



Review

동티모르의 지열 에너지 자원: 현황, 잠재력 및 개발 과제에 대한 고찰

이진용^{1,*}, 권기덕¹, 권영인², 차지혜¹

¹강원대학교 지질학과

²동티모르 지구과학원

Geothermal energy resources in Timor-Leste: A review of current status, potential, and development challenges

Jin-Yong Lee^{1,*}, Kideok Kwon¹, Youngin Kwon², Jihye Cha¹

¹Department of Geology, Kangwon National University

²Instituto de Geociencias de Timor-Leste (IGTL)

Received: September 14, 2025 / Revised: October 18, 2025 / Accepted: October 20, 2025

*Corresponding author: +82-33-250-8551 / E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

요약: 동티모르는 독립 이후 취약한 에너지 인프라와 수입 화석 연료에 대한 높은 의존도라는 중대한 에너지 문제에 직면해 있다. 이러한 상황은 국가의 경제적 취약성을 심화시키고 지속 가능한 발전을 저해한다. 지열 에너지는 환경 친화적이고 재생 가능하며 안정적인 기저 부하 전력을 제공할 수 있는 잠재력을 가진 중요한 대안으로 부상하고 있다. 본 고찰은 동티모르의 지질학적 배경과 지열 특성을 분석하고, 현재까지의 지열 탐사 및 연구 결과를 평가하며, 지열 에너지 개발의 기술적, 경제적, 환경적, 사회적 측면을 심층적으로 논의한다. 또한 동티모르의 지열 에너지 잠재력을 실현하기 위한 정책 및 제도적 제언을 제시한다. 현재까지 동티모르의 지열 자원에 대한 상세한 탐사 데이터는 제한적이지만, 활발한 판구조론적 활동과 다수의 온천 분포는 상당한 잠재력을 시사한다. 지열 에너지 개발은 에너지 안보 강화, 경제 다각화, 온실가스 배출 감소 및 지역 사회 발전에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 초기 탐사 비용, 기술 및 전문성 부족, 불확실한 정책 환경, 토지 분쟁 등 해결해야 할 과제도 명확하다. 국제 협력과 포괄적인 국내 로드맵 수립이 동티모르의 지열 에너지 잠재력을 효과적으로 활용하는 데 필수적이다.

주요어: 동티모르, 지열에너지, 판구조론, 온천

ABSTRACT: Since gaining independence, Timor-Leste has faced serious energy challenges, characterized by a fragile energy infrastructure and heavy reliance on imported fossil fuels. This situation exacerbates the country's economic vulnerability and hinders sustainable development. Geothermal energy is emerging as a vital alternative with the potential to provide environmentally friendly, renewable, and stable baseload power. This review analyzes the geological background and geothermal characteristics of Timor-Leste, evaluates the results of geothermal exploration and studies conducted to date, and discusses in depth the technical, economic, environmental, and social aspects of geothermal energy development. It also offers policy and institutional recommendations for realizing the country's geothermal energy potential. Although detailed exploration data on Timor-Leste's geothermal resources remain limited, the presence of active tectonic features and numerous hot springs suggests considerable potential. The development of geothermal energy is expected to significantly contribute to strengthening energy security, diversifying the economy, reducing greenhouse gas emissions, and promoting regional development. However, several challenges must be addressed, including high upfront exploration costs, a lack of technical expertise, an uncertain policy environment, and land tenure disputes. International cooperation and the establishment of a comprehensive national roadmap are essential for effectively harnessing Timor-Leste's geothermal energy potential.

Key words: Timor-Leste, geothermal energy, plate tectonics, hot spring

1. 서론

동티모르는 2002년 인도네시아로부터 독립한 이래 취약한 에너지 인프라와 수입 화석 연료에 대한 높은 의존성으로 인해 어려움을 겪고 있다(Scheiner, 2022). 비록 티모르 해에 풍부한 해상 가스 매장량을 보유하고 있음에도 불구하고, 국가의 에너지 소비량은 세계 최하위권에 속하며, 특히 농촌 지역의 대다수 인구는 전력 접근성이 부족하다(Scheiner, 2022). 2022년 동티모르의 전력 소비량은 4억 1,476만 킬로와트시(kWh)에 달했으며, 거의 모든 전력이 석유 또는 기타 화석 연료원에서 생산되었다(Scheiner, 2022). 이러한 화석 연료 의존성은 국가를 국제 유가 변동에 취약하게 만들며, 매년 1억 3천만 달러 이상의 디젤 수입 비용을 발생시킨다(Barma, 2021).

국제통화기금 보고서에 따르면, 동티모르는 과거 석유 생산으로 상당한 자금을 석유 기금(Petroleum Fund)에 비축하여 180억 달러를 초과하는 규모를 형성했으나, 석유 및 가스 생산이 감소하면서 2030년대 말에는 이 기금이 고갈될 위험에 처해 있다(IMF, 2025). 이러한 재정적 압박은 식량 및 기타 필수품 수입 중단, 공공 서비스 혼란 등 잠재적으로 불안정한 결과를 초래할 수 있다(IMF, 2025). 따라서 동티모르는 경제 다각화와 함께 지속 가능한 에너지 공급원을 확보하는 것이 시급하다. 동티모르 정부는 에너지 다각화의 필요성을 인식하고 에너지 안보 강화, 환경 보호, 전력 접근성 개선을 위한 전략의 일환으로 재생 에너지원 개발에 전념하고 있다(Scheiner, 2022). 동티모르 전략 개발 계획(SDP) 2011-2030은 2030년까지 재생 에너지 사용 비중을 50%로 늘리는 것을 목표로 설정했으며, 이는 국가의 에너지 전환에 대한 강력한 의지를 보여준다(Agbakwuru *et al.*, 2024). 이러한 목표 달성은 재정 부족, 정치적 불확실성, 정책 및 지침 부재, 토지 분쟁, 전문성 부족 등 다양한 도전에 직면해 있지만, 재생 에너지 개발은 고용 창출, 토지 소유자 소득 증대, 에너지 비용 절감, 에너지 독립성 확보, 안정적인 에너지 가격 유지 등 다각적인 경제적 이점을 제공할 수 있다(Sharma, 2024).

한편 지열 에너지는 지구 내부의 열을 활용하는 재생 에너지원으로 태양열, 수력, 풍력과 같은 다른 재생 에너지원과 함께 그 중요성이 증대되고 있다(Lee, 2009). 지열 에너지는 청정하고 신뢰할 수 있으며 재생 가능한 자원으로 간주되며, 특히 기저 부하 전력 수요를 보조하는 데 이상적이다(Lee, 2009; Ahn *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2013). 지열 에너지 활용 방식은 크게 세 가지로 나뉜다. 첫 번째는 발전(Power Generation)으로 일반적으로 지구 심부의 지열 자원을 활용하여 전기를 생산하는데 이는 건증기(Dry Steam), 습증기(Flash Steam), 바이너리 사이클(Binary Cycle) 발전 방식으로 구분된다(Gong *et al.*, 2023). 두 번째는 지열 에

너지의 직접 이용(Direct Use)으로 지구 표면 가까이에서 얻을 수 있는 저온 지열수를 직접 활용하는 방식이다. 주택 난방, 온실 재배, 양식장, 산업 공정, 도로 및 보행로 제설, 수영장 난방 등 다양한 용도로 사용될 수 있다(Gong *et al.*, 2023). 직접 이용 시스템은 심부 지열 시스템보다 초기 자본 비용이 낮지만, 화산 활동이나 지각 활동이 활발하여 고온 지하수가 지표면 근처에 존재하는 지역에 한정된다(Gong *et al.*, 2023). 그리고 세 번째는 지열 히트 펌프(Ground Source Heating and Cooling)로 지표면 아래의 안정적인 온도를 이용하여 건물 냉난방에 활용하는 방식이다(Lee, 2009; Park *et al.*, 2013).

지열 에너지는 여러 가지 장점이 있다. 우선 지열 발전소는 탄소 발자국이 최소화되며, 관련 오염 물질 배출이 매우 적고 온실가스 배출을 크게 줄일 수 있다(Gong *et al.*, 2023). 또 화석 연료와 달리 지구 내부의 지열원은 자연적으로 보충되며 수십억 년 동안 지속될 수 있다. 풍력이나 태양광과 달리 지열 에너지는 항상 이용 가능하며 변동성이 적어 기저 부하 전력 수요를 보조하는 데 이상적이다(Park *et al.*, 2013). 또한 자연적으로 발생하는 자원이므로 화석 연료처럼 채굴이나 추출이 필요 없으며 전 세계적으로 지열 자원의 총 잠재력은 현재 에너지 소비량을 훨씬 초과한다(Feder, 2020). 그러나 지열 에너지 개발에는 몇 가지 단점도 존재한다. 특히 탐사 및 시추 단계에서 높은 초기 투자 비용이 발생한다(Park *et al.*, 2013). 또 지열 발전소는 에너지를 활용할 수 있는 특정 지역에만 건설될 수 있다. 그리고 시추 과정에서 지구 아래에 저장된 온실가스가 대기로 방출될 수 있으며, 지진 및 지반 침하를 유발할 가능성도 있다(Lee *et al.*, 2016; Khansefid *et al.*, 2022). 하지만 이러한 가스 배출량은 화석 연료에 비해 훨씬 적다(Park *et al.*, 2013).

본 논문의 목적은 동티모르의 지열 에너지 자원에 대한 종합적인 고찰을 제공하는 것이다. 구체적으로는 동티모르의 지질학적 배경과 지열 특성, 특히 판구조론적 위치, 지진 활동, 주요 지질 구조, 화산 활동 및 온천 분포 현황을 분석한다. 또 현재까지 수행된 지열 탐사 및 연구 결과를 검토하고, 지열 에너지 잠재력을 평가한다. 아울러 지열 에너지 개발과 관련된 기술적, 경제적, 환경적, 사회적 과제를 도출하고 논의한다. 그리고 동티모르의 지열 에너지 개발을 촉진하기 위한 정책 및 제도적 제언을 제시한다. 궁극적으로 이 연구는 동티모르의 지열 에너지 개발에 대한 이해를 증진하고, 향후 탐사 및 개발 프로젝트를 위한 기초 자료를 제공하며 지속 가능한 에너지 미래를 위한 정책 결정에 기여하는 것을 목표로 한다.

2. 동티모르의 지질학적 배경 및 지열 특성

2.1. 판구조론적 위치 및 지진 활동

동티모르의 지질은 복잡한 판구조론적 배경을 가지고 있

다(Audley-Charles, 2011). 이 지역은 약 4백만 년 전(4 Ma) 호주 대륙판이 아시아 반다 전호(fore-arc)와 충돌하면서 형성된 반다 해구(Banda Trench)가 습곡 및 충상단층 산맥인 티모르 섬으로 변형된 결과이다(Miller *et al.*, 2021). 이 충돌 과정은 모든 해양 지각이 섭입되고 호주 대륙 지각이 아시아 전호 아래의 섭입 경로로 진입할 수 없게 되면서 시작되었다. 충돌 이후에도 호주 하부 지각 맨틀 암석권의 섭입은 계속되었으며, 이는 티모르의 융기를 초래했다(Audley-Charles, 2011; Tate *et al.*, 2015). 약 2.5 Ma 이후 호주 하부 지각 암석권의 섭입 속도가 느려지면서, 티모르의 지각 충돌대(Tectonic Collision Zone, TCZ)가 해발 3 km 이상으로 융기했다(Tate *et al.*, 2015). 동티모르에서는 약 4 Ma 경에 융기가 시작되어 평균 1.5 km/Ma의 속도를 보인 것으로 추정된다(Audley-Charles, 2011; Tate *et al.*, 2015).

한편 지진 활동 측면에서는 아래로 휘어지는 호주판(맨틀 암석권 슬랩과 해양 지각으로 구성)은 티모르 북부, 웨타르 해협(Wetar Strait) 및 반다 화산호(Banda Volcanic Arc) 섬들 아래로 섭입하고 있다(Richardson, 1993; Tate *et al.*, 2015). 이 섭입된 판은 지진학적으로 600 km 이상의 깊이가

지 추적 가능하다(Tate *et al.*, 2015). 흥미로운 점은 북티모르-웨타르 무지진 삼각지대(aseismic triangle)가 존재한다는 것인데 이 지역은 75 km에서 300 km 깊이 사이에 진원지가 거의 없으며, 이는 반다 호 화산 활동이 중단된 호주 대륙 경계의 일부와 양의 상관관계를 보인다(Richardson, 1993; Tate *et al.*, 2015). 이러한 지진 활동 패턴과 판구조론적 세팅은 동티모르가 지열 에너지원 형성에 유리한 지열 기울기 및 열 흐름을 가질 수 있음을 나타낸다(그림 1).

2.2. 주요 지질 구조 및 화산 활동

동티모르의 지질은 중기 마이오세와 중기 플라이오세 동안 호주 대륙 경계 퇴적물 위에 쌓인 복합적인 충상단층으로 형성되었다고 알려져 있다(Keep *et al.*, 2005; Earle, 2023). Lawless *et al.* (2005)에 따르면, 동티모르 본토는 비화산성 외호(Outer Banda Arc)에 속하며 최근 마그마성 활동 흔적이 없다. 반면 아타우로 섬은 내호(Inner Arc) 화산활동 산물로 젊은 화산암류를 포함하고 있으며, 동북부 지역에서는 후기 플라이오세 이후의 더 젊은 화산활동 가능성도 제시된다(Earle, 2023).

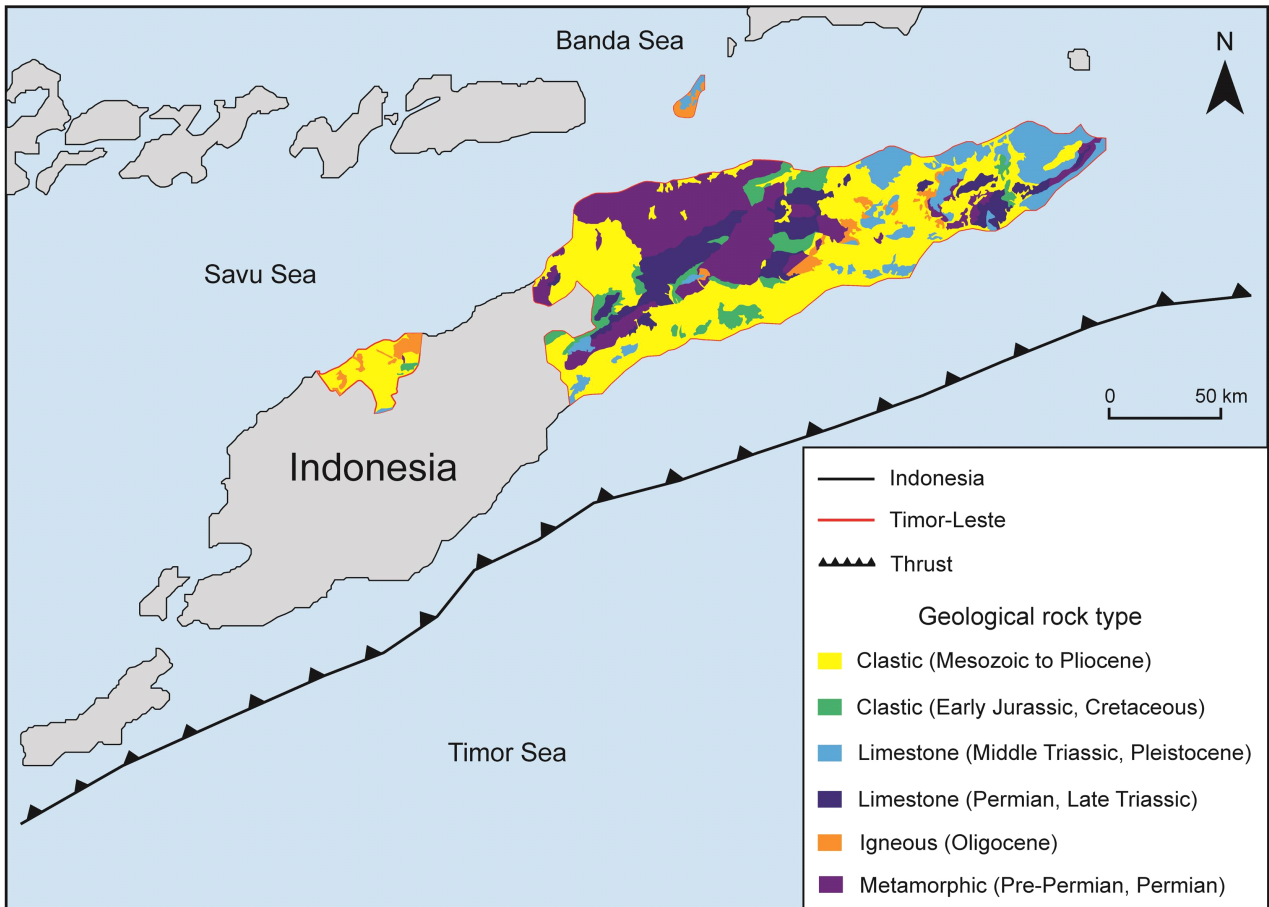


Fig. 1. Tectonic and geological setting of Timor-Leste (modified from Reed *et al.*, 1996).

한편 동티모르에서는 지각 교란으로 인해 네 가지 독특한 지체구조-층서 단위가 나타난다. 첫째, 자생층(Autochthonous units)은 주요 조산 운동 중 및 이후 티모르 분지에서 퇴적된 암석 단위로, 후기 마이오세-플라이오세 몰라스 지층과 제4기 산호초 탄산염 및 층적층을 포함한다(Villeneuve *et al.*, 2005). 둘째, 준자생층(Parautochthonous units)은 호주 대륙판의 북쪽 이동으로 현재 위치에 도달한 비교적 일관된 층돌 전 호주 대륙 경계 지층이다. 이는 티모르 섬과 동티모르의 가장 큰 구성 요소를 형성하며, 페름기 터비다이트 사암 및 석회암, 트라이아스기 원양 석회암 및 사암, 쥐라기 셰일, 백악기 방산층암 및 셰일 등을 포함한다(Berry and Jenner, 1982). 셋째, 타생층(Allochthonous units)은 페름기부터 쥐라기까지의 변성암과 제3기 반다 호 화산암으로 구성되며, 하부 지각에서 분리되어 준자생층 및 자생층 위에 층상되었다(Audley-Charles, 1965; Earle, 2023). 넷째, 올리스트롬층(Olistrostrom units)은 보보나로 스케일리 점토층(Bobonaro Scaly Clay Formation)으로 점토 기질 내에 페름기부터 초기 마이오세까지의 다양한 각진 블록이 혼합된 형태이다(Earle, 2023). 이러한 복잡한 지질 구조는 구리, 금, 은, 망간 등 다양한 금속 광물의 발생에 유리한 환경을

조성한다. 특히 오피올라이트 암석군과 관련된 구리-금-은 광상은 오수, 오수알라, 마나투토, 라우텡 지역에서 보고되었으며 이러한 귀금속의 발생은 대부분 북부 해안 지역과 국가의 중앙부에 집중되어 있고, 층상단층과 관련이 있다(Audley-Charles, 1965; Earle, 2023).

동티모르에는 화산 활동과 관련하여 오에쿠세(Oecusse)의 오에실로(Oesilo) 머드 화산과 비케케(Viqueque)의 라이타후(Raitahu) 머드 화산과 같은 머드 화산 지대가 존재한다(Istadi *et al.*, 2012). 머드 화산은 지구 깊은 곳에서 가열된 뜨거운 물이 지하 광물 퇴적물과 혼합되어 진흙 슬러리를 형성하고, 이것이 지하 압력 불균형으로 인해 지질 단층이나 균열을 통해 위로 분출되면서 형성된다(Istadi *et al.*, 2012; Tanaka *et al.*, 2020). 이들 머드 화산에서 방출되는 가스의 약 86%는 메탄이며, 이산화탄소와 질소는 상대적으로 적게 배출된다. 이러한 머드 화산의 존재는 지하에 열원과 유체 순환 시스템이 존재할 가능성을 시사하며, 이는 지열 에너지 잠재력과 연결될 수 있다.

2.3. 지열 이상대 및 온천 분포

동티모르는 활발한 지각 활동과 복잡한 지질 구조로 인

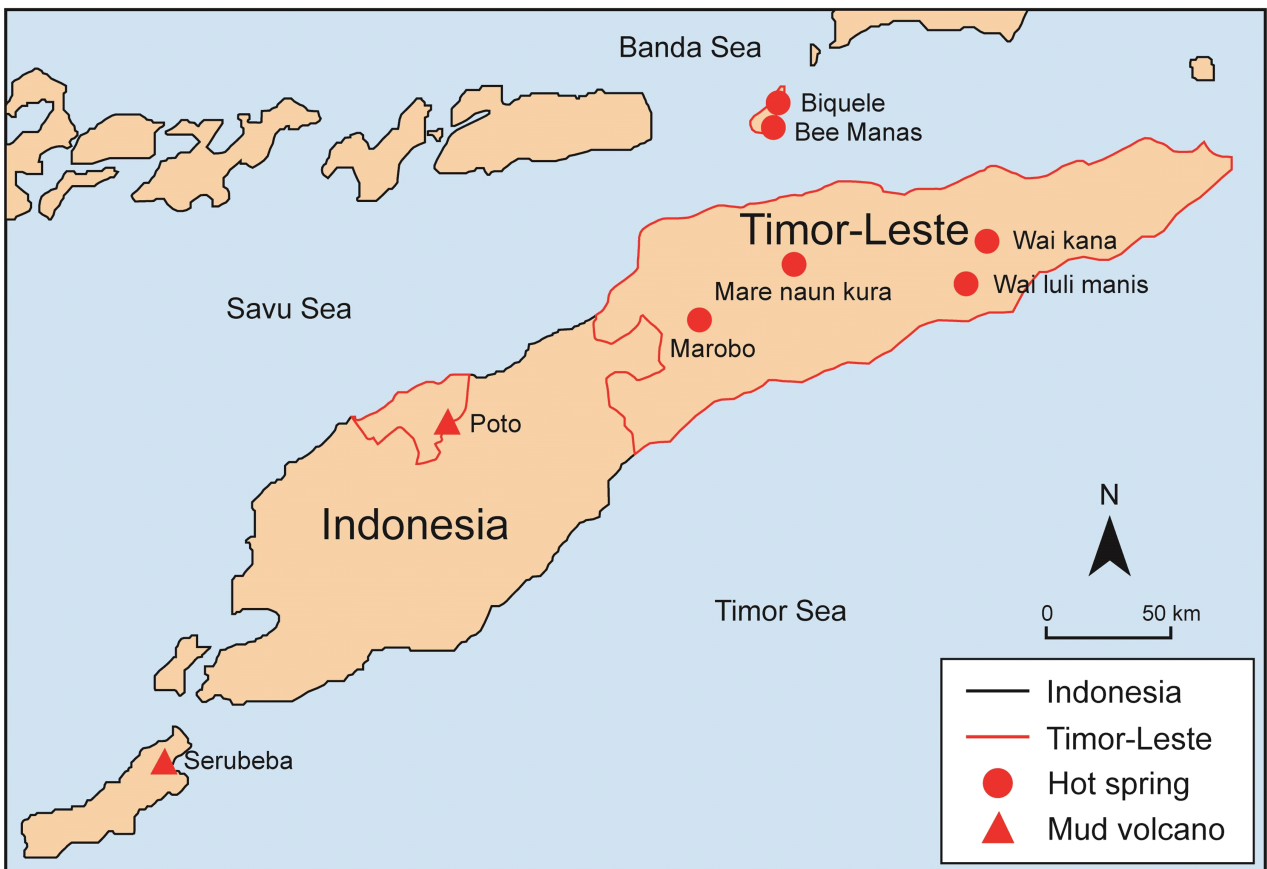


Fig. 2. Distribution of hot springs and geothermal manifestations.

Table 1. Summary of major hot springs in Timor-Leste and their characteristics (Lawless *et al.*, 2005; Concentrations: mg/L).

Location	Temp. (°C)	pH	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	B	SiO ₂
<i>Mainland</i>											
Mara Naun Kura I	62	7.63	147	3.8	31	17.9	29	21	491	0.9	47
Mara Naun Kura II	61	7.33	109	2.6	44	19	21	54	445	0.8	37
Wailuli Manis	57	8.1	504	26	35	13.4	538	127	509	8.7	50
Wal Kana	32	7.29	16	3.5	77	18.5	13	32	327	<0.1	18
Marobo	46	7.52	297	8	53	24	201	42	775	5.6	28
<i>Atauro Island</i>											
Nusalo	57	-	9644	375	667	998	17000	2784	-	5.6	38
Biquele I	70	6.63	5283	223	1496	207	11768	675	153	11.4	205
Biquele II			4307	194	1699	10	10438	310	155	12.7	243

해 여러 지열 이상대와 온천이 분포하고 있다. 확인된 주요 온천 지역으로는 마로보(Marobo), 와이카나(Waicana), 우아토 카르바우(Uato Carbau), 아타우로(Atauro) 및 오에쿠세(Oecusse) 등이 있다(그림 2; 표 1; Boedihardi *et al.*, 1993; Lawless *et al.*, 2005). 마로보 온천은 46-47°C, 총 유량 약 10 kg/s이며, 방해석과 일부 석고, 황 침전물이 관찰되고 온천수는 Na-HCO₃형이며, 단층 접촉대와 관련된 것으로 추정된다(Lawless *et al.*, 2005; Rosli *et al.*, 2022). 또 화산섬인 아타우로 섬의 비케레(Biquele) 온천은 수온 70°C로, 해수 기원(Cl⁻ 풍부수)의 지화학적 특징을 보인다. 오에쿠세(Oecusse)는 끓는 진흙 웅덩이(bubbling mud pools)가 관찰되는데 머드 화산과 연관되어 지하의 열 흐름을 나타낼 수 있다(Polii and Rampengan, 2020).

한편 지열 유체의 지화학적 특성은 지하 저류층의 온도, 유체 유형, 유체-암석 상호작용에 대한 중요한 정보를 제공한다. 일반적으로 지열 유체는 용존 고형물(TDS) 함량, pH, 주요 이온(나트륨, 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 염소, 실리카, 황산염, 중탄산염) 및 미량 독성 원소(수은, 불소, 붕소, 비소)의 농도를 통해 특성화되며 용존 가스로는 이산화탄소, 황화수소, 암모니아, 메탄 등이 포함될 수 있다(Mott *et al.*, 2022). 온천수의 화학적 조성은 지하수가 암석을 통과하면서 화학적으로 반응하여 특정 광물을 용해시키거나 침전시키고, 원소 교환이 일어나는 과정을 반영한다. 예를 들어, 실리카와 탄산칼슘(방해석)은 지열 유체에서 흔히 발견되는 광물이며, 이들의 용해도는 온도 변화에 따라 달라진다(Dolejš and Manning, 2010).

그런데 현재까지 동티모르의 와이카나, 우아토 카르바우, 아타우로 온천에 대한 상세한 지화학적 분석 결과는 많지는 않으나 2003년에 와이카나와 아타우로 온천은 지화학 분석이 수행되었으며, 와이카나 온천은 Na-HCO₃형으로 확인되었다. 다만 우아토 카르바우(Uato Carbau)는 현장 접근이 어려워 지화학 자료가 아직 보고되지 않았다. 인접 지역인

인도네시아 플로레스 섬의 마탈로코(Mataloko)와 나게(Nage) 지역에서는 지표면 온도 이상(37.75°C 및 37.85°C)과 규산염 점토 광물 및 석영을 포함하는 암석 변질이 확인되었으며, 이는 지열 잠재력을 나타내는 지표가 된다(Mardiati *et al.*, 2020). 이러한 지화학적 지표들은 지열 시스템의 유형과 잠재적 저류층의 특성을 파악하는 데 중요한 역할을 한다. 동티모르의 온천에서도 정밀한 지화학적 조사가 이루어진다면, 지열 자원의 심부 특성을 이해하는 데 크게 기여할 것이다.

3. 동티모르의 지열 에너지 잠재력 평가

3.1. 지열 탐사

동티모르의 지열 에너지 잠재력에 대한 심층적인 탐사 및 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있는 것으로 보인다. 현재까지 지열 에너지 잠재력과 활용에 대한 동티모르에 특정된 학술 논문은 제한적이다. 그러나 전반적인 재생 에너지 잠재력에 대한 연구에서는 지열 에너지가 언급되고 있다(Fraga *et al.*, 2019; Scheiner, 2022; Anggraeni *et al.*, 2025). 2011년 연구에 따르면 동티모르는 수력(252 MW), 풍력(72 MW), 태양광, 바이오매스 등 다양한 재생 에너지원에서 총 451 MW 이상의 설치 용량을 생산할 수 있는 강력한 잠재력을 가지고 있다고 보고하였다(Baratta, 2011). 그러나 지열 에너지는 이러한 재생 에너지 포트폴리오의 한 부분으로 언급되지만, 개별적인 잠재력 추정치는 명확히 제시되지 않았다.

한편 동티모르의 광물 자원 잠재력에 대한 연구에서는 복잡한 지질 구조가 광물 및 탄화수소의 발생에 유리하다고 언급하며, 중력 탐사 등의 지구물리 탐사가 석유 및 가스 탐사에 활용될 수 있음을 시사하며 이러한 지구물리 탐사 기법은 지열 탐사에도 유사하게 적용될 수 있다. 예를 들어, 전기비저항 탐사(resistivity survey) 및 자연전위(self-potential) 탐사는 지하수 조사, 광물 조사, 환경 조사, 지열 탐

사 및 화산 조사에 널리 사용되지만 동티모르에서 지열 자원을 목적으로 한 구체적인 지구물리 탐사(중력, 자력, 전기 비저항 탐사 등) 결과는 현재까지 공개된 자료에서 확인되지 않는다(Aprilina *et al.*, 2021). 앞서 언급한 바와 같이 지화학 탐사의 경우, 마로보 온천의 표면 온도(최고 약 49°C) 및 화학적 조성(유황, 나트륨, 칼슘 함유)에 대한 정보는 존재하지만 다른 온천 지역이나 심부 지열 유체에 대한 상세한 지화학적 분석 결과는 제한적이며 시추 탐사 결과 역시 지열 자원 평가를 위한 심부 시추 데이터는 현재까지 보고된 바 없다.

그럼에도 불구하고 동티모르-호주 에너지 파트너십(TLAEP)과 같은 국제 협력 프로그램은 탄소 포집 및 저장, 지열 에너지, 사회적 허가(social licensing)와 같은 주제에 대한 연구를 지원하며, 이는 동티모르의 지열 에너지 잠재력에 대한 관심과 초기 연구 노력을 반영한다(Palmer and Jackson, 2023). 그리고 세계은행(World Bank)과 아시아개발은행(ADB)은 인도네시아와 같은 인접 국가에서 지열 탐사 위험을 완화하기 위한 자금 지원 및 기술 지원 프로그램을 운영하고 있으며, 이는 동티모르에도 적용될 수 있는 모델을 제시한다(Alhusni *et al.*, 2023).

3.2. 지열 이용 방식의 종류 및 동티모르 적용 가능성

동티모르의 지열 자원 특성에 따라 다양한 이용이 가능하다. 우선 지열 발전 방식이 적용될 수 있다(그림 3). 건증기 발전은 가장 오래된 지열 발전 방식으로, 직접 지열 자원에서 나오는 건증기를 터빈으로 보내 전기를 생산하는데 이는 증기 온도가 매우 높은 지역에 적합하다. 습증기 발전은 고온의 지열수를 지표면으로 끌어올려 압력을 낮추면 일부가 증기로 변하여 터빈을 돌리고, 남은 물은 다시 저류층으로 주입된다. 그리고 바이너리 사이클 발전은 지열수의 온

도가 150°C 미만인 저온 지열 자원에 적합하다(Gong *et al.*, 2023). 이는 지열수를 직접 터빈에 사용하지 않고, 끓는점이 낮은 유기 용매를 가열하여 증기를 만들고, 이 증기로 터빈을 구동한다. 그리고 사용된 유기 용매는 응축되어 재활용되므로 물 소비가 적고 환경 영향이 적다. 동티모르의 온천 수온이 마로보의 경우 최고 약 49°C로 보고되는 등 비교적 낮은 온도를 보이는 점을 고려할 때, 고온의 증기나 물을 직접 활용하는 건증기나 습증기 발전보다는 바이너리 사이클 발전이 초기 단계에서 더 적합할 가능성이 높다(Alekseenko *et al.*, 2024). 이는 저온 지열 자원도 활용할 수 있어 개발의 유연성을 높일 수 있다. 그러나 심부 탐사를 통해 고온의 지열 저류층이 확인될 경우, 고온 발전 방식도 고려될 수 있다.

한편 지열 직접 이용은 지열 발전보다 낮은 온도에서도 가능하다. 동티모르의 온천은 이미 관광 자원으로 활용되고 있으며, 이는 지열 직접 이용의 잠재력을 보여준다. 우선 지역난방으로 온천수를 활용하여 주택이나 공공건물을 난방하는 데 사용할 수 있다. 농어업에는 온실 난방, 토양 가열, 양식장(어류 농장) 난방 등에 활용하여 농업 생산성을 높일 수 있다. 그리고 관광 및 의료에는 마로보 온천과 같이 치료 효능이 있는 것으로 알려진 온천은 관광객 유치 및 발네오테라피(balneotherapy)와 같은 의료 목적으로 활용될 수 있다(Spijkerboer *et al.*, 2022). 또한 일부 산업 공정에서 열원으로 사용될 수 있다. 동티모르의 여러 온천 지역(마로보, 와이카나, 우아토 카르바우, 아타우로)과 오에쿠세의 진흙 웅덩이는 지열 직접 이용의 잠재력을 가지고 있다(Lund and Toth, 2021). 이는 특히 농촌 지역의 에너지 접근성을 개선하고 지역 경제를 활성화하는 데 기여할 수 있다.

3.3. 잠재 지열 발전량

동티모르의 구체적인 지열 발전량에 대한 상세한 연구

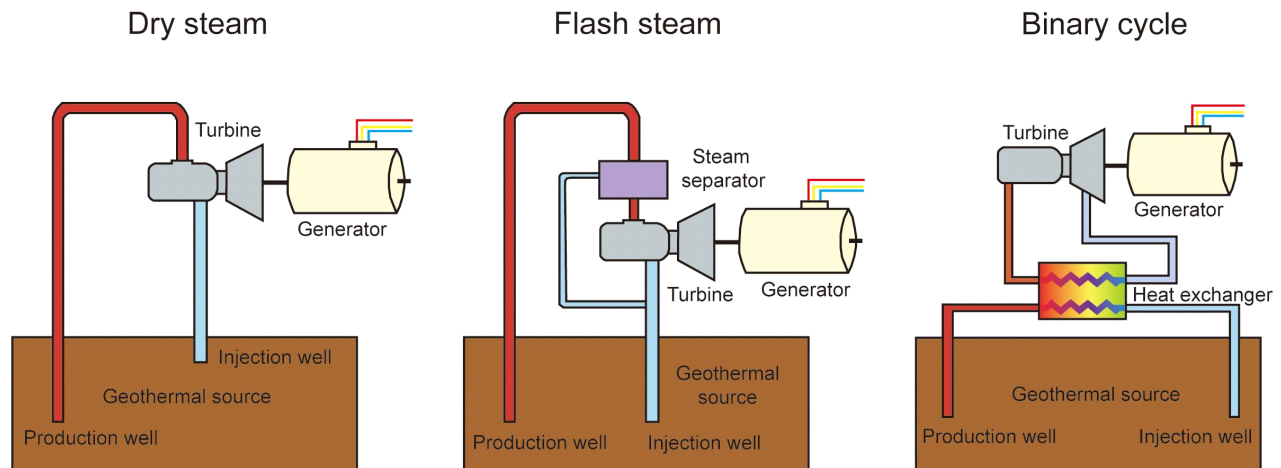


Fig. 3. Geothermal utilization pathways (dry steam, flash steam, binary cycle).

는 현재까지 제한적이다. 그러나 지열 에너지는 재생 에너지 잠재력의 일부로 간주된다(Fraga *et al.*, 2019; Scheiner, 2022; Anggraeni *et al.*, 2025). 지열 에너지는 다른 재생 에너지원과 달리 날씨에 독립적이며 가용성이 높아 기저 부하 전력 공급에 특히 유리하다(Islam *et al.*, 2022). 전 세계적으로 지열 발전 잠재력은 70~80 GW로 추정되지만, 현재 알려진 지열 매장량의 15%만이 전력 생산에 활용되고 있다(World Bank, 2017). 인접 국가인 인도네시아는 세계에서 가장 큰 지열 에너지 매장량(23.1 GW)을 보유하고 있으며 그 중 일부만을 활용하고 있는데 플로레스 섬만 해도 20개 지역에서 739.5 MWe의 지열 잠재력을 가지고 있다(Astro, 2023).

동티모르가 인도네시아와 유사한 환태평양 조산대(Pacific Ring of Fire)의 영향을 받는 지질학적 위치에 있다는 점을 고려할 때, 상당한 지열 잠재력을 보유하고 있을 것으로 추론할 수 있다(Masum and Akbar, 2019). 비록 현재까지 구체적인 MWe 추정치는 없지만, 활발한 판구조론적 활동, 다수의 온천 분포, 그리고 아타우로 섬과 같은 화산 활동의 흔적은 동티모르가 발전가능한 고온 지열 자원뿐만 아니라 직접 이용 가능한 저온 지열 자원도 풍부하게 보유하고 있을 가능성이 있다. 따라서 향후 심층적인 탐사 연구가 이루어진다면, 동티모르의 지열 에너지 잠재력에 대한 보다 정확한 평가가 가능할 것이다.

4. 동티모르 지열 에너지 개발의 기술적, 경제적, 환경적 측면

4.1. 기술적 과제 및 고려사항

동티모르에서 지열 에너지 개발을 추진하는 데에는 여러 기술적 과제와 고려 사항이 존재한다. 우선 탐사 및 시추 기술의 확보가 필요하다. 지열 프로젝트의 초기 탐사 및 시추 단계는 가장 위험하고 비용이 많이 드는 부분으로 상업적으로 실행 가능한 지열 자원의 존재를 확인하기 위한 시추에는 전체 투자 비용의 약 15%가 선행 투자되어야 하며, 수익에 대한 불확실성이 크다(Stefánsson, 2002). 동티모르는 재생 에너지 부문에 대한 상세한 타당성 조사를 수행하고 설계할 수 있는 전문성이 부족하다는 문제에 직면해 있으며 이는 지열 자원의 정확한 평가와 개발 계획 수립에 핵심적인 장애물로 작용한다(Araujo, 2024). 따라서 지구물리 탐사(중력, 자력, 전기 비저항 탐사 등), 지화학 탐사(온천수 및 가스 분석), 원격 탐사(위성 등), 그리고 시추 탐사에 필요한 첨단 기술과 전문 인력 확보가 시급하다. 세계은행의 글로벌 지열 개발 계획(GGDP)은 탐사 시추의 비용과 위험을 완화하는 데 중점을 두며, 기술 지원 및 역량 강화 프로그램을 제공하는데 이러한 국제적인 지원은 동티모르

가 자체적인 탐사 역량을 구축하는 데 중요한 역할을 할 수 있다(World Bank, 2020).

한편 지열 발전소의 건설 및 운영은 고도의 기술적 노하우를 요구한다. 이는 지열 자원의 특성에 맞는 발전 기술(건증기, 습증기, 바이너리 사이클)의 선택, 발전소 설계, 건설, 그리고 장기적인 운영 및 유지보수 역량을 포함한다. 동티모르에서는 이미 설치된 일부 태양광 시스템이 적절한 관리 부족으로 인해 운영 및 유지보수가 미흡한 사례가 보고되었다(da Costa *et al.*, 2023). 이는 지열 발전소와 같은 복잡한 인프라를 운영하는 데 필요한 기술적 역량과 인적 자원 개발이 시급함을 보여준다. 장기적인 운영 및 유지보수 센터를 설립하고, 관련 인력을 양성하는 것이 필수적이며 또한 전력 분배망의 현대화 및 그리드 코드 표준화는 재생 에너지 통합을 위한 중요한 기반 시설 개선 과제 중 하나이다.

4.2. 경제적 타당성 및 정책 조성

지열 에너지 개발의 가장 큰 경제적 장벽 중 하나는 높은 초기 투자 비용이다. 특히 탐사 시추는 전체 프로젝트 비용에서 상대적으로 작지만, 가장 위험한 단계이며, 자원이 경제적으로 실행 가능하지 않을 경우 비용 회수가 어렵다(Compernelle *et al.*, 2019). 이러한 초기 자본 확보의 어려움은 개발자들에게 큰 도전이 된다. 그러나 일단 지열 자원에 쉽게 접근할 수 있다면, 전력 생산 비용은 석탄 및 천연가스와 경쟁력이 있다. 동티모르는 현재 디젤 발전이 전체 전력의 90% 이상 의존하고 있으며, 매년 1억 3천만 달러 이상을 디젤 수입에 지출하고 있어 국제 유가 변동에 취약하다(Milko, 2024). 그러므로 지열 에너지 개발은 이러한 비싼 수입 연료에 대한 의존도를 줄여 운영 비용을 절감할 수 있다.

또한 지열 에너지의 도입은 전력 생산 단가를 낮추고 국가 경제에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다. 재생 에너지원, 특히 지열 에너지를 전력망에 통합하면 에너지 비용을 절감할 수 있어 저소득층도 전기에 접근할 수 있게 되고, 이는 궁극적으로 GDP 성장에 기여할 수 있다. 지열 에너지 개발은 수입 화석 연료 의존도를 줄여 에너지 안보를 강화하고, 국제 시장 변동에 덜 민감한 안정적인 전력 가격을 확보할 수 있다. 또 지열 발전소 건설 및 운영은 새로운 일자리를 창출하고 지역 경제를 활성화할 수 있다. 그리고 지열 프로젝트가 진행되는 지역의 토지 소유자에게 소득을 제공하고 부동산 가치를 높일 수 있으며 석유 기금 고갈 위험에 직면한 동티모르 경제의 다각화에 기여하며 지속 가능한 경제 성장의 기반을 마련할 수 있다(ESMAP, 2023).

한편 지열 에너지 개발을 위한 투자를 유치하기 위해서는 명확하고 안정적인 정책 및 제도적 환경을 조성하는 것이 중요하다. 여러 국가들이 동티모르의 재생 에너지 부문

에 투자할 의향이 있음을 표명하고 있으므로, 정부는 투자자들이 관심을 가질 만한 기본적인 조건을 사전에 준비해야 한다. 우선 탐사 단계의 높은 위험을 줄이기 위해 세계은행의 글로벌 지열개발계획(GGDP)과 같은 위험 완화 도구를 활용할 수 있다(World Bank, 2020). 이는 탐사 시추 비용의 일부를 보전하거나, 성공하지 못할 경우의 위험을 분담하는 방식으로 이루어질 수 있다. 또한 재생 에너지 개발을 위한 명확한 법규 및 규제를 수립하여 투자 불확실성을 제거해야 한다. 이는 토지 분쟁 해결 절차의 명확화도 포함한다. 그리고 재생 에너지 프로젝트에 대한 세금 감면, 보조금 등 재정적 인센티브를 제공하여 민간 투자를 유도할 필요가 있다. 또한 아시아개발은행(ADB), 세계은행, 일본, 호주 등 국제 파트너와의 협력을 통해 기술 지원, 자금 조달, 역량 강화 기회를 모색해야 한다.

4.3. 환경적 영향 및 관리 방안

지열 에너지 개발은 환경에 긍정적 및 부정적 영향을 모두 미칠 수 있으며, 이에 대한 적절한 관리 방안이 필요하다. 지열 에너지는 화석 연료 기반 발전원에 비해 환경 친화적이며 탄소 발자국이 최소화된다(Lee, 2009; Ouerghi *et al.*, 2024). 지열 발전소의 오염 물질 배출량, 특히 비응축성 가스(NCG) 배출량은 기존 화석 연료 발전소보다 훨씬 낮다. 재생 에너지원으로서 지열은 이산화탄소 배출량을 크게 줄여 기후 변화 완화 노력에 기여하는데 동티모르 정부는 기후 변화에 대한 국가적 대응의 일환으로 저탄소 개발 전략 수립을 약속하고 있으며, 지열 에너지 개발은 이러한 목표 달성에 중요한 역할을 할 수 있다(NDCC, 2024).

물론 지열 에너지 개발에는 여러 잠재적인 환경적 위험이 따른다. 시추 과정에서 응력 구조의 변화로 인해 지진이 유발될 수 있으며, 장기간 열 추출이 물 보충보다 빠를 경우 지반 침하가 발생할 수 있다(Lee *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2024). 이러한 위험은 강화 지열 발전소(Enhanced Geothermal Power Plants)에서 더 흔하게 발생하지만, 대부분의 지열 발전소가 인구 밀집 지역에서 떨어져 건설되므로 그 영향은 상대적으로 미미하다. 물론 시추 과정에서 지구 내부에 저장된 온실가스(주로 메탄, 황화수소)가 대기로 방출될 수 있으며 지열 유체의 손실이나 누출로 인해 지하수 오염이 발생할 수 있으며(Park *et al.*, 2015), 고엔탈피 프로젝트에서는 보충수가 필요하여 과잉 물 소비가 발생할 수 있다(Kara *et al.*, 2022; Brasnett *et al.*, 2024).

이러한 환경 영향을 완화하기 위한 대책 마련이 중요하다. 모든 지열 프로젝트는 환경 영향 평가 절차를 거쳐야 하며, 환경 관리 계획을 수립해야 한다. 이는 잠재적 영향을 파악하고 완화 조치를 수행하는 데 필수적이다. 동티모르의 경제와 생계는 지하수 자원에 크게 의존하며 기후 변화

로 인한 강우 패턴 변화 및 해수면 상승은 지하수 자원에 추가적인 위협을 초래할 수 있다(Geoscience Australia, 2021). 따라서 지열 개발 시 지하수 자원의 지속 가능성을 고려한 철저한 관리가 필요하다. 기술적으로 폐쇄 루프 시스템(closed-loop water systems)을 사용하여 사용된 물을 지열 저류층으로 다시 주입함으로써 물 소비를 줄이고 오염 위험을 최소화할 수 있다.

4.4. 사회적 수용성 및 지역사회 참여

지열 에너지 프로젝트의 성공적인 개발을 위해서는 지역 사회의 수용성과 적극적인 참여가 필수적이다. 에너지 전환에 대한 대중의 적극적인 지지를 확보하는 것이 주요 과제 중 하나이다. 대규모 재생 에너지 프로젝트에는 사회적 영향 평가(SIA)가 의무적으로 요구되며, 이는 지역사회 및 이해관계자 참여를 포함해야 한다(Kurek *et al.*, 2024). 특히 지방 의회와 협의를 통해 지역 주민들에게 경제적 또는 환경적 혜택이 돌아가도록 하는 것이 중요하다(Renoth *et al.*, 2023). 또한 시민들이 에너지 전환 과정의 주체가 되도록 장려하고, 공동 투자자로서 직접 프로젝트에 참여할 수 있도록 대안적 자금 조달 방식(예: 크라우드펀딩)을 활용할 수 있다(Abdi *et al.*, 2024). 이는 지역의 약점과 오해를 해소하고 지열 에너지에 대한 관심을 높이는 데 기여한다.

동티모르에서는 재생 에너지 프로젝트 구현 시 토지 분쟁이 자주 발생하며, 이는 프로젝트 진행을 저해하는 주요 사회적 과제이다. 명확하고 공정한 토지 등록 및 분쟁 해결 절차를 마련하여 지역 사회의 신뢰를 얻는 것이 중요하다(Batterbury *et al.*, 2015). 또한 대중 교육 및 훈련, 시범 프로젝트를 통해 지열 에너지에 대한 인식을 높이고 오해를 해소해야 한다. 이는 정책 구현을 저해할 수 있는 인식 부족이나 잘못된 인식을 극복하는 데 도움이 된다.

5. 동티모르 지열 에너지 개발을 위한 정책 및 제도적 제언

5.1. 현행 에너지 정책

동티모르는 2011-2030 전략 개발 계획(SDP)을 통해 2030년까지 재생 에너지 공급 목표를 50%로 늘리겠다는 의지를 표명했다. 이는 에너지 독립성을 높이고 경제 발전을 지원하기 위한 정부의 노력의 일환이다(RDTL, 2011). 그러나 현재 동티모르 인구의 거의 90%가 디젤 발전기에서 생산되는 전기에 의존하고 있으며, 2022년에는 거의 모든 전력이 화석 연료원에서 공급되었다(Heynen *et al.*, 2024). 이러한 화석 연료 의존성은 국가를 국제 유가 변동에 취약하게 만들고, 지속 가능한 발전 목표 달성에 큰 장애물이 된다(Mamat *et al.*, 2025).

그러나 동티모르 정부는 화석 연료 자원에도 불구하고 친환경 에너지로의 전환을 확고히 추진하고 있으며, 전국적인 타당성 조사와 재생 에너지 생산을 위한 시범 프로젝트 개발을 포함한 26가지 환경 관련 우선 조치를 단행했다(GTL, 2020). 또한 2020년부터 2021년까지 외딴 지역의 가정에 3,000개의 태양광 패널을 설치하는 등 농촌 전력화 프로그램에 투자하고 있으며 2025년까지 동티모르 전력공사는 라레이아(Laleia)에 72-85 MW 규모의 태양광 발전소와 아타우로에 2 MW 규모의 태양광 발전소를 건설하여 에너지 믹스 다각화에 대한 의지를 강화할 계획이다(UNDP, 2025). 지열 에너지도 이런 에너지 정책과 궤를 같이 하여 국가 경제, 물리적, 환경적, 사회적 안보에 중점을 두고 있다.

5.2. 지열 에너지 개발 관련 법규 및 규제 현황

동티모르의 재생 에너지 개발을 가속화하는 데 가장 중요한 과제 중 하나는 재생 에너지 부문에 투자하려는 국내외 기업을 규제하는 명확한 정책과 지침의 부재이다. 동티모르 정부는 이러한 문제를 극복하기 위해 국가 예산을 할당하고 인적 자원을 준비해야 한다. 현재 동티모르의 에너지 정책 및 광물 자원 관리는 석유 및 광물 자원부(Ministry of Petroleum and Minerals, MPM)의 책임 하에 있으며, 이 부서는 에너지 정책 설계 및 구현, 광물 자원 관리, 추출 및 산업 활동에 대한 허가 및 규제를 담당한다. 재생 에너지 개발을 위한 법규적 기반으로 재생 에너지 기본법(Draft Base Law for Renewable Energies)이 준비 중이며, 이는 재생 에너지 기금 조성 및 활용 메커니즘을 예측하고 이 분야의 인적 자원 훈련의 중요성을 강조한다. 또한 동티모르 정부는 기후 변화 대응을 위한 법적 틀을 마련할 기후 변화 법(climate change law)의 개발을 약속했다. 이러한 법적 및 규제적 진전은 지열 에너지와 같은 재생 에너지 개발을 위한 안정적이고 예측 가능한 환경을 조성하는 데 필수적이다(Secretary of State for the Environment, 2002).

5.3. 국제 협력 및 지원의 중요성

동티모르의 지열 에너지 개발은 국제 협력과 지원에 크게 의존하고 있다. 국제 사회의 지원은 동티모르가 직면한 재정적, 기술적, 역량적 제약을 극복하는 데 결정적인 역할을 한다. 세계은행(World Bank)과 아시아개발은행(ADB)은 인도네시아와 같은 지역에서 지열 에너지 개발을 위한 중요한 자금 지원 및 기술 지원을 제공해 왔다. 세계은행의 GGDP(Global Geothermal Development Plan)는 탐사 시추의 비용과 위험을 완화하는 데 중점을 두며, 이는 동티모르에도 적용될 수 있는 성공적인 모델을 보여준다(World Bank, 2020). 또 GCF (Green Climate Fund) 및 CTF (Clean Technology Fund)와 같은 기금도 지열 개발을 위한 양허성 자금을 동

원하는 데 기여하고 있다.

한편 일본 정부는 UNDP (유엔 개발 계획)와 협력하여 동티모르의 청정 에너지 인프라를 지원하고 화석 연료 의존도를 줄이기 위한 “태평양 녹색 전환 프로젝트(Pacific Green Transformation Project)”에 578만 달러를 할당했다(UNDP, 2025). 그리고 호주 정부는 동티모르-호주 에너지 파트너십(TLAEP)을 통해 자원 부문에서 지식, 무역 및 투자 연계를 심화하고 지열 에너지 연구를 포함한 인력 역량 강화를 지원하고 있다(Deng, 2023). 국제 협력은 지열 탐사 및 개발에 필요한 기술적 전문성 부족 문제를 해결하는 데 중요하다(Ochmann, 2015). GGDP는 지식 전파 및 역량 강화를 위한 원탁 회의, 워크숍, 교육 세션을 조직하고 있으며, 이는 동티모르의 공공 및 민간 부문 이해관계자들에게 직접적인 혜택을 제공할 수 있다. 이러한 국제적인 지원은 동티모르가 자체적인 지열 에너지 개발 로드맵을 수립하고 실행하는 데 필요한 재정적 안정성과 기술적 기반을 제공한다.

5.4. 지열 에너지 개발 로드맵 및 우선순위

동티모르의 지열 에너지 잠재력을 효과적으로 활용하기 위한 로드맵은 다음과 같은 우선순위를 포함해야 한다. 첫째, 동티모르 전국적인 지열 자원 평가 및 타당성 조사가 필요하다. 정부는 이미 전국적인 타당성 조사를 시행하고 재생 에너지 생산을 위한 시범 프로젝트를 개발하겠다는 계획을 발표했다. 지열 에너지에 특화된 상세한 지질학적, 지구물리적, 지화학적 조사를 통해 고온 지열 저류층의 위치와 특성을 파악하는 것이 최우선 과제이다(Prakoso and Khotimah, 2023). 이는 잠재적인 발전 가능 지역과 직접 이용 가능 지역을 명확히 구분하는 데 도움이 될 것이다. 둘째, 인적 자원 개발 및 역량 강화로 지열 탐사, 시추, 발전소 건설 및 운영, 유지보수에 필요한 국내 전문 인력을 양성해야 한다(Kassem and Moscarriello, 2024). 국제 협력을 통해 기술 이전 및 훈련 프로그램을 확대하고, 국가 지열 연구소를 설립하는 방안을 고려할 수 있다(Shinozaki *et al.*, 2025). 셋째, 시범 프로젝트 및 직접 이용 확대로 초기 단계에서는 소규모 지열 발전 시범 프로젝트를 추진하고, 마로보 온천과 같은 기존 온천 지역을 중심으로 지열 직접 이용(관광, 농업, 지역 난방 등)을 확대하여 지열 에너지의 이점을 지역 사회에 보여주고 사회적 수용성을 높이는 것이 효과적이다(Nordgård-Hansen *et al.*, 2023; Kassem and Moscarriello, 2024). 넷째, 에너지 인프라 현대화 및 통합으로 지열 발전이 국가 전력망에 안정적으로 통합될 수 있도록 송배전 시스템을 업그레이드하고 그리드 코드 표준화를 가속화해야 한다(Bagdadee and Zhang, 2025; Ejuh Che *et al.*, 2025). 아타우로 섬과 오에쿠세 암베노(Oe-Cusse Ambeno)와 같이 지리적으로

고립된 지역은 독립형 재생 에너지 프로젝트의 우선순위가 되어야 한다. 그리고 다섯 번째, 재정 메커니즘 구축으로 초기 탐사 위험을 완화하고 민간 투자를 유치하기 위한 재정적 인센티브 및 위험 공유 메커니즘을 개발해야 하며 석유 기금의 일부를 재생 에너지 개발에 전략적으로 투자하는 방안도 고려할 수 있다(Kassem *et al.*, 2025). 이러한 로드맵은 동티모르가 화석 연료 의존성에서 벗어나 지속 가능하고 안정적인 에너지 미래를 구축하는 데 기여할 것이다.

6. 결론 및 향후 방향

동티모르는 복잡한 판구조론적 위치와 활발한 지진 활동, 그리고 다수의 온천 및 머드 화산 분포를 특징으로 하는 지질학적 배경을 가지고 있다. 호주판과 반다 호 전호의 충돌로 형성된 티모르 섬의 지질 구조는 지열 자원 형성에 유리한 조건을 제공한다. 마로보, 와이카나, 우아토 카르바우, 아타우로 등 여러 지역에서 온천이 확인되었으며, 특히 마로보 온천은 유황, 나트륨, 칼슘을 포함하며 약 49°C의 수온을 보인다. 이러한 지표들은 동티모르가 상당한 지열 에너지 잠재력을 보유하고 있음을 시사한다. 그러나 현재까지 동티모르의 지열자원에 대한 심층적 탐사 및 구체적인 발전량 추정 연구는 제한적이다. 재생 에너지 전반에 대한 잠재력은 400 MW 이상으로 평가되지만, 지열 에너지의 개별적인 기여도는 명확하지 않다. 동티모르의 확인된 온천 수온을 고려할 때 바이너리 사이클 발전과 직접 이용 방식이 초기 개발에 더 적합할 수 있다. 지열 에너지 개발은 높은 초기 투자 비용, 탐사 및 시추 기술 및 운영 노하우 부족, 불확실한 정책 및 규제 환경, 토지 분쟁, 전문성 부족 등 여러 기술적, 경제적, 사회적 과제에 직면해 있다. 그러나 지열 에너지는 환경친화적이며, 안정적이고 신뢰할 수 있는 기저 부하 전력을 제공하여 동티모르의 화석 연료 의존도를 줄이고 에너지 안보를 강화하는 데 크게 기여할 수 있다.

동티모르에게 지열 에너지 개발은 단순한 에너지원 다각화를 넘어 국가의 지속 가능한 발전을 위한 핵심적인 전략이다. 수입 디젤에 대한 높은 의존성으로 인한 경제적 취약성을 줄이고, 안정적이고 예측가능한 에너지 공급을 확보할 수 있다. 또 고갈 위험에 처한 석유 기금에 대한 의존도를 낮추고, 신산업을 육성하여 경제를 다각화하며, 고용 창출을 통해 지역 사회 발전에 기여할 수 있다. 그리고 온실가스 배출을 크게 줄여 국가의 기후 변화 완화 목표 달성에 기여하고, 국제적인 환경 책임 이행을 강화할 수 있다. 지열 직접 이용 및 소규모 발전은 전력망 접근이 어려운 농촌 및 외딴 지역의 에너지 접근성을 개선하여 주민들의 삶의 질을 향상시킬 수 있다.

동티모르의 지열 에너지 잠재력을 실현하기 위해서는

다양한 연구와 정책적 노력이 시급하다. 우선 현재까지 제한적인 탐사 데이터를 보완하기 위해 전국적인 규모의 심층적인 수리지질, 지화학 및 지구물리 탐사가 필요하다. 특히 아타우로 섬과 같은 화산 활동 지역에 대한 정밀 조사가 필요하다. 이를 통해 고온 지열 저류층의 위치와 특성을 정확히 파악하고, 시추 위치를 최적화할 수 있다. 또한 마로보 외 다른 온천 지역의 온천수 및 가스에 대한 심층적인 지화학 분석을 수행하여 저류층 온도 추정 및 유체-암석 상호작용 이해를 높여야 한다. 그리고 지열 탐사, 시추, 발전소 건설 및 운영에 필요한 기술적 전문성을 확보하기 위해 인력 양성 프로그램을 강화하고, 국제 전문가와의 협력을 확대해야 한다. 그리고 지열 에너지 개발을 위한 명확한 법규와 규제를 제정하여 투자 불확실성을 제거해야 한다. 이러한 다각적인 노력을 통해 동티모르는 풍부한 지열 에너지 잠재력을 발휘하고, 지속 가능한 에너지 미래를 향한 중요한 발걸음을 내디딜 수 있을 것이다.

감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (RS-2019-NR040076) funded by the Ministry of Education (2025).

REFERENCES

- Abdi, A.M., Murayama, T., Nishikizawa, S., Suwanteep, K. and Mariita, N.O., 2024, Determinants of community acceptance of geothermal energy projects: A case study on a geothermal energy project in Kenya. *Renewable Energy Focus*, 50, 100594.
- Agbakwuru, V., Obidi, P.O., Salihu, O.S. and MaryJane, O.C., 2024, The role of renewable energy in achieving sustainable development goals. *International Journal of Engineering Research Updates*, 7, 13-27.
- Ahn, J.Y., Lee, J.Y. and Mok, J.G., 2011, Analysis of technical application of ground source heat pumps in Korea (2009-2010). *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 89-96 (in Korean).
- Alekseenko, S., Zavorin, A., Gubin, V., Sergey, L., Tsubulskiy, S. and Yankovsky, S., 2024, Analysis of the cycle arrangement of a binary geothermal power plant using a low- and medium-temperature source. *Thermal Science and Engineering Progress*, 48, 102400.
- Alhusni I, H., Perdana, T.S.P., Purwanto, E.H. and Setyawan, H., 2023, Geothermal business outlook in Indonesia. In *Proceedings of 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, February 6-8, 2023, SGP-TR-224.
- Anggraeni, S.D., Ramadhan, I., Abbas, R.J., Dunggio, B.A. and Anastasia, S.G., 2025, Renewable energy collaboration poten-

- tials between Indonesia and Timor-Leste through the lense of Nationally Determined Contributions (NDCs). *Journal of Islamic World and Politics*, 9, 17-30.
- Aprilina, N.V., Golla, G. and Kusumah, Y.I., 2021, Geothermal prospect review in the western part of Salak Volcano, West Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 732, 012011.
- Araujo, J.M.S.de, 2024, Overview of Timor-Leste Energy Sector. UNDP.
- Astro, R.B., 2023, Overview of the potential and utilization of geothermal energy on Flores Island. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9, 1377-1384.
- Audley-Charles, M.G., 1965, The geology of the Portuguese timor. Imperial College London, Ph.D. thesis, 401 p.
- Audley-Charles, M.G., 2011, Tectonic post-collision processes in Timor. *Geological Society, London, Special Publications*, 355, 241-266.
- Bagdadee, A.H. and Zhang, L., 2025, Investigate the implementation of smart grid-integrated renewable distributed generation for sustainable energy development in Bangladesh. *Energy Reports*, 13, 2433-2453.
- Baratta, A., 2011, Renewable Energy: Status and Prospects - Status of Electricity Generation from Renewable Energy. In: Princiotta, F. (eds) *Global Climate Change - The Technology Challenge. Advances in Global Change Research*, 38, Springer, Dordrecht, 157-189.
- Barma, N.H., 2021, Do petroleum rents fuel conflict in developing countries?. A case study of political instability in Timor-Leste. *Energy Research and Social Science*, 75, 102018.
- Batterbury, S.P.J., Plamer, L., Reuter, T., de Carvalho, D.d.A., Kehi, B. and Cullen, A., 2015, Land access and livelihoods in post-conflict Timor-Leste: no magic bullets. *International Journal of the Commons*, 9, 619-647.
- Berry, R.F. and Jenner, G.A., 1982, Basalt geochemistry as a test of the tectonic models of Timor. *Journal of the Geological Society*, 139, 593-604.
- Boedihardi, M., Mulyono, A., Ginting, A., Mosby, M.D. and Radja, V.T., 1993, Geology, energy potential and development of Indonesia's geothermal prospects. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 33, 369-385.
- Brasnett, G., Veeger, F. and Claringbould, H., 2024, De-risking geothermal for direct-use heating in North America: Lessons learned from Europe. In *Proceedings, 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, February 12-14, 2024, 1-9 p.
- Compermolle, T., Welkenhuysen, K., Petitclerc, E., Maes, D. and Piessens, K., 2019, The impact of policy measures on profitability and risk in geothermal energy investments. *Energy Economics*, 84, 104524.
- da Costa, J., Freitas, R.J., Da Silva, P. and Ferreira, M., 2023, Policy recommendation on green energy access for future sustainability in Timor-Leste. National University of East Timor, Policy Paper, Hera, Dili.
- Deng, N., 2023, Joint development between Australia and Timor-Leste. *Chinese Journal of International Law*, 22, 123-132.
- Dolejš, D. and Manning, C.E., 2010, Thermodynamic model for mineral solubility in aqueous fluids: theory, calibration and application to model fluid-flow systems. *Geofluids*, 10, 20-40.
- Earle, M., 2023, Protolith origin and plate tectonic setting of metamorphic complexes in the Timor fold and thrust belt, Indonesia. *Earth-Science Reviews*, 246, 104589.
- Ejuh Che, E., Roland Abeng, K., Iweh, C.D., Tsekouras, G.J. and Fopah-Lele, A., 2025, The impact of integrating variable renewable energy sources into grid-connected power systems: Challenges, mitigation strategies, and prospects. *Energies*, 18, 689.
- ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program), 2023, *Geothermal Energy: Unveiling the Socioeconomic Benefits*. Washington, DC., World Bank, 106 p.
- Fraga, L.G., Teixeira, J.C.F., Ferreira, M.E.C., 2019, The potential of renewable energy in Timor-Leste: An assessment for biomass. *Energies*, 12, 1441.
- Feder, J., 2020, Geothermal: Digging Beneath the Surface. *Journal of Petroleum Technology*, 72, 30-34.
- Geoscience Australia, 2021, Vulnerability of groundwater to climate change impacts in Timor-Leste. <https://www.ga.gov.au/about/projects/water/vulnerability-of-groundwater-to-climate-change-impacts-in-timor-leste?> (August 28, 2005).
- Gong, L., Han, D., Chen, Z., Wang, D., Jiao, K., Zhang, X. and Yu, B., 2023, Research status and development trend of key technologies for enhanced geothermal systems. *Natural Gas Industry B*, 10, 140-164.
- GTL (Government of Timor-Leste), 2020, Secretary of State for the Environment participates in a Portuguese-speaking conference on energy and climate. <https://timor-leste.gov.tl/?lang=en&p=25798> (August 28, 2025).
- Heynen, A.P., MacGinley, T.J. and Aguilar, L.E., 2024, Electrification in post-conflict Timor-Leste: Opportunities for energy services to enhance rural agricultural development. *Energy Research & Social Science*, 110, 103433.
- International Monetary Fund (IMF), 2025, Timor-Leste's Opportunity to Turn its Wealth into Economic Development. <https://www.imf.org/en/News/Articles/2025/06/10/cf-timor-lestes-opportunity-to-turn-its-wealth-into-economic-development> (July 30, 2025).
- Islam, M.T., Nabi, M.N., Arefin, M.A., Mostakim, K., Rashid, F., Hassan, N.M.S., Rahman, S.M.A., McIntosh, S., Mullins, B.J. and Muyeen, S.M., 2022, Trends and prospects of geothermal energy as an alternative source of power: A comprehensive review. *Heliyon*, 8, e11836.
- Istadi, B.P., Wibowo, H.T., Sunardi, E., Hadi, S. and Sawolo, N., 2012, Mud volcano and its evolution. In: Dar, I.A. (ed.), *Earth Sciences. InTech Europe*, Rijeka, Croatia, 375-434.
- Kara, H., Yetis, A.D. and Kalkan, S., 2022, The impact of geothermal fluid discharge on drainage water and groundwater quality in terms of toxic contaminants in the agricultural Harran Plain, Turkey. *Geothermics*, 105, 102502.
- Kassem, M.A. and Moscariello, A., 2024, Advancing sustainable energy: a systematic review of geothermal-powered district heating and cooling networks. *International Journal of Sustainable Energy*, 43, 2417436.
- Kassem, M.A., Moscariello, A. and Hollmuller, P., 2025, Navigating

- risk in geothermal energy projects: A systematic literature review. *Energy Reports*, 13, 696-712.
- Keep, M., Beck, L. and Bekkers, P., 2005, Complex modified thrust systems along the southern margin of east timor. *The APPEA Journal*, 45, 297-310.
- Khansefid, A., Yadollahi, S.M., Müller, G. and Taddei, F., 2022, Induced earthquake hazard by geothermal power plants: Statistical evaluation and probabilistic modeling. *International Journal of Disaster Risk Science*, 13, 758-777.
- Kurek, K.A., van Ophem, J. and Strojny, J., 2024, Arguments for a community-based approach to geothermal energy development. *Energies*, 17, 2299.
- Lawless, J., Lovelock, B.G. and Ussher, G.N., 2005, Geothermal potential of East Timor. In *World Geothermal Congress*. Antalya, Turkey, April 24-29, 2005, 6 p.
- Lee, J.Y., 2009, Current status of ground source heat pumps in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1560-1568.
- Lee, J.Y., Weingarten, M. and Ge, S., 2016, Induced seismicity: the potential hazard from shale gas development and CO₂ geologic storage. *Geosciences Journal*, 20, 137-148.
- Lund, J.W. and Toth, A.N., 2021, Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 90, 101915.
- Mamat, R., Ghazali, M.F., Erdiwansyah and Rosdi, S.M., 2025, Potential of renewable energy technologies for rural electrification in Southeast Asia: A review. *Cleaner Energy Systems*, 12, 100207.
- Mardiati, D., Setianto, A. and Harijoko, A., 2020, Revealing geothermal potential areas with remote sensing analysis for surface temperature and lineament density: case study in South Bajawa, NTT, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 417, 012009.
- Masum, M. and Akbar, M.A., 2019, The Pacific ring of fire is working as a home country of geothermal resources in the world. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 249, 012020.
- Miller, M.S., Zhang, P., Dahlquist, M.P., West, A.J., Becker, T.W. and Harris, C.W., 2021, Inherited lithospheric structures control arc-continent collisional heterogeneity. *Geology*, 49, 652-656.
- Milko, V., 2024, In diesel-dependent East Timor, renewable energy transition remains slow despite government pledges. *The Associated Press*.
- Mott, A., Baba, A.R., Mosleh, M.H., Ökten, H.E., Babaei, M., Gören, A.Y., Feng, C.-W., Recepoğlu, Y.K., Uzelli, T., Uytun, H., Morata, D., Yüksel, M. and Sedighi, M., 2022, Boron in geothermal energy: Sources, environmental impacts, and management in geothermal fluid. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 167, 112825.
- NDCC (National Directorate of Climate Change), 2024, República Democrática de Timor-Leste TECHNOLOGY NEEDS ASSESSMENT REPORT. United Nations Environment Programme, UNEP Copenhagen Climate Centre (UNEP-CCC), and Asian Institute of Technology (AIT), 136 p.
- Nordgård-Hansen, E., Fjellså, I.F., Medgyes, T., Guðmundsdóttir, M., Pétursson, B., Miecznik, M., Paják, L., Halás, O., Leknes, E. and Midttømme, K., 2023, Differences in direct geothermal energy utilization for heating and cooling in central and northern European countries. *Energies*, 16, 6465.
- Ochmann, N., 2015, BGR's GEOTHERM Program 2003 - 2015. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, April 19-25, 2015, 8 p.
- Ouerghi, F.H., Omri, M., Nisar, K.S., Abd El-Aziz, R.M. and Taloba, A.I., 2024, Investigating the potential of geothermal energy as a sustainable replacement for fossil fuels in commercial buildings. *Alexandria Engineering Journal*, 97, 215-229.
- Palmer, L. and Jackson, S., 2023, Conjuring carbon: Resource materialities in Timor-Leste. *Environment and Planning E: Nature and Space*, 6, 2539-2556.
- Park, Y., Mok, J.K., Jang, B.J., Park, Y.C. and Lee, J.Y., 2013, Influence of open and closed loop geothermal cooling and heating systems on hydrogeological properties. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 649-659 (in Korean with English abstract).
- Park, Y., Yu, J.Y., Kim, N. and Lee, J.Y., 2015, Evaluation of possibility for precipitation of carbonate minerals by change of groundwater temperature and pressure in open loop geothermal cooling and heating systems. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 623-628 (in Korean with English abstract).
- Polii, J. and Rampengan, A.M., 2020, Analisa Geokimia Fluida Manifestasi Permukaan di Daerah Panas Bumi Lahendong. *Fullerene Journal of Chemistry*, 5, 45-48.
- Prakoso, L.Y. and Khotimah, N.K., 2023, Geothermal energy potential in supporting national defense and economic sustainability in developing countries. *Return*, 2, 260-268.
- RDTL (Republica Democratica De Timor-Leste), 2011, TIMOR-LESTE STRATEGIC DEVELOPMENT PLAN 2011-2030. Palácio do Governo, Edifício 1, R/C, Avenida Presidente Nicolau Lobato, Dili, Timor-Leste, 228 p.
- Reed, T.A., de Smet, M.E.M., Harahap, B.H., Sjapawi, A., 1996, Structural and depositional history of East Timor. *Geological Magazine*.
- Renoth, R., Buchner, E., Schmieder, M., Keim, M., Plechaty, M. and Drews, M., 2023, Social acceptance of geothermal technology on a global view: a systematic review. *Energy, Sustainability and Society*, 13, 49.
- Richardson, A., 1993, Lithosphere structure and dynamics of the Banda Arc collision zone, Eastern Indonesia. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 33, 105-118.
- Rosli, N.A., Anuar, M.N.A., Mansor, M.H., Rahim, N.S.I.A. and Arifin, M.H., 2022, What makes a hot spring, hot? *Warta geologi*, 48, 30-35.
- Scheiner, C., 2022, The Resource Curse in Timor-Leste. *Estudios de Asia y África*, 57, 477-518.
- Secretary of State for the Environment, 2002, Nationally Determined Contribution Timor-Leste 2022-2030. 74 p.
- Sharma, A., 2024, The role of renewable energy policies in achieving environmental sustainability goals. *International Journal for Research Publication and Seminar*, 15, 275-281.
- Shinozaki, K., Nishijima, J. and Wakeyama, T., 2025, A game theoretic analysis of geothermal development consensus building in Japan. *Energy Reports*, 13, 278-285.
- Spijkerboer, R.C., Turhan, E., Roos, A., Billi, M., Vargas-Payera, S., Opazo, J. and Armiero, M., 2022, Out of steam? A social sci-

- ence and humanities research agenda for geothermal energy. *Energy Research & Social Science*, 92, 102801.
- Stefánsson, V., 2002, Investment cost for geothermal power plants. *Geothermics*, 31, 263-272.
- Tanaka, K., Asano, K., Watanabe, M., Komatsubara, D. and Suzuki, K., 2020, Forefront of studies on mud volcanoes: Advances in studies on inland mud volcanoes in the last 8 years. *Journal of the Geological Society of Japan*, 126, 39-51 (in Japanese with English abstract).
- Tate, G.W., McQuarrie, N., van Hinsbergen, D.J.J., Bakker, R.R., Harris, R.A., Jiang, H., 2015, Australia going down under: Quantifying continental subduction during arc-continent accretion in Timor-Leste. *Geosphere*, 11, 1860-1883.
- UNDP, 2025, Timor Leste: Accelerating Clean Energy Access to Reduce Inequality. <https://www.undp.org/timor-leste/projects/accelerating-clean-energy-access-reduce-inequality-access> (August 28, 2025).
- Villeneuve, M., Cornée, J.J., Harsolumakso, A.H., Martini, R. and Zaninetti, L., 2005, Révision stratigraphique de l'Ile de Timor (Indonésie orientale). *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 98, 297-310.
- World Bank, 2017, Geothermal. <https://www.worldbank.org/en/results/2017/12/01/geothermal?> (August 25, 2025).
- World Bank, 2020, The Global Geothermal Development Plan: Mitigating Upstream Cost and Risk. <https://www.worldbank.org/en/results/2020/11/10/the-global-geothermal-development-plan-mitigating-upstream-cost-and-risk?> (August 26, 2025).
- Zhou, W., Lanza, F., Grigoratos, I., Schultz, R., Cousse, J., Trutnevyte, E., Muntendam-Bos, A. and Wiemer, S., 2024, Managing induced seismicity risks from enhanced geothermal systems: A good practice guideline. *Reviews of Geophysics*, 62, e2024 RG000849.