

〈Review paper〉

인도네시아의 배수된 열대 이탄지에 대한 재습지화 전략

노유진 · 김성준 · 한승현 · 이종열 · 손요환*

고려대학교 환경생태공학과

Rewetting Strategies for the Drained Tropical Peatlands in Indonesia

Yujin Roh, Seongjun Kim, Seung Hyun Han, Jongyeol Lee and Yowhan Son*

*Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School,
Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea*

Abstract - The tropical peatlands have been deforested and converted to agricultural and plantation areas in Indonesia. To manage water levels and increase the overall productivity of crops, canals have been constructed in tropical peatlands. The canals destructed the structure of the tropical peatlands, and increased the subsidence and fire hazard risks in the region. The Indonesian government enacted regulations and a moratorium on tropical peatlands, in order to reduce degradation. A practical method under the regulations of rewetting tropical peatlands was to permit a canal blocking. In this study, four canal blocking projects were investigated regarding their planning, construction priority, design, building material, construction, monitoring, time and costs associated with the canal blockings. In the protected areas, regulations restricted the development of the tropical peatlands areas that were noted as deeper than 3 m, and the administration stopped issuing new concessions for future work projects for this noted criteria of land use. A noted purpose of canal blockings in these areas was to effectuate the restoration of the lands in the region. The main considerations of the restoration efforts were to maintain a durability of the blockings, and to encourage the participation of the area stakeholders. In the case of a concession area, regulations were set into place to restrict clear-cutting and shifting cultivation, and to maintain groundwater level in the tropical peatland. The most significant priorities identified in the canal blocking project were the efficiency and cost-effectiveness of the project. Nevertheless, the drainage of tropical peatlands has been continued. On the basis of a literature review on regulations and rewetting methods in tropical peatlands of Indonesia, we discussed the improvements of the regulations, and adequate canal blockings to serve the function to rewet the tropical peatlands in Indonesia. Our results would help establishing an adequate direction and recommended guideline on viable rewetting methods for the restoration of drained tropical peatlands in Southeast Asia.

Keywords : canal blocking, drained tropical peatlands, Indonesia, rewetting

* Corresponding author: Yowhan Son, Tel. 02-3290-3015,
Fax. 02-3290-3651, E-mail. yson@korea.ac.kr

서론

열대 이탄지는 다량의 유기물이 축적되어 생물지구화학적 순환에 중요한 영향을 미친다(Page *et al.* 2011). 자연 상태의 열대 이탄지 수문은 식생이 있는 호기성 지상층(acrotelm)과 혐기성 이탄 토양 상층(catotelm)으로 구성되며, 지상층과 이탄 토양 상층 간의 상호작용에 의해 생물지구화학적 작용이 이루어진다(Morris *et al.* 2011). 열대 이탄지는 이탄토양의 높은 수분보유능에 의해 우기에 반구형의 돔(peat dome)을 형성한다. 돔 구조를 통해 열대 이탄지는 건기에 물을 공급하고 우기에 물을 보유하여 지역 내 수문의 완충작용을 하며 홍수 및 산불 발생 위험을 감소시킨다(Benjamin and Kutzbach 2014).

열대 이탄지는 동남아시아, 아프리카, 카리브해, 남아메리카 지역 등에 분포하고 있으며 그 중 동남아시아 지역에서의 면적이 가장 넓다. 동남아시아 국가들 중에는 인도네시아(206,950 km²; 47%), 말레이시아(25,889 km²; 6%), 그리고 파푸아 뉴기니아(10,986 km²; 3%) 순으로 면적이 넓다(Page *et al.* 2011). 따라서 인도네시아는 동남아시아 국가 중에서 가장 넓은 면적의 열대 이탄지를 가지고 있어 열대 이탄지의 보전에 중요한 의미를 지닌다. 하지만 인도네시아는 자연자원에 대한 의존도가 높고 경제개발을 중요시하여 근래에 매우 빠른 속도로 열대 이탄지를 개발해왔다(Evers *et al.* 2017).

인도네시아의 열대 이탄지는 오일팜, 목재 및 작물 농장으로 전용되어왔다(Hooijer *et al.* 2010; Medrilzam *et al.* 2014). 전용을 위해 열대 이탄지 지상층의 산림이 벌채되었고, 이탄 토양 상층의 수위를 낮추기 위해 수로가 설치되었으며, 화전농업이 진행되었다(Medrilzam *et al.* 2014). 그런데 열대 이탄지에 수로가 설치되면 이탄 토양 상부가 건조해지고 지하수위가 깊어져 오일팜과 같은 작물의 생산이 용이해지나(Hooijer *et al.* 2012; Joosten *et al.* 2012), 물리적 돔 구조가 파괴되고 침하가 발생하며, 상층의 호기성 분해로 인한 온실가스 배출량이 증가한다(Ewing and Vepraskas 2006; Anshari *et al.* 2010; Jauhiainen *et al.* 2016).

배수된 열대 이탄지는 표층이 건조해지면 다시 침수상태로 되돌아가기 어렵다(Anshari *et al.* 2010; Jauhiainen *et al.* 2016). 특히 인도네시아의 건기(3~9월) 동안에 지하수위가 크게 깊어지는데, 이탄 토양이 건조되면 산불의 발생 빈도가 증가한다(Hooijer *et al.* 2010; Konecny *et al.* 2016). 열대 이탄지에 축적된 유기물이 산불로 인해 연소되면 막대한 양의 CO₂가 대기 중으로 배출된다(Konecny *et al.* 2016). 또한, 1997년에 열대 이탄지에서 발생한 대형 산불 같은 경우에는 약 1억 5천만 달러의 손실을 일으키는 것으로 추정되었으며

(Tacconi 2003), 싱가포르 및 말레이시아에 연무 피해가 나타나 외교적 마찰이 유발되기도 하였다(Hoscilo *et al.* 2011; Marlier *et al.* 2015; Islam *et al.* 2016).

한편 적절한 수문관리를 통해 배수된 열대 이탄지를 재습지화(rewetting)하면, 산불 발생 위험, 이탄 토양의 침하 및 탄소 배출량도 감소할 것으로 예상된다(Hooijer *et al.* 2012; Wilson *et al.* 2016). 이에 인도네시아 정부는 지하수위 규제를 수행하였고, 관련 이해당사자들은 재습지화를 시도하고 있다(Ritzema *et al.* 2014; Islam *et al.* 2016; Evers *et al.* 2017). 그러나 배수를 통한 열대 이탄지 수문관리 방법들에 비해 재습지화 방법에 관한 자료는 매우 부족한 실정이다(Page *et al.* 2009; Jaenicke *et al.* 2010). 만약 우리나라가 인도네시아의 열대 이탄지 복원을 성공적으로 수행하여 산림 전용 및 황폐화 방지(REDD+; Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation) 활동을 인정받는다면, 탄소배출권을 확보할 수 있다. 이에 따라, 본 연구는 문헌을 중심으로 인도네시아 열대 이탄지에 오랜 기간 적용되어온 수문관리의 방법과 그 규제를 파악하고, 재습지화 시도 사례들을 분석하여 적절한 재습지화 방안을 제시하고자 하였다.

본론

1. 인도네시아 열대 이탄지의 이용과 정부 규제

1960년대 초까지 열대 이탄지는 일부 토착 부족민들만이 이용하는 쓸모없는 땅으로 여겨져 자연적인 상태를 유지할 수 있었다(Silvius and Suryadiputra 2005). 그러나 농경지의 수요가 점차 증가함에 따라 토지전용이 일어났고, 농경지를 조성하기 위한 수문관리 사업이 진행되었다(Melling *et al.* 2009; Anshari *et al.* 2010; Joosten *et al.* 2012). 침수된 이탄 토양 상층은 오일팜, 아카시아, 벼 및 원예작물의 생산에 적합하지 않기 때문에, 배수를 한 후 대표적인 경제 수종인 오일팜과 아카시아를 주로 조림하였다(Hooijer *et al.* 2012; Uda *et al.* 2017). 천연 열대 이탄지에서 이탄 토양의 침하 속도는 평균적으로 0~1 cm yr⁻¹ 수준이나, 배수를 하고 오일팜 및 아카시아를 조림한 경우 5 cm yr⁻¹로 빠르게 증가하였다(Melling *et al.* 2009; Hooijer *et al.* 2012). 또한, 천연 열대 이탄지의 지하수위는 일반적으로 0~0.33 m이나, 오일팜 및 아카시아 조림 후에는 약 0.7 m로 깊어졌다(Hooijer *et al.* 2012; Couwenberg and Hooijer 2013).

인도네시아 정부는 무분별한 열대 이탄지 개발 및 이용을 제한하기 위한 정책을 시행하였다. 즉 이탄지를 보호 및 복원을 위한 이탄지 및 개발과 경작을 위한 이탄지로 구분하였고, 이에 따라 정책을 집행하였다. 열대 이탄지의 보호 및

Table 1. Presidential Decrees and Instruction, and Government Regulations related to tropical peatlands in Indonesia

Target	Contents
Presidential Decree	
Presidential Decree No. 32/1990	Allocating peat with a thickness < 3 m for agriculture development and peat with a thickness > 3 m for conservation
Presidential Decree No. 82/1995 (Peatland Development for Food Crop Agriculture in Central Kalimantan)	Developing peatland in Central Kalimantan for food crop agricultural land
Presidential Instruction	
Presidential Instruction No. 10/2011 (Delay on New License Issuance and Perfection of Governance of Primary Natural Forest and Peatlands)	Commencing the moratorium, which stops the issuance of new concession for 5 years (to allow time for the Indonesian government to establish a degraded land database OneMap)
Government Regulation	
Government Regulation No. 26/2008 (National Territorial Layout Plan)	Designating peat > 3 m as a protected ecosystem
Government Regulation No. 71/2014 (Protection and Management of Peatland Ecosystem)	Maintaining water table at 40 cm or below; prohibiting cultivation or development of peatland area where peat depth is > 3 m; designating peat > 3 m as a protected ecosystem; protecting 30% of the designated area for development where peat < 3 m; classifying damaged peatland as the peatland with the water table of > 1 m below the peat surface
Government Regulation No. 57/2016 (A revision of PP No. 71/2014 on peatland ecosystem management and protection)	A permanent moratorium, which prohibiting everyone from clearing new land until a zoning system for the protection and cultivation of the peatland ecosystem is in place
Government Regulation No. 14/2009 (Guideline on Oil Palm Plantation on Peatland 2009)	Maintaining water table between 60 cm to 80 cm depth in the palm oil cultivation; constructing canals with a width of 4 m, bottom width of 3 m and depth of 2–3 m; prohibiting palm oil cultivation where peat is > 3 m deep; having a minimum of 70% of peat at < 3 m on the cultivation area

복원에 대한 구체적인 지침은 1990년대에 처음으로 대통령령에 의해 정해졌다(Presidential Decree No. 32/1990). 이 대통령령에 의해 깊이 3 m 이하의 열대 이탄지에 대한 개발만이 허용되었으며, 깊이 3 m 이상인 열대 이탄지는 보호구역으로 지정되었다(Table 1). 이후 2008년에 또다시 깊이가 3 m 이상인 열대 이탄지를 보호구역으로 지정하였고(Government Regulation No. 26/2008), 2009년 농업부는 허가지 중 깊이 3 m 이상인 지역이 30% 이상인 지역에서의 개발 및 경작을 제한한다는 가이드라인을 발표하였다(The Ministry of Agriculture Regulation No. 14/2009). 2011년에는 황폐화된 지역에 대한 데이터베이스(OneMap)가 완료될 때까지 열대 이탄지의 모든 신규 개발 및 이용 허가권(concession) 발급을 중단(moratorium, Presidential Instruction No. 10/2011)하는 대통령령이 선포되었고, 2015년부터 시행되었다.

한편 인도네시아 정부는 개발 및 이용 허가지에 대한 규제도 진행하였다. 모라토리엄 발효 이전에는 환경영향평가(AMDAL; Analisis Mengenai Dampak Lingkungan)를 도입하여 적절한 평가를 받은 지역에 대해서만 개발 및 이용 허가를 발급하였다(Evers *et al.* 2017). 농업부는 오일팜 조림지

의 최대 지하수위를 60~80 cm로 권장하였고,수로 설치 시 수로의 최대 폭 및 깊이, 그리고 경작 시 필요한 사항들에 대한 기준을 명시하였다(Table 1, Regulation of the Ministry of Agriculture No. 14/2009). 그러나 모라토리엄의 발표 이후에는 정책이 개정되어, 기존에 이용 및 개발 허가를 발급받은 오일팜 조림지의 지하수위를 40 cm로 규제하였다(Table 1, Government Regulation No. 71/2014). 이 정책은 열대 이탄지 깊이가 3 m 이상일 경우에는 경작을 전면 금지하고, 수문에 인접한 열대 이탄지가 경작되지 않은 상태일 경우 해당 지역의 30%에는 추가적인 경작 및 개발을 금지한다는 내용도 포함하였다.

배수된 열대 이탄지의 문제점이 가시화됨과 동시에 자연 상태의 열대 이탄지가 보유한 다양한 장점에 대한 인식이 확산되자, 인도네시아 정부 및 열대 이탄지 이해관계자들은 REDD+ 활동으로 이익을 창출하는 방안을 고려하게 되었고, REDD+에 대한 국가 전략을 수립하였다(Sumarga *et al.* 2016). 이에 따라, 열대 이탄지의 수문관리는 배수를 통한 토지전용에서 재습지화(rewetting)를 통한 복원 및 지하수위 관리 시도로 변화하고 있다.

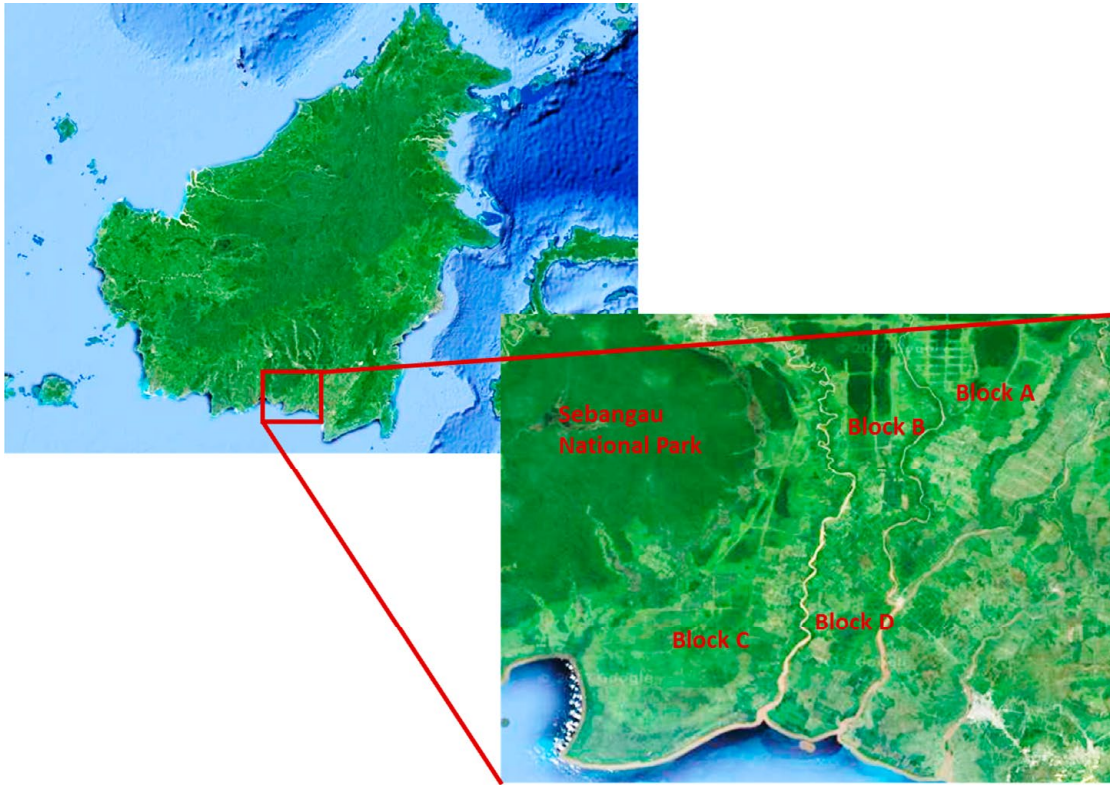


Fig. 1. A map of Mega rice farm project, consists of Block A, B, C, D and Sebangau national park in Kalimantan, Indonesia.

2. 인도네시아 열대 이탄지의 재습지화 수행 사례

인도네시아를 포함한 열대 이탄지의 재습지화는 댐을 설치하여 수로를 차단(canal blocking)하고 유속을 줄여, 주변 이탄 토양의 수분보유량을 증가시키고 지하수위를 높이는 방법으로 진행되고 있다(Page *et al.* 2009; Ritzema *et al.* 2014). 그리고 댐 설치에는 설치의 목표, 계획, 우선순위와 함께 댐의 구조와 재료, 모니터링 방법, 그리고 소요 시간과 비용 등이 고려되어야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 보호 및 복원을 위한 이탄지와 개발과 경작을 위한 이탄지에 각각 적용된 수로차단 시설들의 설치 계획, 설치의 우선순위, 댐의 구조와 재료, 모니터링 방법, 그리고 소요 시간과 비용을 구분하여 조사하였다.

1) 보호 및 복원을 위한 수로차단

1995년에 중앙 칼리만탄 열대 이탄지 지역의 백만 ha를 벼농사 지역으로 전환하겠다는 대통령령(Presidential Decree No. 82/1995)이 정해졌다. 이 대통령령에 따라 대규모벼농사사업(MRP; Mega Rice Project)이 수행되었고, 해당 열대 이탄지는 타 지역보다 개발이 가속화되었다. MRP 지역은 A, B, C구역과 스방아우 국립공원(Sebangau National Park)으로 구성되어 있었고(Fig. 1), MRP를 위해 958 km의 주수로,

973 km의 이차 보조 수로, 그리고 900 km의 삼차 보조 수로가 설치되었다(Ritzema *et al.* 2014).

MRP 지역에서 배수가 일어난 뒤, 1997년에 엘니노로 인한 다수의 산불이 발생하자 MRP를 중단한다는 대통령령(Presidential Decree No. 80/1998)이 새롭게 발효되었다(Hoscilo *et al.* 2011; Ritzema *et al.* 2014). 개발이 중단된 후 해당 지역은 방치되었고, 자연적인 산불이 지속적으로 발생하여 이차 천이가 진행되지 않았다. 그 결과, 양치식물(*Stenochlaena*, *Lygodium*, *Polypodium* 및 *Pteris* spp.) 및 사초과 식물(*Cyperus* 및 *Scleria* spp.)만이 해당 지역을 우점하였다(Hoscilo *et al.* 2011). 이 후 2005년에 재습지화를 위한 다수의 수로차단 시범사업들이 수행되었다(Ritzema *et al.* 2014; Ochi *et al.* 2016).

이러한 시범사업들 중 하나는 중앙 칼리만탄 이탄지 사업(CKPP; Central Kalimantan Peatland Project)으로, 방치된 MRP 지역의 복원과 빈곤해결을 위해 국제 원조 구호 기구(CARE International Indonesia), 세계자연기금(WWF; World Wildlife Fund), 그리고 팔랑카 라야 대학(University of Palangka Raya) 등이 참여하였다. CKPP에 의해 2006년부터 MRP의 A구역과 스방아우 국립공원에 댐이 설치되기 시작하였고, 구체적인 댐의 설치 지점은 수로의 물리적

Table 2. Comparisons of canal blocking projects

Category	Restoration area	Concession area
Goal	Restoration	Reducing the fire risk; Developing full buffer zones between concession area and natural forest
Priority	Depending on the size of the canal ¹ - High priority: Long, wide and deep canals with a high water level and flow - Low priority: canals filled with mud and weeds	Types of forest bordering the concession area - 1: canals bordering forest that has legally protected status - 2: canals bordering forest that has no legally protected status but is considered highly vulnerable to fire - 3: canals bordering forest that is not considered highly vulnerable to fire - 4: canals not bordering forests
Considerations Planning	Replanting of vegetation; Community involvement ^{2,3} Selection of locations based on geospatial analysis ¹ - Combining approach of field inventory, remote sensing (LIDAR), and geospatial analysis to establish 3D peat dome topography assessment and hydrological modelling (SIMGRO) Selection of locations based on Field survey data ³ - the physical form and dimensions of canals, hydrological patterns, vegetation condition, community activities, availability of materials and access to the location	The number of the canal blockings and a distance between the canal blockings to maintaining water level between the canal blocking; Size of spillway
Canal blocking type	A cofferdam, consisting of a frame made of poles filled with compacted peat ^{1,2} or sand bags ³	A perimeter canal blocking
Building material	Galam timber (<i>Melaleuca cajuputi</i> or swamp tea tree) and peat (gambut) ^{1,2} or sand bags ³	Compacted peat
Construction	Local labor	Excavator
Time and cost	Thirty canal blockings in 7 days ¹ or 1 canal blocking in two weeks ² ; approximately 150,000 IDR Labor costs for one dam (transport and material costs excluded) ¹	15 hours; approximately \$380–540 (including excavator rental, labor and fuel)
Monitoring	Transect methods - water tables ^{1,2,3} - subsidence rates ^{1,2,3}	Water levels in the upstream and downstream of each canal blocking
Effect	Raised water levels ^{2,3} ; Reduced CO ₂ emission ¹	None

¹: WWF project (Jaenicke *et al.* 2010, 2011), ²: CIMTROP project (Ritzema *et al.* 2008, 2014; Ochi *et al.* 2016), ³: CKPP project (CKPP 2008)

형태와 규모, 수문 및 식생 현황, 주민 활동과 지역의 접근성에 대한 현장 조사 자료를 기반으로 선정되었다 (Table 2, Suryadiputra 2005; CKPP 2008). 해당 사업에서 설치된 댐은 완전히 수로를 차단하거나 (Fig. 2a), 좁은 배수로가 있는 것 (Fig. 2b)의 형태를 하고 있었다 (CKPP 2008). 가람 목재 (*Melaleuca cajuputi* 또는 swamp tea tree)로 댐의 구조를 형성하였고 내부는 모래주머니로 채웠으며, 투수를 줄이기 위한 널빤지와 방수포가 벽면에 부착되었다. 또한, 댐 설치 공사와 유지·보수 작업에는 지역사회의 경제 발전을 고려하여 주민들을 참여시켰고, 모니터링은 선상통계법을 이용하여 격월로 지하수위와 침하속도의 변화를 측정하였다. 그 결과, 댐이 지하수위를 높이고 수로의 수위를 증가시켰으며, 이를 통해 이탄층 분해로 인해 발생하는 이산화탄소 중 연

간 약 4톤이 감소하는 등의 긍정적인 효과가 있는 것으로 보고되었다 (CKPP 2008).

WWF는 2005년부터 스방아우 국립공원의 복원을 위해 댐을 설치하였다. 스방아우 국립공원은 개발 및 이용 허가가 아니나, 불법 벌채자들에 의해 수로가 설치된 바 있다 (Jaenicke *et al.* 2010). WWF는 수로의 규모에 따라 댐의 설치 순서에 우선순위가 있다고 판단하였고 (Table 2, Jaenicke *et al.* 2010), 댐의 설치 지점과 개수는 현장조사 및 원격탐사 자료를 토대로 작성한 3D 지형 모델과 수문 모델링을 이용하여 선정하였다 (Jaenicke *et al.* 2011). 댐의 재료로는 토착 재료인 가람 목재로 구조를 만들고 이탄 토양으로 내부를 채웠다 (Jaenicke *et al.* 2010). 설치 공사에는 지역 주민들이 참여하였고, 공사팀은 7일간 30여 개의 댐을 설치하였

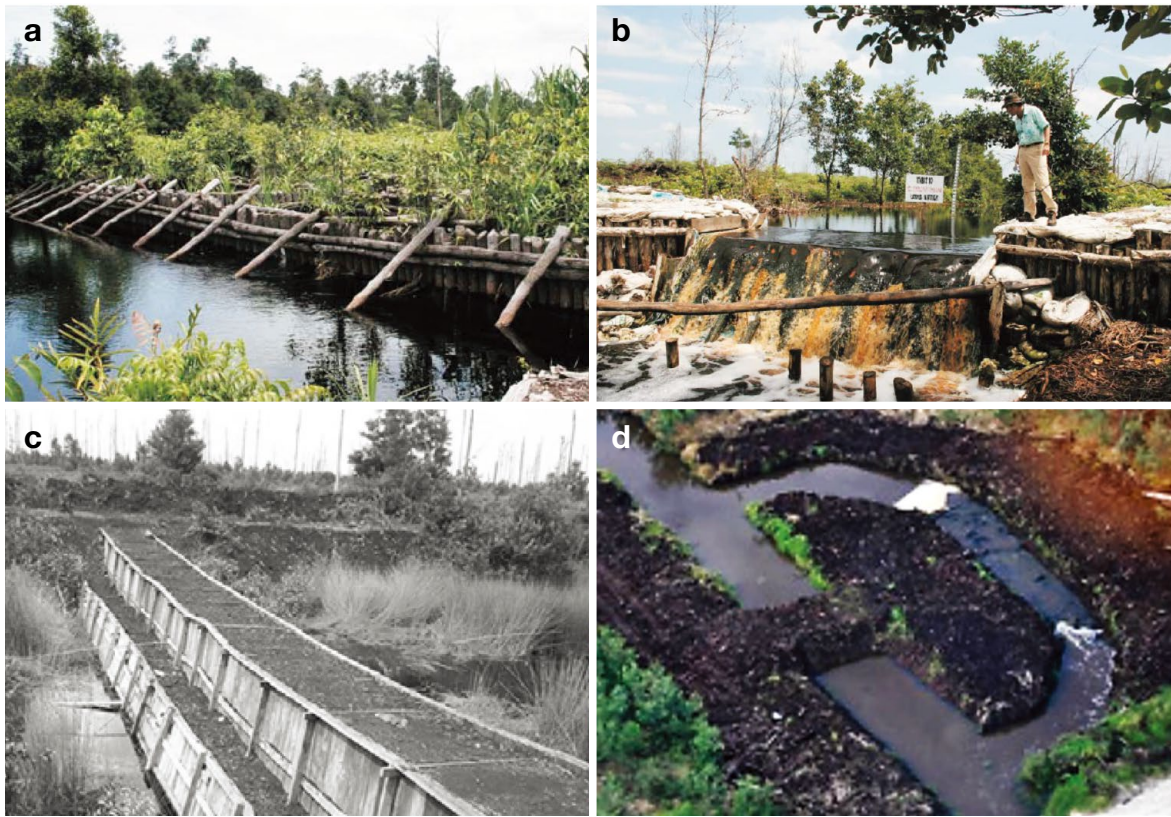


Fig. 2. Pictures of the canal blockings constructed by CKPP (a) without spillway, (b) with spillway (CKPP 2008), and (c) by CIMTROP without spillway (Ritzema *et al.* 2014) and (d) by APP with bypass spillway (APP and Deltares 2016).

다 (Jaenicke *et al.* 2010). 이 후, 수문 모델링을 이용해 지하수위의 변화를 추정한 결과 댐을 설치한 지역은 그렇지 않은 지역보다 상류지역의 수위가 50 cm 더 높았고, 수로 주변의 지하수위는 건기에 평균 20 cm 더 높은 것으로 나타났다 (Fig. 3, Jaenicke *et al.* 2011). 그리고 재습지화를 하면 열대 이탄지에서의 온실가스 배출량이 감소하는 것으로 나타나 (Wilson *et al.* 2016), 배수된 열대 이탄지의 재습지화를 통한 REDD+ 참여 가능성을 시사하였다 (Jaenicke *et al.* 2010).

동일한 시기에 지속가능한 열대 이탄지 관리에 관한 국제 협력 (CIMTROP; International Cooperation in Sustainable Management of Tropical Peatland)이 조직되어 C구역에 수로차단 사업을 수행하였다. 이 조직은 팔랑카 라야 대학을 중심으로 국제습지연대 (WI; Wetland International)와 WWF가 참여하였다 (Ritzema *et al.* 2014; Ochi *et al.* 2016). CKPP의 사업과 마찬가지로 댐의 설계는 배수구가 있는 것과 없는 것이었으며, 설치 재료로 토착 재료인 가람 목재와 이탄 토양을 사용하였다 (Fig. 2c, Ritzema *et al.* 2014). 그리고 댐 상부에 식생의 정착을 유도하여 댐의 지속성을 높이도록 설계하였다 (Table 2, Ritzema *et al.* 2008, 2014). 댐 설치 공사

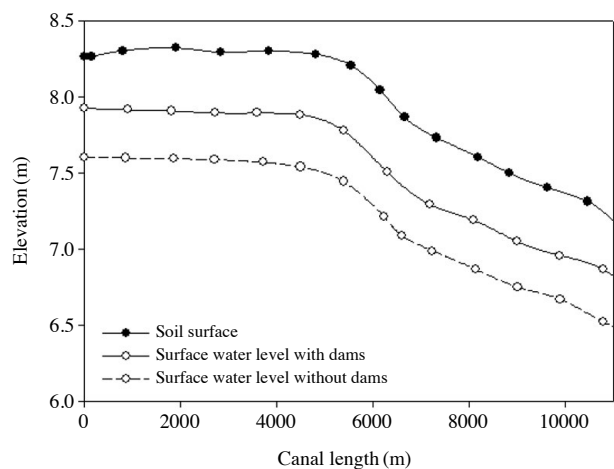


Fig. 3. The surface water level (swl) estimated using hydrological modelling in a single canal after a canal blocking during the dry season (adapted from Jaenicke *et al.* 2010).

에는 지역 주민들을 참여시켰고, 모니터링 시 선상 통계법을 이용하여 지하수위와 침하속도를 조사하였다 (Ritzema *et al.* 2014). 모니터링 결과, 상류에 댐이 설치된 지점에서는 우기

Table 3. The average water table depth along the three transects on tropical peatlands before and after the construction of dams (Limin *et al.* 2008)

Year	Water table depth (m)		
	Transect 1	Transect 2	Transect 3
Before dam construction			
Sep. 4	-0.84	-0.87	-1.08
Oct. 4	-1.51	-1.34	-1.45
Nov. 4	-1.04	-0.86	-1.12
Average	-1.13	-1.02	-1.22
After dam construction			
Jun. 5	-0.59	-0.83	-0.41
Jul. 5	-0.34	-0.27	-0.29
Aug. 5	-0.12	-0.38	-0.09
Average	-0.35	-0.49	-0.26

시 수로 주변 열대 이탄지의 지하수위가 0.37~1.12 m로 상승하였으나, 건기 시에는 이러한 수위의 증가 효과가 발견되지 않았다(Table 3, Limin *et al.* 2008; Ritzema *et al.* 2014).

2) 개발 및 이용 허가지에서의 수로차단

개발 및 이용 허가지에 수로를 차단한 사례로 아시아 펄프 앤 페이퍼 (APP; Asia Pulp & Paper)의 사업이 있다. APP는 자체적인 이탄지 보호 방침을 만들고, 산불 위험 방지 대책을 마련하고자 네덜란드 수자원연구소(Deltares)와 협력하여 수로차단을 수행하였다(APP 2014). 이를 통해 지하수위를 증가시켜 산불 발생 위험도를 감소시키고, 천연 열대 이탄지와 전이대(buffer zone)를 형성하고자 하였다(Table 2). 수로차단 설치 지역들은 개발 및 이용 허가지나 정부 규제(Government Regulation No. 71/2014)가 적용되었으므로, 개발 및 이용 목적에 용이한 수로차단 방법이 수행되었다. APP의 가이드라인(APP and Deltares 2016)에 따르면, 댐의 위치는 설치된 댐 사이의 물이 고갈되거나 넘치지 않도록 단계별 수위차(water step)가 항상 0.25m로 유지될 수 있도록 선정해야 한다. 설치된 댐은 유속을 낮출 수 있는 우회 배수로의 형태를 보였다(Fig. 2d, APP and Deltares 2016). 댐의 설치 시에는 인접한 산림의 토지구분과 산불 발생 위험도에 따라 법적 보호지, 비법적 보호지, 산불위험이 적은 지역, 그리고 숲이 인접하지 않은 지역으로 순서를 정하였다. 댐의 재료로는 주변에서 구하기 쉽고 저렴한 이탄 토양을 압축하여 사용하였고, 중장비를 이용하여 단기간에 설치를 함으로써 비용을 크게 절감하였다(Table 2). 이 설계는 보호 지역에서의 수로차단 사례들처럼 목재와 같은 댐의 골격을 구성하는 재료를 사용하지 않았으나, 수로의 규모에 따른 댐 및 우회로의 규격 기준을 철저히 따르게 함으로써 달성되었다. 모니터링 또한 토양에서의 직접적인 지하수위 변화를 측정하지 않고 간단하게 댐 상·하류에서의 수위 변화를 확인

하는 방법으로 수행하였다.

3. 인도네시아 열대 이탄지의 재습지화 현황 및 문제점

진술한 인도네시아 정부의 규제와 각종 재습지화 시도에도 불구하고 열대 이탄지의 배수 및 황폐화는 여전히 지속되고 있는 실정이다(Evers *et al.* 2017; Uda *et al.* 2017). 2000~2014년간 열대 이탄지 토지전용은 수마트라에서 가장 넓게 나타났으며, 특히 보호지역으로 지정된 버박 국립공원(Berbak National Park)의 상당한 면적이 전용된 것이 위성영상으로 드러났다(Uda *et al.* 2017). 이어 칼리만탄에서 높은 토지전용이 발생하였는데, Uda *et al.* (2017)에 따르면 칼리만탄 내 배수 및 토지전용이 일어난 지역은 28%에서 35%로 증가하였다. 이는 '인도네시아 자연자원은 국민들에게 도움이 되도록 이용할 수 있다'라는 인식이 만연한 가운데, 새로 개간된 지역의 생산성이 이미 황폐화된 지역보다 더 높아 토지전용이 지속되었기 때문이다(Evers *et al.* 2017).

인도네시아 정부의 열대 이탄지 황폐화 규제 정책에서 일관성과 실효성이 부족한 것이 이탄지의 파괴를 가속화시키는데 일조하였다(Evers *et al.* 2017; Uda *et al.* 2017). 인도네시아는 강력한 지방 분권화를 추진하여 국가 수준의 정책들이 마을, 구, 지방정부 수준에서 이루어지는 토지이용 결정을 막을 수 있는 강제성이 부족하였다(Abdullah 2002; Setiawan *et al.* 2016). 또한, 인도네시아 정부는 경제개발을 위해 오일팜 및 아카시아 조림 사업을 우선시하여 열대 이탄지의 개발 정책과 규제 정책 간의 마찰이 발생하였다(Boer *et al.* 2012; Varkkey 2015; Setiawan *et al.* 2016; Evers *et al.* 2017). 특히 대규모 자본을 기반으로 하는 팜오일 기업들은 관련 법률들에 대해 로비를 하고, 모라토리엄(Presidential Instruction No. 10/2011)이 발효되기 이전에 대량의 허가를 발급받아 인도네시아 열대 이탄지 개발에 막대한 영향을 주었다(Evers *et al.* 2017). 더욱이 현재 팜오일 농장의 지하수위는 40 cm로 규제되고 있으나(Government Regulation No. 71/2014), 이러한 수준의 규제는 산불 발생 위험은 줄일 수는 있지만 열대 이탄지의 침하를 막고 생물지구화학적 기능을 복원하기에는 부족한 것으로 보고되고 있다(Hooijer *et al.* 2012).

한편 재습지화 사업 사례에서는 댐이 훼손되는 것이 문제가 되었다. 훼손의 원인은 CIMPTROP의 경우 이탄 토양의 투수성에 의해 댐에서 누수가 나타난 것으로 판단하였으며(Ritzema *et al.* 2014), APP는 댐 설치 규격을 명확하게 따르지 않음에서 기인한 것으로 판단하였다(APP and Deltares 2016). 그리고 CIMPTROP 사업의 경우, 설계 시 댐 상부의 식생 정착을 유도하고자 하였으나 우기마다 댐의 상부가 지

속적으로 침수되어 식생이 정착하지 못했다는 문제점이 발생하였다(Ritzetma *et al.* 2014).

4. 인도네시아 열대 이탄지의 재습지화 방향

인도네시아 정부는 지속적으로 열대 이탄지에 관한 법률 및 규제를 제정하였으나, 배수와 황폐화는 지속되었다. 조사한 문제점을 기반으로 열대 이탄지 관련 법률 및 정책은 아래와 같은 사항들이 보완되어야 한다:

1. 정부 부처간, 정부 부처와 지방 정부 간 합의를 통한 일관성 있는 정책 규제가 시행되어야 한다. 특히 오일팜 조립 지역의 지하수위에 대한 명확한 기준을 설정해야 한다.
2. 열대 이탄지의 이용 및 개발을 허가할 경우에, 기존의 팜 오일 및 아카시아 산업 이외에 배수하지 않고도 생육이 가능한 침수성 작물을 권장하는 것이 바람직하다. 인도네시아의 높은 팜오일 산업의 의존도에 의해, 젤루통(*Jelutong*; *Dyera* spp.), 사고(*sago palm*; *Metroxylon sagu*), 일립넛(*illipe nut*; *Shorea* spp.), 멜라루카(*Myrtaceae*), 라탄(*Calamoideae*) 등 침수성 작물들은 열대 이탄지에서 배수를 하지 않고도 생육이 가능하나 그 생산은 미미한 수준이다(Joosten *et al.* 2012; Sumarga *et al.* 2016; Uda *et al.* 2017).

본 연구에서 조사한 재습지화 사례들은 수로를 차단하여 열대 이탄지의 지하수위를 높이고자 수행되었으나, 수행 목적에 따라 주요 고려사항의 내용과 문제점에 차이가 있는 것이 확인되었다(Table 2). 따라서 기존 사례들을 종합하여 제시할 수 있는 열대 이탄지 재습지화의 방법은 다음과 같다.

1. 댐의 설치 지점 및 댐 간의 간격은 해당 지역의 현장조사 자료와 지리정보자료를 바탕으로 선정되어야 한다.
2. 댐의 형태 및 규격은 수로의 규모에 따라 달라진다. 형태는 배수로가 없는 것, 좁은 배수로가 있는 것, 그리고 우회 배수로가 있는 것 등으로 설치될 수 있다. 그러나 현재 댐의 형태 및 규격에 대한 명확한 규정은 우회 배수로에 대해서만 작성되었다. 따라서 효과적인 수로차단을 위해서는 수로의 규모에 따른 형태 및 규격에 대한 규정이 마련되어야 한다.
3. 설치 재료에 따라 댐의 지속성이 달라지므로, 장기간 지속 가능한 재료를 사용해야 한다. 기존 사례들은 지속성을 위해 구조를 만드는 데 가람 목재를 사용하였으며, 내부는 이탄 토양이나 모래로 채운 것이 대부분이었다. 그러나 일부 사례에서 댐의 훼손이 발생하였으므로, 댐의 투수성을 줄이기 위해 방수포와 널빤지를 추가적으로 덧대어 이용하는 사례를 참조해야 한다.

4. 댐의 설치 순서는 수로의 규모와 주변 열대 이탄지 이용 현황에 따라 선정되어야 한다. 일반적으로 대규모 수로가 설치된 경우 지하수위 및 침하가 크게 나타나므로, 규모가 큰 수로에 우선적으로 댐을 설치해야 한다. 개발 및 이용 허가지역의 경우에는 주변 열대 이탄지의 토지이용분류와 산불 발생 위험도에 따라 설치의 우선순위를 정할 수 있다.
5. 댐의 공사에는 비용 및 시간이 제한적인 경우 중장비를 사용할 수 있으나, 장기적으로 지역사회 발전 및 REDD+ 사업을 고려한다면 주민들을 설치 공사에 참여시켜 지역 이해관계자들과의 공동발전을 모색하는 것이 바람직하다.
6. 모니터링은 선상통계법으로 현장에서 열대 이탄지의 지하수위를 직접적으로 측정하거나, 수문 모델링을 이용하여 추정할 수 있다. 또한, 수로의 수위변화가 주변 이탄 토양에 영향을 미치므로, 간접적으로 상류와 하류의 수위를 주기적으로 측정하여 수로설치 전후의 수위 변화로 결과를 모니터링 할 수도 있다.

결론

과거 열대 이탄지는 개발 및 이용을 위해 오일팜과 아카시아 농장으로 전용되었으며, 전용 후 작물들의 생육을 위해 수로가 설치되고 지하수위가 낮아졌다. 이에 대응하여 인도네시아 정부는 무분별한 열대 이탄지의 개발 및 이용을 제한하기 위해 지속적으로 관련 정책을 추진하였고, 근래에는 이탄지와 관련된 기후변화 체계를 통한 수익 창출에 관심이 높아졌다. 즉, 최근 인도네시아에서는 기존의 개발 및 이용을 위한 수문관리 방법보다 보호 및 복원을 위한 재습지화가 시도되고 있다. 그리고 재습지화는 설치된 수로를 차단하고 이탄지 내 수분함량을 증가시키는 방향으로 진행되었는데, 수행 지역이 보호·복원 지역인지 혹은 개발·이용 허가 지역인지에 따라 수로차단물의 설치 계획, 설치의 우선순위, 댐의 구조와 재료, 모니터링 방법, 그리고 소요 시간과 비용이 달라졌다.

이처럼 다양한 재습지화 시도들이 진행되었음에도 불구하고, 인도네시아 열대 이탄지의 배수와 토지전용은 지속되었다. 인도네시아 열대 이탄지 관련 정부 규제와 수로차단 방법들을 종합하고 나타난 문제점들을 참고하면, 정부 규제에서 보완되어야 할 사항들과 적절한 재습지화의 방법은 다음과 같다. 인도네시아 정부의 열대 이탄지 규제는 정부부처·지방정부와의 합의를 통해 일관성이 마련되어야 하며, 개발 및 이용 허가 시 팜오일 산업의 의존도를 낮추고 침수성 작물 사업을 육성하는 것이 바람직한 방향이다. 또한, 재습지

화를 위해서는 현장조사와 원격탐사 자료를 통해 차단 지점과 댐 간의 간격을 선정하여야 하며, 수로의 형태 및 규격은 수로의 규모에 따라 달라져야 한다. 장기간 지속 가능한 재료를 사용한 댐이 설치되어야 하며, 차단물의 중요성에 따라 설치 순서를 정해야 한다. 주변 주민들이나 중장비를 이용하여 댐을 설치할 수 있으며, 현장조사와 모델링을 통해 지하수위나 수로의 수위 변화를 모니터링 해야 한다. 이러한 방침으로 우리나라가 배수된 열대 이탄지의 재습지화를 적절하게 수행하게 된다면, 추후 재습지화 활동을 통한 탄소배출권의 확보가 보다 용이해질 것이다.

적 요

인도네시아의 열대 이탄지는 황폐화되고 농경지 및 조림지로 전용되어왔다. 수로는 열대 이탄지의 지하수위를 관리하고 작물의 생산성을 높이기 위해 설치되었으나, 열대 이탄지의 구조를 파괴하고 침하 및 산불 발생 위험을 증가시켰다. 이에 따라, 인도네시아 정부는 수로로 인한 문제를 막기 위한 정책과 모라토리엄을 마련하였다. 그리고 해당 정책들에 따라 이탄지 재습지화에 관한 시범사업들이 일부 수행되었다. 우리나라가 열대 이탄지를 재습지화 한다면 추후 탄소배출권을 확보할 수 있는 가능성이 있으므로, 적절한 재습지화에 관한 자료가 필요하다. 이에 따라, 본 연구에서는 열대 이탄지에 적용되는 정책의 흐름을 조사하고 이 시범사업들의 설치 계획, 고려사항, 댐 설계, 재료, 설치 방법, 모니터링 방법, 그리고 소요 시간 및 비용 등에 대해 분석하였다. 이탄층의 깊이가 3m 이상인 지역은 개발이 제한되고 개발 허가 발급이 중단되었으며, 복원을 위한 수로차단이 설치되었다. 이 지역에서는 댐의 지속성과 지역 이해당사자들의 참여를 독려하는 것이 우선순위로 여겨졌다. 개발 허가지역의 경우에는 개별화 전환이 금지되었으며, 지하수위를 유지하기 위한 수로차단에 목적을 두었고, 수로차단을 설치할 때에는 작업 및 비용의 효율성이 우선적으로 고려되었다. 조사 결과를 바탕으로 본 연구에서는 인도네시아 열대 이탄지의 규제 적용 및 수로차단 설치 시 적용할 수 있는 방안들을 제시하였다. 이러한 결과는 동남아시아 지역의 배수된 열대 이탄지에 적합한 수로차단을 계획하는 데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 산림청의 인도네시아 이탄지 보전복원 및 기후변화대응 방안 개발 사업(2017047A00-1718-BB01) 연구과제의 지원을 받아 수행된 결과의 일부로 작성되었습니다.

REFERENCES

- Abdullah A. 2002. A review and analysis of legal and regulatory aspects of forest fires in South East Asia. Project Fire Fight South East Asia, Jakarta.
- Anshari GZ, M Afifudin, M Nuriman, E Gusmayanti, L Arianie, R Susana, R Nusantara, J Sugardjito and A Rafiastanto. 2010. Drainage and land use impacts on changes in selected peat properties and peat degradation in West Kalimantan Province, Indonesia. *Biogeosciences* 7:3403-3419.
- APP. 2014. APP forest conservation policy update. Available at http://www.asiapulppaper.com/system/files/18_month_fcp_update_final_1.pdf.
- APP and Deltares. 2016. Brief guideline for plantation perimeter canal blocking as a rapid fire risk reduction measure in Indonesian peatlands. Available at http://www.asiapulppaper.com/sites/default/files/download/ssepeat_final.pdf.
- Benjamin RKR and L Kutzbach. 2014. Peatland characterization. pp. 6-11. In *Towards climate-responsible peatlands management: mitigation of climate change in agriculture series*, vol. 9, chapter 1 (Biancalani R and A Avagyan eds.). FAO and WI, Rome.
- Boer R, D Nurrochmat, H Purwawangsa and G Ginting. 2012. Reducing agricultural expansion into forests in Central Kalimantan Indonesia: analysis of implementation and financing gaps. Bogor Agricultural University, Bogor.
- Couwenberg J and A Hooijer. 2013. Towards robust subsidence-based soil carbon emission factors for peat soils in south-east Asia, with special reference to oil palm plantations. *Mires Peat* 12:1-13.
- CPKK. 2008. Provisional report of the Central Kalimantan peatland project. Available at <https://www.wetlands.org/publications/provisional-report-of-the-central-kalimantan-peatland-project/>.
- Evers S, CM Yule, R Padfield, P O'reilly and H Varkkey. 2017. Keep wetlands wet: the myth of sustainable development of tropical peatlands-implications for policies and management. *Glob. Change Biol.* 23:534-549.
- Ewing JM and MJ Vepraskas. 2006. Estimating primary and secondary subsidence in an organic soil 15, 20, and 30 years after drainage. *Wetlands* 26:119-130.
- Hooijer A, SE Page, J Canadell, M Silvius, J Kwadijk, H Wösten and J Jauhiainen. 2010. Current and future CO₂ emissions from drained peatlands in Southeast Asia. *Biogeosciences* 7:1505-1514.
- Hooijer A, SE Page, J Jauhiainen, W Lee, X Lu, A Idris and G Anshari. 2012. Subsidence and carbon loss in drained tropical peatlands. *Biogeosciences* 9:1053-1071.
- Hoscilo A, SE Page, KJ Tansey and JO Rieley. 2011. Effect of

- repeated fires on land-cover change on peatland in southern Central Kalimantan, Indonesia, from 1973 to 2005. *Int. J. Wildland Fire* 20:578–588.
- Islam MS, Y Hui Pei and S Mangharam. 2016. Trans-boundary haze pollution in Southeast Asia: sustainability through plural environmental governance. *Sustainability* 8:499.
- Jaenicke J, H Wösten, A Budiman and F Siegert. 2010. Planning hydrological restoration of peatlands in Indonesia to mitigate carbon dioxide emissions. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* 15:223–239.
- Jaenicke J, S Enghart and F Siegert. 2011. Monitoring the effect of restoration measures in Indonesian peatlands by radar satellite imagery. *J. Environ. Manage.* 92:630–638.
- Jauhiainen J, SE Page and H Vasander. 2016. Greenhouse gas dynamics in degraded and restored tropical peatlands. *Mires Peat* 17:1–12.
- Joosten H, ML Tapio-Biström and S Tol. 2012. Peatlands: guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use 2nd edition. FAO and WI, Rome.
- Konecny K, U Ballhorn, P Navratil, J Jubanski, SE Page, K Tansey, A Hooijer, R Vernimmen and F Siegert. 2016. Variable carbon losses from recurrent fires in drained tropical peatlands. *Glob. Change Biol.* 22:1469–1480.
- Limin SH, JO Rieley, HP Ritzema and H Vasander. 2008. Some requirements for restoration of peatland in the former mega rice project in Central Kalimantan, Indonesia: blocking channels, increasing livelihoods and controlling fires. pp. 118–124. In *Restoration of tropical peatlands* (Wösten H, J Rieley and SE Page eds.). Alterra, Wageningen.
- Marlier ME, RS Defries, PS Kim, SN Koplitz, DJ Jacob, LJ Mickley and SS Myers. 2015. Fire emissions and regional air quality impacts from fires in oil palm, timber, and logging concessions in Indonesia. *Environ. Res. Lett.* 10: 085005.
- Medrilzam M, P Dargusch, J Herbohn and C Smith. 2013. The socio-ecological drivers of forest degradation in part of the tropical peatlands of Central Kalimantan, Indonesia. *Forestry* 87:335–345.
- Melling L, KH Chua and KH Lim. 2009. Managing peat soils under oil palm. Available at: http://tropicalpeat.sarawak.gov.my/modules/web/pages.php?mod=download&id=Publication&menu_id=0&sub_id=111 (accessed 8 October 2015).
- Morris PJ, JM Waddington, BW Benschoter and MR Turetsky. 2011. Conceptual frameworks in peatland ecohydrology: looking beyond the two-layered (acrotelm-catotelm) model. *Ecohydrology* 4:1–11.
- Ochi N, M Okada, H Hayashi, H Shimokura and M Kamiya. 2016. Arrangement and structure of weirs on the Kalamangan Canal. pp. 313–325. In *Tropical peatland ecosystems* (Mitsuru O and N Tsuji eds.). Springer, Tokyo.
- Page SE, A Hoscito, H Wösten, J Jauhiainen, M Silvius, J Rieley, H Ritzema, K Tansey, L Graham, H Vasander and S Limin. 2009. Restoration ecology of lowland tropical peatlands in Southeast Asia: current knowledge and future research directions. *Ecosystems* 12:888–905.
- Page SE, JO Rieley and CJ Banks. 2011. Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Glob. Change Biol.* 17:798–818.
- Ritzema H, L Suwido, K Kusin and J Jauhiainen. 2008. Canal blocking strategies to restore hydrology in degraded tropical peatlands in the former Mega Rice Project in Central Kalimantan, Indonesia. International symposium and workshop on tropical Peatlands ‘Peatland development: wise use and impact management’, Kuching.
- Ritzema H, S Limin, K Kusin, J Jauhiainen and H Wösten. 2014. Canal blocking strategies for hydrological restoration of degraded tropical peatlands in Central Kalimantan, Indonesia. *Catena* 114:11–20.
- Setiawan EN, A Maryudi, RH Purwanto and G Lele. 2016. Opposing interests in the legalization of non-procedural forest conversion to oil palm in Central Kalimantan, Indonesia. *Land Use Pol.* 58:472–481.
- Silvius MJ and N Suryadiputra. 2005. Review of policies and practices in tropical peat swamp forest management in Indonesia. WI, Wangeningen.
- Sumarga E, L Hein, A Hooijer and R Vernimmen. 2016. Hydrological and economic effects of oil palm cultivation in Indonesian peatlands. *Ecol. Soc.* 21:52.
- Suryadiputra NN. 2005. A guide to the blocking of canals and ditches in conjunction with the community. WI, Bogor.
- Tacconi L. 2003. Fires in Indonesia: Causes, costs and policy implications. CIFOR, Bogor.
- Uda SK, L Hein and E Sumarga. 2017. Towards sustainable management of Indonesian tropical peatlands. *Wetl. Ecol. Manag.* 25:683–701.
- Varkkey H. 2015. The haze problem in Southeast Asia: palm oil and patronage, Routledge Taylor and Francis Group, London.
- Wilson D, D Blain, J Couwenberg, C Evans, D Murdiyarso, SE Page, F Renou-Wilson, J Rieley, M Strack and E Tuittila. 2016. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires Peat* 17:1–28.

Received: 20 November 2017

Revised: 2 March 2018

Revision accepted: 2 March 2018