., & Ozturk, I. 2015. Investigating the environmental Kuznets curve hypothesis in Vietnam. *Energy Policy*, 76, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.019>
- Ali, M. U., Gong, Z., Ali, M. U., Wu, X., & Yao, C. 2021. Fossil energy consumption, economic development, inward FDI impact on CO<sub>2</sub> emissions in Pakistan: Testing EKC hypothesis through ARDL model. *International Journal of Finance and Economics*, 26(3), 3210-3221. <https://doi.org/10.1002/ijfe.1958>
- Arinaldo, D., & Adiatama, J. C. 2019. Dinamika Batu Bara Indonesia: Menuju Transisi Energi yang Adil. In F. Tumiwa (Ed.), *Institute for Essential Services Reform (IESR)*. IESR. <http://iesr.or.id/wp-content/uploads/2019/04/SPM-bahasa-lowres.pdf>
- [BPPT] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. 2021. *Outlook Energi Indonesia 2021* (E. Hilmawan, I. Fitriana, A. Sugiyono, & Adiarso (Eds.)). Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.
- [Bappenas] Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. 2014. *Prakarsa Strategis Pengembangan Konsep Green Economy*. Badan Perencanaan Pembangunan Nasional.
- [Bappenas] Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. 2019. *Indonesia 2045 Berdaulat, Maju, Adil dan Makmur*. In Bappenas (Ed.), Bappenas. [https://www.bappenas.go.id/files/Visi Indonesia 2045/Ringkasan Eksekutif Visi Indonesia 2045\\_Final.pdf](https://www.bappenas.go.id/files/Visi%20Indonesia%2045/Ringkasan%20Eksekutif%20Visi%20Indonesia%2045_Final.pdf)
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2022. *Pertumbuhan Ekonomi Indonesia Triwulan IV-2020*. BPS, 14. <https://www.bps.go.id/pressrelease/2021/02/05/1811/ekonomi-indonesia-2020-turun-sebesar-2-07-persen--c-to-c-.html>
- Bagher, A. M., Vahid, M., Mohsen, M., Parvin, D. 2015. *Hydroelectric Energy Advantages and Disadvantages*. *American Journal of Energy Science*, 2(2), 17-20.
- Baidya, R., Ghosh, S. K., & Parlikar, U. V. 2016. *Co-processing of Industrial Waste in Cement Kiln - A Robust System for Material and Energy Recovery*. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 309-317. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.041>
- Beşe, E., & Kalayci, S. 2021. Environmental Kuznets curve (EKC): Empirical relationship between economic growth, energy consumption, and CO<sub>2</sub> emissions: Evidence from 3 developed countries. *Panoeconomicus*, 68(4), 483-506. <https://doi.org/10.2298/pan180503004b>
- Branche, E. 2017. *The multipurpose water uses of hydropower reservoir: The SHARE concept*. *Comptes Rendus Physique*, 18(7-8), 469-478. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.06.001>
- Cavanaugh, J. E., & Neath, A. A. 2019. *The akaike information criterion: Background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 11(3), 1-11. <https://doi.org/10.1002/wics.1460>
- Cole, M. A., Rayner, A. J., & Bates, J. M. 1997. *The environmental Kuznets curve: An empirical analysis*. *Environment and Development Economics*, 2(4), 401-416. <https://doi.org/10.1017/S1355770X97000211>
- Dankumo, AM., Ishak, S., Oluwaseyi, ZA., & Onisanwa, ID. 2019. Does Okun's law explain the relationship between economic growth and unemployment in Nigeria? *J Ekon Malaysia*. 53(3). doi:10.17576/JEM-2019-5303-12.
- Degefu, D. M., He, W., & Zhao, J. H. 2015. *Hydropower for sustainable water and energy development in Ethiopia*. *Sustainable Water Resources Management*, 1(4), 305-314. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0029-0>
- [DEN] Dewan Energi Nasional. 2015. *Ketahanan Energi Indonesia*. Dewan Energi Nasional.
- [DEN] Dewan Energi Nasional. 2019. *Indonesia Energy Outlook 2019* (S. Abdurrahman, M. Pertiwi, & Walujanto (Eds.)). DEN.
- [DJPPPI] Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim. 2017. *Strategi Implementasi NDC* (N. Masripatin (Ed.)). Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim. [http://ditjenppi.menlhk.go.id/reddplus/images/adminppi/dokumen/strategi\\_implementation\\_ndc.pdf](http://ditjenppi.menlhk.go.id/reddplus/images/adminppi/dokumen/strategi_implementation_ndc.pdf)
- [DJEBTKE] Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi. 2020. *Laporan Kinerja Ditjen EBTKE 2020*. <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-laporan-kinerja-ditjen-ebtke-2020.pdf>
- [DJEBTKE] Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi. 2021. *Laporan Kinerja Ditjen EBTKE 2021 Final*. KESDM.

- Alifah, S., Wijayanti, P, dan Syaikat, Y. (2023). Mampukah Pembangkit Listrik Tenaga Air Mendorong Green Economy untuk Indonesia?. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(3), 647-658, doi:10.14710/jil.21.3.647-658
- Du, X., Xie, Z. 2020. Occurrence of turning point on environmental Kuznets curve in the process of (de)industrialization. *Structural Change and Economic Dynamics*, 53, 359–369. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2019.06.003>
- Dutu, R. 2016. Challenges and policies in Indonesia's energy sector. *Energy Policy*, 98, 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.009>
- Frey, G. W., Linke, D. M. 2002. Hydropower as a renewable and sustainable energy resource meeting global energy challenges in a reasonable way. *Energy Policy*, 30(14), 1261–1265. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00086-1)
- Gill, A. R., Viswanathan, K. K., Hassan, S. 2018. The Environmental Kuznets Curve (EKC) and the environmental problem of the day. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(August 2016), 1636–1642. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.247>
- Gokmenoglu, K., Azin, V., & Taspinar, N. 2015. The relationship between industrial production, GDP, inflation, and oil price: The case of Turkey. *Procedia Economics and Finance*, 25(May), 497–503. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00762-5](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00762-5)
- Gujarati, D. N. 2003. *Basic Econometrics*. In McGraw-Hill Companies.
- Hartono, D., Hastuti, S. H., Halimatussadiyah, A., Saraswati, A., Mita, A. F., & Indriani, V. 2020. Comparing the impacts of fossil and renewable energy investments in Indonesia: A simple general equilibrium analysis. *Heliyon*, 6(6), e04120. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04120>
- Jumhur, J. 2020. Penerapan autoregressive distributed lag dalam memodelkan pengaruh inflasi, pertumbuhan ekonomi, dan FDI terhadap pengangguran di Indonesia. *Jurnal Ekonomi Bisnis Dan Kewirausahaan*, 9(3), 250. <https://doi.org/10.26418/jebik.v9i3.41332>
- Kartiasih, F., Syaikat, Y., & Anggraeni, L. (2012). Determinan intensitas energi di Indonesia. *Jurnal Ekonomi Dan Pembangunan Indonesia*, 12(2), 192–214. <https://doi.org/10.1108/IJOEM-01-2020-0048>
- [KESDM] Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral. 2017. *Kajian Penggunaan Faktor Emisi Lokal (Tier 2) dalam Kajian Inventarisasi GRK Sektor Energi (Issue Cetakan Pertama)*. Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral.
- [KLH] Kementerian Lingkungan Hidup. 2012. *Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional: Metodologi Penghitungan Tingkat Emisi GRK Sektor Pengadaan dan Penggunaan Energi*. Kementerian Lingkungan Hidup.
- Khan, M. K., Teng, J. Z., Khan, M. I. 2019. Effect of energy consumption and economic growth on carbon dioxide emissions in Pakistan with dynamic ARDL simulations approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(23), 23480–23490. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05640-x>
- Mankiw, N. G. 2003. *Macroeconomics (5th ed.)*. Worth Publishers.
- Mankiw, N. G. 2019. *Macroeconomics (7th ed.)*. Worth Publishers.
- Marsiglio, S., & Privileggi, F. 2021. On the economic growth and environmental trade-off: a multi-objective analysis. *Annals of Operations Research*, 296(1–2), 263–289. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03217-y>
- Maruddani, D. A. I., Tarno, & Anisah, R. Al. 2008. Uji stasioneritas data inflasi dengan phillips-peron test. *Media Statistika*, 1(1), 27–34.
- Mondal, P., Shit, L., & Goswami, S. 2014. Study of Effectiveness of Time Series Modeling (Arima) in Forecasting Stock Prices. *International Journal of Computer Science, Engineering and Applications*, 4(2), 13–29. <https://doi.org/10.5121/ijcs.ea.2014.4202>
- Murshed, M., Alam, R., & Ansarin, A. 2021. The environmental Kuznets curve hypothesis for Bangladesh: the importance of natural gas, liquefied petroleum gas, and hydropower consumption. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(14), 17208–17227. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11976-6>
- Nautiyal, H., & Goel, V. 2020. Sustainability assessment of hydropower projects. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121661. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121661>
- Ng, C. F., Choong, C. K., & Lau, L. S. 2020. Environmental Kuznets curve hypothesis: asymmetry analysis and robust estimation under cross-section dependence. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15), 18685–18698. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08351-w>
- Nugroho, S. W., & Chasanah, N. 2011. Analisis efisiensi distribusi listrik unit pelayanan jaringan dengan metode data envelopment analysis (DEA) studi kasus di area pelayanan jaringan Kudus, PT. PLN (Persero). 6(1), 47–56.
- Ocal, O., & Aslan, A. 2013. Renewable energy consumption-economic growth nexus in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 494–499. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.036>
- Ozatac, N., Gokmenoglu, K. K., Taspinar, N. 2017. Testing the EKC hypothesis by considering trade openness, urbanization, and financial development: the case of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(20), 16690–16701. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9317-6>
- Ozturk, I., & Acaravci, A. 2010. The causal relationship between energy consumption and GDP in Albania, Bulgaria, Hungary and Romania: Evidence from ARDL bound testing approach. *Applied Energy*, 87(6), 1938–1943. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.010>
- [Perpres] Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) (pp. 67–69). 2017.
- [PLN] Perusahaan Listrik Negara. 2021. *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030*. In *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2021-2030*. Perusahaan Listrik Negara.
- Pesaran, M. H., & Shin, Y. 1997. An autoregressive distributed-lag modelling approach to cointegration analysis. In *Econometrics and Economic Theory in the 20th Century: The Ragnar Frisch Centennial Symposium*. Cambridge University Press.
- Pesaran, M.H., Shin, Y., & Smith, R.J. 2001. Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *J Appl Econom*. 16(3):289–326. doi:10.1002/jae.616.
- Ridzuan, A. R., Albani, A., Latiff, A. R. A., Mohamad, M. I., & Murshidi, M. H. 2020. The impact of energy consumption based on fossil fuel and hydroelectricity generation towards pollution in

- Malaysia, Indonesia and Thailand. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(1), 215–227. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8140>
- Samargandi N, Fidrmuc J, & Ghosh S. 2015. Is the Relationship Between Financial Development and Economic Growth Monotonic? Evidence from a Sample of Middle-Income Countries. *World Dev.* 68(1):66–81. doi:10.1016/j.worlddev.2014.11.010.
- Solarin, S. A., & Ozturk, I. 2015. On the causal dynamics between hydroelectricity consumption and economic growth in Latin America countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1857–1868. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.003>
- Tsujino, R., Yumoto, T., Kitamura, S., Djamaluddin, I., & Darnaedi, D. 2016. History of forest loss and degradation in Indonesia. *Land Use Policy*, 57, 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.05.034>
- Ummalla, M., & Samal, A. 2018. The impact of hydropower energy consumption on economic growth and CO 2 emissions in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(35), 35725–35737. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3525-6>
- Wang XG, Yan L, & Zhao XG. 2021. Tackling the ecological footprint in china through energy consumption, economic growth and CO2 emission: an ARDL approach. *Qual Quant.*(88). doi:10.1007/s11135-021-01128-4.
- Wild, T. B., & Loucks, D. P. 2014. Managing flow, sediment, and hydropower regimes in the Sre Pok, Se San, and Se Kong Rivers of the Mekong basin. *Water Resources Research*, 50(6), 5141–5157. <https://doi.org/10.1002/2014WR015457>
- Xu, B., Zhong, P. A., Du, B., Chen, J., Liu, W., Li, J., Guo, L., & Zhao, Y. 2018. Analysis of a stochastic programming model for optimal hydropower system operation under a deregulated electricity market by considering forecasting uncertainty. *Water (Switzerland)*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/w10070885>
- Zambrano-Monserrate, M. A., Silva-Zambrano, C. A., Davalos-Penafiel, J. L., Zambrano-Monserrate, A., & Ruano, M. A. 2018. Testing environmental Kuznets curve hypothesis in Peru: The role of renewable electricity, petroleum and dry natural gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(March 2016), 4170–4178. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.11.005>
- Zambrano-Monserrate, M. A., Valverde-Bajaña, I., Aguilar-Bohórquez, J., & Mendoza-Jiménez, M. 2016. Relationship between economic growth and environmental degradation: Is there evidence of an EKC for Brazil. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 6(2), 208–216. <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/1850>