인도네시아의 탈탄소화 경로 평가: 석탄화력발전소에서 태양광 발전과 탄소포집저장의 탄소감축비용 비교

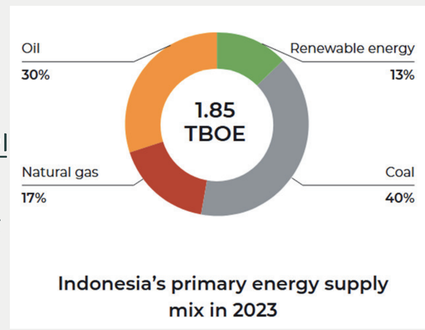
Evaluating Decarbonization Pathways in Indonesia: A Levelized Cost of Carbon Abatement Comparison of Solar PV and Carbon Capture and Storage on Coal Power Plants



AUTHOR
Alland Dharmawan | 연세대학교 국제대학원
세션: 탄소중립 / 에너지 | Session: Carbon Neutrality / Energy
이메일: alland.dharmawan82@gmail.com

BACKGROUND

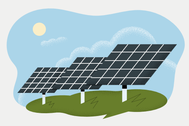
인도네시아는 세계 8위의 온실가스 배출국으로, 2060년 탄소중립(Net Zero) 달성을 약속하였다. 그러나 전력 생산의 60% 이상이 석탄화력에 의존하고 있어 감축이 쉽지 않다.
저스트 에너지 전환 파트너십(JETP, 2022)을 통해 인도네시아는 2030년까지 전력부문 배출 증가를 멈추고, 석탄 의존을 줄이는 동시에 재생에너지 전환을 가속화하겠다고 약속하였다.
최신 전력공급계획(RUPTL 2025–2034) 에 따르면 신규 전력설비의 76%가 재생에너지이며, 이 중 17.1 GW가 태양광으로 계획되었다. 그러나 정부는 여전히 석탄의 경제적 중요성을 인정하며, 완전한 퇴출은 어렵다는 입장을 유지하고 있다.
이에 본 연구는 인도네시아 에너지 전환의 핵심 과제인 “석탄 의존을 유지하면서도 탄소중립을 달성할 수 있는가?”라는 질문에 답하고자 한다.
이를 위해 두 가지 주요 감축 경로를 비교하였다:
① 석탄발전 대체형 유틸리티 태양광, ② 기존 석탄발전소 CCS 개조.



Indonesia’s primary energy supply mix in 2023

RESEARCH QUESTION

1. 인도네시아 전력부문에서 다음 두 기술의 탄소감축 균등비용(LCCA) 은 각각 얼마인가?
   a. 석탄화력발전을 대체하는 유틸리티 태양광
   b. 기존 석탄화력에 적용되는 CCS
2. 두 기술 중 어떤 경로가 더 경제적·효율적 인 탄소 감축 수단인가?

METHODOLOGY

방법론
1) 연구설계·범위
- 질문: 어떤 경로가 tCO_2당 비용이 더 낮은가?
- 기준선: 100 MW 석탄화력(무감축).
- 비교 경로: ① 태양광 대체(조기 폐지 후 연간 전력 동일), ② CCS 개조(후연소 90% 포집).
- 지표: LCCA(탄소감축균등비용, USD/tCO_2).

2) LCCA 정의·식

$$\mathrm{LCCA} = \frac{C_1 - C_0}{E_0 - E_1}$$

C1: 대안(태양광/CCS) 생애주기 비용(현재가치)
C0: 기준선(석탄) 생애주기 비용(연료·O&M·감가·폐지 포함)
E0: 기준선 배출량, E1: 대안 배출량(태양광 운영배출≈0, CCS는 잔존배출)
보조식: 연간발전량 =용량X이용률X8,760
감축량 =석탄 배출계수X회피 또는 포집 MWh

3) 시나리오 핵심 가정
- 태양광 대체: 30년 중 10년차에 100 MW 석탄 조기 폐지 → 617.65 MW PV(CF≈17%)로 남은 20년 연간 MWh 매칭.
- CCS 개조: 포집율 90%, 에너지 페널티 25%(순 이용률 70%→52.5%), 손실 전력은 유틸리티 PV 구매로 보전.

4) 입력·자료
- 비용(설비·운영·연료·CO_2 수송·저장·폐지), 성능(이용률, 포집율, 배출계수), 수명.
- 출처: MEMR/PLN RUPTL 2025–2034, IESR, EBTKE 파라미터, 지역 CCS 프록시(인니 보정).

5) 계산 흐름
I. 가정 설정 → 2) C0,E0 산출 → 3) CI 산출 → 4) EI 산출 → 5) LCCA 계산 및 비교.

6) 민감도
- 태양광: 석탄 연료비 변화.
- CCS: CCS CAPEX 50% 하락 가정.

7) 한계
- 운영배출 기준, 계통/저장 투자 미포함, CCS 지질자료 프록시, 정태적 가정.

ANALYSIS & RESULT

탄소감축균등비용(LCCA) 결과		
시나리오	LCCA (USD / tCO_2)	민감도 조건
석탄화력 → 유틸리티 태양광 대체	25.9	석탄 연료비 27 % 감소 시 : 36.4
석탄화력 → CCS 개조	90.8	CCS CAPEX 50 % 감소 시 : 54.3

100 MW 석탄화력발전소를 유틸리티급 태양광으로 대체할 경우, 탄소 감축비용은 톤당 25.9 USD/tCO_2로 가장 경제적이다.
반면 동일 규모 발전소를 CCS(탄소포집저장) 기술로 개조할 경우 90.8 USD/tCO_2로 약 3.5배 높다.
CAPEX가 50 % 감소할 경우 54.3 USD/tCO_2로 개선되어 향후 기술혁신 및 정책지원 하에서 경쟁력 확보 가능성을 보인다.
민감도 분석 결과, 태양광은 석탄가격 변동에 일정 영향을 받지만, CCS는 기술비용 및 재원조달 여건에 큰 의존성을 보인다.

비교 분석 핵심
- 태양광 발전: 즉시 확장 가능하며, 2024년 국산화 비율 완화(40 % → 20 %)로 비용 절감 효과 기대.
- CCS 기술: 산업 부문(철강·시멘트 등)에 적합하지만, 전력 부문에서는 높은 투자비 및 불확실한 재원조달이 제약.
- 에너지저장장치(ESS): 전력망 안정성 확보에 핵심적이며, 비용은 증가하나 시스템 유연성 향상.
- 정책 불일치: 「전력공급기본계획(RUPTL) 2025–2034」은 화석연료 설비를 초기에 집중(2025–2029) 하고 재생에너지는 후반기(2030–2034) 에 집중하여 배출 감축 목표 달성의 위험 초래.

정책적 시사점
- 경제성만으로는 탄소중립을 달성할 수 없다.
- 명확한 허가 절차, 일관된 재정지원, 정책 집행력 강화가 필요하다,
- 단기적으로는 태양광 확대, 중장기적으로는 CCS 기술혁신과 국제협력 기반 구축이 필요하다.

CONCLUSION

본 연구는 석탄화력발전(100MW)을 대상으로,
① 유틸리티급 태양광 대체 시나리오와
② CCS(탄소포집저장) 설비 개조 시나리오의탄소감축균등비용(LCCA) 을 비교하였다.
- 태양광: 25.9 USD/tCO_2 → 현재 가장 비용 효율적
- CCS: 90.8 USD/tCO_2, 기술혁신 시 54.3 USD/tCO_2까지 감소 가능

→ 현재 조건에서는 태양광이 가장 경제적인 탈탄소 경로이며,
CCS는 중장기적 보완 기술로서 연구개발 및 국제협력 기반 강화가 필요함.

FUTURE RESEARCH
- ESS 통합 효과: 비용–신뢰도–감축 간 균형 분석
- 그린 슈퍼그리드: 송전망 확충이 LCOE·LCCA에 미치는 영향
- 탄소가격 시뮬레이션: 시장가격에 따른 CCS 경쟁성 재평가

POLICY ACTION
- 정책 정합성 강화: RUPTL–JETP–NDC 간 이행 일정 및 목표를 통합 관리
- 조기 전환 촉진: 재생에너지 입찰 절차 단순화 및 민간투자 유도
- LCR 완화: 국산화 비율 완화로 태양광 설비 CAPEX 및 LCCA 추가 절감
- CCS 재정지원: 국제공동기금, 보증제도 등 위험분담 메커니즘 마련

KEY TAKEAWAY
태양광은 가장 즉각적이고 비용 효율적인 감축 경로, CCS는 장기적 기술혁신과 정책지원이 필요한 보완 수단이다.

REFERENCES
Agnolucci, P., & Makarenko, N. (2025, June 2). Weakening demand, steady supply: What’s driving coal’s price decline in 2025? World Bank Blogs. Retrieved June 9, 2025, from https://blogs.worldbank.org/en/opendata/weakening-demand--steady-supply--what-s-driving-coal-s-decline-i
KarbonKorea. (2025). Activity 2: Challenges, opportunities, and benefits of using CCS/CCUS as a decarbonization technology in the power sector [Unpublished report].
Pertamina. (2025). Unlocking potential CCS hub Asri Basin implementation [Unpublished report].
PLN. (2025a, June 2). Diseminasi RUPTL PLN 2025–2034: Beyond the greenest RUPTL. Retrieved June 2, 2025, from https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/06524-bahan-dirut-pln.pdf
Rezzouk, H., & Mellit, A. (2015). Feasibility study and sensitivity analysis of a stand-alone photovoltaic–diesel–battery hybrid energy system in the north of Algeria. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 1134–1150. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.103
Yuan, Y., Zhang, W., Aini, L. K., Budianto, K. F., Winayo, M. F., Jie, Y., Sulaeman, J., Lee, K. W. F., & Hamdani, J. (2024, October). Early retirement of coal-fired power plants in Indonesia: A JETP case study (SGFIN Industry Report No. 2). National University of Singapore, Sustainable and Green Finance Institute (SGFIN). Retrieved June 6, 2025, from https://sgfin.nus.edu.sg/wp-content/uploads/2024/10/241009_JETP_Industry_Report.pdf

ACKNOWLEDGMENTS
연세대학교 국제대학원 석사학위 논문으로 발표 및 심사 통과.