

# Melampaui Tebang-dan-Bakar: Peran Aktivitas Manusia, Perubahan Hidrologi dan Bahan Bakar dalam Kebakaran Gambut di Kalimantan Tengah, Indonesia

## Original

Goldstein, J.E., Graham, L., Ansori, S., Vetrita, Y., Thomas, A., Applegate, G., Vayda, A.P., Saharjo, B.H. and Cochrane, M.A. (2020), Beyond slash-and-burn: The roles of human activities, altered hydrology and fuels in peat fires in Central Kalimantan, Indonesia. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 41: 190-208. 10.1111/sjtg.12319

English	Indonesian
<p><b>Abstract</b> Near-annual landscape-scale fires in Indonesia's peatlands have caused severe air pollution, economic losses, and health impacts for millions of Southeast Asia residents. While the extent of fires across the peatland surface has been widely attributed to widespread peatland drainage for plantation agriculture, fires that transition from surface into subsurface soil-based fires are the source of the most dangerous air pollution. Yet the mechanisms by which this transition occurs have rarely been considered, particularly in diversely managed landscapes. Integrating physical geography methods, including active fire scene evaluations and hydrological monitoring, with qualitative methods such as retrospective fire scene evaluations and semi-structured interviews, this article discusses how and why sub-surface peat fire transition occurs in an intensively altered peatland ecosystem in Indonesia's Central Kalimantan province. We demonstrate that variable water table levels and flammable surface vegetation (fire fuels) are co-produced socio-political and biophysical phenomena that enable the conditions in which surface fire is likely to transition into peat fire and increase landscape vulnerability to ongoing, uncontrollable annual fires. This localized understanding of peat fire transition counters normative causal narratives of tropical fire such as 'slash-and-burn', with implications for the management of new fire regimes in inhabited landscapes.</p>	<p><b>Abstrak</b> Hampir tiap tahun terjadi kebakaran skala lanskap lahan gambut di Indonesia, dimana telah menyebabkan polusi udara yang parah, kerugian ekonomi, dan dampak kesehatan bagi jutaan penduduk Asia Tenggara. Sementara luasnya kebakaran di seluruh permukaan lahan gambut telah banyak dikaitkan dengan drainase lahan gambut yang meluas untuk pertanian perkebunan, kebakaran yang bertransisi dari permukaan menjadi kebakaran di bawah permukaan tanah merupakan sumber polusi udara yang paling berbahaya. Namun mekanisme terjadinya transisi ini jarang dipertimbangkan, terutama di lanskap yang dikelola secara beragam. Mengintegrasikan metode geografi fisik, termasuk evaluasi lokasi kebakaran aktif dan pemantauan hidrologi, dengan metode kualitatif seperti evaluasi lokasi kebakaran retrospektif dan wawancara semi-terstruktur, artikel ini membahas bagaimana dan mengapa transisi kebakaran gambut sub-permukaan terjadi dalam ekosistem lahan gambut yang diubah secara intensif di Provinsi Kalimantan Tengah Indonesia. Kami mendemonstrasikan bahwa variabel tingkat permukaan air dan vegetasi permukaan yang mudah terbakar (bahan bakar api) adalah fenomena sosial-politik dan biofisik yang dihasilkan bersama yang memungkinkan kondisi di mana kebakaran permukaan kemungkinan besar akan bertransisi menjadi kebakaran gambut dan meningkatkan kerentanan lanskap terhadap kebakaran tahunan yang terus-menerus dan tidak terkendali. Pemahaman lokal tentang transisi kebakaran gambut melawan narasi kausal normatif dari kebakaran tropis seperti 'tebang-dan-bakar', dengan implikasi pada pengelolaan kebakaran baru di lanskap yang berpenghuni.</p>

## Introduction

One of the major consequences of peatland degradation in Indonesia has been landscape-scale peatland fires, which have resulted in carbon dioxide, carbon monoxide, methane, and other hydrocarbon emissions and noxious regional haze comprised of fine particulates and heavy metals during acute episodes (Page et al. 2009; Hoscilo et al., 2011; Marlier et al., 2013; Graham et al., 2016, Huijnen et al., 2016; Stockwell et al., 2016, Jayarathne et al., 2018, Smith et al., 2018). Whilst fires on the peatland surface spread quickly and widely, it is the fires that transition into the peat soil itself that result in the highest levels of carbon emissions and hazardous airborne particulates (Harrison et al., 2009; Betha et al., 2013, Page & Hooijer, 2016; Hu et al., 2018). Since 1997–98, one of the worst fire seasons in Indonesia's recorded history, peat fires now occur almost annually, although the worst years occur during El Niño-fuelled droughts (Page & Hooijer, 2016; Gavaeu et al., 2016), potentially exacerbated by the phase of the Indian Ocean Dipole (IOD) and local Sea Surface Temperatures (SST) (Kim et al., 2019). From July to November 2015, an El Niño year, fires burned across Sumatra, Indonesian Borneo (Kalimantan), and Papua, causing severe air pollution across Indonesia, Singapore, and portions of Malaysia. The 2015 fires cost Indonesia an estimated US\$16 billion in economic losses (Glauber & Gunawan, 2016) and contributed to over 100 000 premature deaths due to smoke exposure (Koplitiz et al., 2016). Of the 2.6 million hectares of rural Indonesian land that burned in 2015, the area of peatland burned was 8.5 times higher than land with mineral soils, with the highest number of fire hotspots occurring in peatland-rich South Sumatra and Central Kalimantan provinces (Miettinen et al., 2017).

Human activities following drainage canal construction in peatlands often result in extensive forest structural damage or loss and replacement by highly flammable ferns and sedges. Draining peatlands lowers water tables, causing surface peat layers to progressively dry as atmospheric oxygen enters the normally-waterlogged pore spaces. This creates biophysical conditions conducive to both surface and peat fires (Hoscilo et al., 2011; Turetsky et al., 2015; Miettinen et al., 2017). Specific fire occurrence, however, depends on the interaction of biophysical and socio-political factors that create and respond to those conditions. Many of the assumptions by both researchers and government officials about causes of fire ignition in peatlands have focused on agricultural land clearing by smallholders and/or plantation

## Pendahuluan

Salah satu konsekuensi utama dari degradasi lahan gambut di Indonesia adalah kebakaran lahan gambut skala lanskap, yang mengakibatkan emisi karbon dioksida, karbon monoksida, metana, dan emisi hidrokarbon lainnya serta kabut asap berbahaya skala regional yang terdiri dari partikel halus dan logam berat (Page dkk. 2009; Hoscilo dkk., 2011; Marlier dkk., 2013; Graham dkk., 2016, Huijnen dkk., 2016; Stockwell dkk., 2016, Jayarathne dkk., 2018, Smith dkk., 2018). Sementara kebakaran di permukaan lahan gambut menyebar dengan cepat dan luas, namun kebakaran yang bertransisi ke tanah gambut itu sendiri yang menghasilkan emisi karbon tertinggi dan partikulat berbahaya di udara (Harrison et al., 2009; Betha et al., 2013, Halaman & Hooijer, 2016; Hu et al., 2018). Sejak 1997–98, salah satu musim kebakaran terburuk dalam catatan sejarah Indonesia, kebakaran gambut sekarang terjadi hampir setiap tahun, meskipun tahun-tahun terburuk terjadi selama kekeringan yang dipicu oleh El Niño (Page & Hooijer, 2016; Gavaeu et al., 2016), berpotensi diperburuk oleh fase Dipol Samudra Hindia (IOD) dan Suhu Permukaan Laut (SST) lokal (Kim et al., 2019). Dari Juli hingga November 2015, tahun El Niño, kebakaran yang terjadi di Sumatera, Kalimantan, dan Papua, menyebabkan polusi udara yang parah di seluruh Indonesia, Singapura, dan sebagian Malaysia. Kebakaran tahun 2015 merugikan Indonesia sekitar US \$ 16 miliar (Glauber & Gunawan, 2016) dan menyebabkan lebih dari 100.000 kematian dini akibat paparan asap (Koplitiz et al., 2016). Dari 2,6 juta hektar lahan pedesaan Indonesia yang terbakar pada tahun 2015, luas lahan gambut yang terbakar 8,5 kali lebih tinggi daripada lahan dengan tanah mineral, dengan jumlah titik api tertinggi terjadi di provinsi Sumatera Selatan dan Kalimantan Tengah yang kaya lahan gambut (Miettinen et. al., 2017).

Aktivitas manusia setelah pembangunan saluran drainase di lahan gambut sering mengakibatkan kerusakan atau kehilangan struktural hutan yang luas dan penggantian oleh pakis dan sedimen yang sangat mudah terbakar. Pengeringan lahan gambut menurunkan permukaan air, menyebabkan lapisan permukaan gambut semakin kering karena oksigen atmosfer memasuki ruang pori yang biasanya tergenang air. Hal ini menciptakan kondisi biofisik yang memungkinkan terjadinya kebakaran permukaan dan gambut (Hoscilo et al., 2011; Turetsky et al., 2015; Miettinen et al., 2017). Namun, kejadian kebakaran tertentu bergantung pada interaksi faktor biofisik dan sosial politik yang menciptakan dan merespon kondisi tersebut. Banyak asumsi peneliti dan pejabat pemerintah tentang penyebab kebakaran di lahan gambut difokuskan

agribusiness companies. While this has been demonstrated empirically in other areas of Indonesia (Gaveau et al., 2016; Purnomo et al., 2017; Sze & Lee, 2019), we find that the type and location of fire ignitions do not necessarily determine whether a surface fire transitions into a subsurface peat fire, making it difficult to attribute a landscape-scale peat fire to a specific actor or a single land use practice. To challenge normative causal explanations that assume peat fires are the result of only peatland drainage and agricultural land clearing and to empirically investigate the conditions under which peatland surface fires transition into sub-surface peat fires, we contend that an approach that takes biophysical and social factors as variably co-produced within particular sites is necessary (Lave et al., 2018; Ziegler et al., 2013). We argue that surface and sub-surface fire behaviour is the outcome of biophysical factors, particularly temperature and precipitation rates (Field & Shen, 2008; Wooster et al., 2012), and human activities conducted in the area that alter peatland hydrology and the surface vegetation—fire fuels—that act as a conduit for surface fire to transition into sub-surface fire following human-led fire ignitions.

This research was conducted from 2014–16 in an inhabited 120 000 hectare peatland area of Kapuas District in Central Kalimantan province, which constitutes part of the Ex-Mega Rice Project area, with a history of extensive state-led forest clearcutting and canal construction. The peatland has been extensively drained as a result and has experienced near-annual fires since 1997. We use quantitative and qualitative field methods to show how livelihood-related human actions, including but not exclusively agricultural land clearing, lead to fire ignition in the area and how local community-led land use practices that do not engage with fire directly nevertheless affect fire behaviour. Whilst we catalogued all of the livelihood activities in the area that involve fire ignitions, our primary research question focused on the role of human activities and the introduction of drainage canals in altering peatland hydrology and the surface vegetation through which a fire is able to burn and how such changes to the landscape ecology enable surface fire to transition to peat fire. We refer to such landscape alterations as changes to the ‘fire environment’. We highlight two dynamics in this degraded peat landscape that are directly related to peat fire occurrence—water table depth and available fuel load—and discuss the human activities, historical and contemporary, that most impact water table depth and the fire fuels distributed across the landscape. This understanding of peat fire transition from surface to sub-

pada pembukaan lahan pertanian oleh petani kecil dan/atau perusahaan perkebunan. Meskipun hal ini telah dibuktikan secara empiris di daerah lain di Indonesia (Gaveau et al., 2016; Purnomo et al., 2017; Sze & Lee, 2019), kami menemukan bahwa jenis dan lokasi penyulutan api tidak selalu menentukan apakah transisi kebakaran permukaan menyebabkan kebakaran gambut di bawah permukaan, sehingga sulit untuk menghubungkan kebakaran gambut skala lanskap ke aktor tertentu atau praktik penggunaan lahan tunggal. Untuk menantang penjelasan kausal normatif yang mengasumsikan kebakaran gambut adalah hasil dari pengeringan lahan gambut dan pembukaan lahan pertanian dan untuk menyelidiki secara empiris kondisi di mana kebakaran permukaan lahan gambut bertransisi menjadi kebakaran gambut sub-permukaan, kami berpendapat bahwa diperlukan pendekatan yang menggunakan faktor biofisik dan sosial sebagai produksi bersama yang bervariasi dalam situs tertentu (Lave et al., 2018; Ziegler et al., 2013). Kami berpendapat bahwa pola kebakaran permukaan dan sub-permukaan adalah hasil dari faktor biofisik, terutama suhu dan curah hujan (Field & Shen, 2008; Wooster et al., 2012), dan aktivitas manusia yang dilakukan di daerah yang mengubah hidrologi lahan gambut dan vegetasi permukaan — bahan bakar api — yang bertindak sebagai saluran bagi api permukaan untuk bertransisi menjadi api bawah permukaan setelah penyalaan api yang disebabkan oleh manusia.

Penelitian ini dilakukan dari tahun 2014–2016 di area lahan gambut seluas 120.000 hektar yang berpenghuni di Kabupaten Kapuas di Provinsi Kalimantan Tengah, yang merupakan bagian dari kawasan Ex-Mega Rice Project, dengan sejarah penebangan hutan dan pembangunan kanal yang dilakukan oleh pemerintah secara ekstensif. Akibatnya, lahan gambut telah dikeringkan secara ekstensif dan mengalami kebakaran hampir tahunan sejak tahun 1997. Kami menggunakan metode kuantitatif dan kualitatif untuk menunjukkan bagaimana tindakan manusia yang terkait dengan mata pencaharian, termasuk tetapi tidak hanya pembukaan lahan pertanian, menyebabkan kebakaran di daerah tersebut dan bagaimana praktik penggunaan lahan yang dilakukan oleh masyarakat lokal yang tidak terlibat dengan api secara langsung mempengaruhi kejadian kebakaran. Sementara kami membuat katalog semua kegiatan mata pencaharian di daerah yang melibatkan penyulutan api, pertanyaan penelitian utama kami berfokus pada peran aktivitas manusia dan pengenalan saluran drainase dalam mengubah hidrologi lahan gambut dan vegetasi permukaan tempat api dapat membakar

<p>surface counters normative causal narratives of tropical fire such as 'slash-and-burn', with implications for the introduction of new fire management regimes in inhabited peatland landscapes.</p>	<p>dan bagaimana perubahan pada lanskap ekologi memungkinkan kebakaran permukaan bertransisi menjadi kebakaran gambut. Kami menyebut perubahan lanskap seperti perubahan pada 'lingkungan kebakaran'. Kami menyoroti dua dinamika dalam lanskap gambut yang terdegradasi ini yang secara langsung terkait dengan kejadian kebakaran gambut – kedalaman muka air tanah dan keberadaan bahan bakar – dan membahas aktivitas manusia, historis dan kontemporer, yang paling mempengaruhi kedalaman muka air tanah dan bahan bakar api yang tersebar di seluruh lanskap. Pemahaman tentang transisi kebakaran gambut dari permukaan ke bawah permukaan melawan narasi kausal normatif dari kebakaran tropis seperti 'tebang-dan-bakar', dengan implikasi untuk pengenalan pengelolaan kebakaran baru di lanskap lahan gambut yang berpenghuni.</p>
<p><b>Human and physical dimensions of fire in tropical peat landscapes</b>  Research on and policy responses to peat fire has tended to focus on locations of and actors involved in fire ignitions and the institutional causes of fire ignition, including forest and fire mis-management by local land users, landholders, and/or government officials (Byron &amp; Shepherd, 1998; Bompard &amp; Guizol, 1999; Barber &amp; Schweithelm, 2000; Yulianti &amp; Hayasaka, 2013; Carmenta et al., 2017). Within such research, the predominant reason for igniting fires in Indonesia's peatlands is often tied to large-scale land clearing for oil palm and acacia plantations, whether by smallholders or plantation companies (Taufik et al., 2019; Cattau et al., 2016; Page &amp; Hooijer, 2016; Field et al., 2015). Referred to as slash-and-burn practice, fire in these contexts is an inexpensive way to clear fast-growing vegetation ahead of crop planting and provide ash-based nutrients to nutrient-poor peat soils (Chokkalingam et al., 2005; Page &amp; Hooijer, 2016; Goldstein, 2020). Slash-and-burn is distinctive from traditional swidden, or shifting, cultivation systems in which controlled fire is used to clear small plots of land for agriculture and return nutrients to the soil before allowing forest cover to regenerate in multi-year cycles. While true swidden cultivation involving forest regeneration is now rare in Indonesia's peatlands, slash-and-burn has become widespread as peatlands and other forested areas are converted to plantation crops. It has also become an overly broad description, however, applied to any fire ignitions that burn vegetation, often with connotations of reckless land management (Tacconi &amp; Vayda, 2006).</p> <p>Fire use in peatlands has also been attributed to local livelihood activities,</p>	<p><b>Dimensi manusia dan fisik kebakaran di lanskap gambut tropis</b>  Penelitian dan respon kebijakan terhadap kebakaran gambut cenderung berfokus pada lokasi dan aktor yang terlibat dalam penyalaan api dan penyebab kelembagaan kebakaran, termasuk kesalahan pengelolaan hutan dan kebakaran oleh pengguna lahan lokal, pemilik lahan, dan/atau pejabat pemerintah (Byron &amp; Shepherd, 1998; Bompard &amp; Guizol, 1999; Barber &amp; Schweithelm, 2000; Yulianti &amp; Hayasaka, 2013; Carmenta et al., 2017). Dalam penelitian semacam itu, alasan utama terjadinya kebakaran di lahan gambut Indonesia seringkali terkait dengan pembukaan lahan skala besar untuk perkebunan kelapa sawit dan akasia, baik oleh petani kecil atau perusahaan perkebunan (Taufik et al., 2019; Cattau et al., 2016; Page &amp; Hooijer, 2016; Field dkk., 2015). Disebut sebagai praktik tebang-dan-bakar, api dalam konteks ini adalah cara yang murah untuk membersihkan vegetasi yang tumbuh cepat sebelum penanaman tanaman dan memberikan nutrisi dari abu ke tanah gambut yang miskin nutrisi (Chokkalingam et al., 2005; Halaman &amp; Hooijer, 2016; Goldstein, 2020). Tebang-dan-bakar berbeda dari sistem perladangan berpindah atau berpindah-pindah tradisional di mana api yang dapat dikendalikan digunakan untuk membersihkan petak kecil lahan untuk pertanian dan mengembalikan nutrisi ke tanah sebelum membiarkan tutupan hutan beregenerasi dalam siklus multi-tahun. Sementara perladangan berpindah yang benar-benar melibatkan regenerasi hutan sekarang jarang terjadi di lahan gambut Indonesia, tebang-dan-bakar telah meluas karena lahan gambut, dan kawasan hutan lainnya diubah menjadi tanaman perkebunan. Ini juga menjadi deskripsi yang terlalu luas, namun, diterapkan pada penyulutan api yang membakar vegetasi, seringkali dengan konotasi</p>

such as using it to clear vegetation to create inland fish ponds and stimulate nutrient accumulation for fish (Chokkalingam et al., 2005; Thornton et al., 2018) and for forest-based hunting activities (Tacconi & Vayda, 2006). Within the social sciences, however, recent studies have advanced understanding of the complex social, political, and economic dynamics underpinning peat fire occurrence in Indonesia. Purnomo et al. (2017) argue that using fire to clear land in Sumatra's peatlands raises land values for networks of local elites, disincentivizing fire prevention and fire-fighting. Gaveau et al. (2016) found that in Sumatra, fires in and around oil palm and pulpwood plantation concessions were attributed to grievances over land claims by independent farmers inside concessions and plantation companies illegally claiming land by using fire beyond concession boundaries. In Central Kalimantan province, Medrilzam et al. (2014) show how, amid declining livelihood opportunities, rent-seeking activities have been pushed deeper into forested peatland areas amid fluctuating commodity crop prices and increasing road and canal access, leading to peatland degradation from villagers' agricultural activities alongside physical factors such as rainfall patterns, increasing fire ignitions and wildfire risk in vulnerable dry areas.

Despite the fact that fires in tropical peatlands occur primarily within landscapes that have been profoundly altered by human activities, few existing studies have attempted to understand the relationships between the co-produced social and biophysical dynamics of peat fires in situ. While there have been calls for inter-disciplinary tropical fire research that spans the social and natural sciences (Dennis et al., 2005; Vayda, 2006; Carmenta et al., 2011; Roos et al., 2014), doing this in the field remains practically and epistemologically challenging. Research on peat fires has typically been bifurcated into social science studies, which focus on human-led ignition sources of burning such as land clearing for smallholder and plantation agriculture, and biophysical studies, which emphasize greenhouse gas and aerosol emissions rates, smoke chemistry composition, and frequency, location, and/or extent of fires (Atwood et al., 2016; Cattau et al., 2016; Stockwell et al., 2016; Konecny et al., 2016; Jayarathne et al., 2018). The latter employs remote sensing and satellite imagery to detect fire hotspots, with practical limitations on extensive ground-based research. While such studies are helpful in understanding broad trends affecting distribution of surface fires on peatlands across landscapes, in themselves, they reveal little about why and how some surface fires transition into landscape-scale peat fires and

pengelolaan lahan yang sembrono (Tacconi & Vayda, 2006).

Penggunaan api di lahan gambut juga dikaitkan dengan kegiatan mata pencaharian lokal, seperti menggunakannya untuk membersihkan vegetasi untuk membuat kolam ikan di pedalaman dan merangsang akumulasi nutrisi untuk ikan (Chokkalingam et al., 2005; Thornton et al., 2018) dan untuk kegiatan berburu di hutan (Tacconi & Vayda, 2006). Namun, dalam ilmu sosial, studi terbaru memiliki pemahaman lanjutan tentang dinamika sosial, politik, dan ekonomi yang kompleks yang mendasari terjadinya kebakaran gambut di Indonesia. Purnomo dkk. (2017) berpendapat bahwa penggunaan api untuk membuka lahan di lahan gambut Sumatera meningkatkan nilai lahan untuk jaringan elit lokal, melemahkan pencegahan kebakaran, dan pemadaman kebakaran. Gaveau dkk. (2016) menemukan bahwa di Sumatera, kebakaran di dalam dan sekitar konsesi perkebunan kelapa sawit dan kayu pulp disebabkan oleh keluhan atas klaim lahan oleh petani mandiri di dalam konsesi dan perusahaan perkebunan yang mengklaim lahan secara ilegal dengan menggunakan api di luar batas konsesi. Di provinsi Kalimantan Tengah, Medrilzam et al. (2014) menunjukkan bagaimana di tengah menurunnya peluang mata pencaharian, aktivitas pencarian rente telah didorong lebih dalam ke kawasan hutan gambut di tengah fluktuasi harga komoditas tanaman dan meningkatnya akses jalan dan kanal, yang menyebabkan degradasi lahan gambut dari kegiatan pertanian penduduk desa di samping faktor fisik seperti pola curah hujan yang meningkatkan penyalaan api dan risiko kebakaran di daerah kering.

Terlepas dari kenyataan bahwa kebakaran di lahan gambut tropis terjadi terutama di dalam lanskap yang telah sangat berubah akibat aktivitas manusia, beberapa penelitian yang ada telah mencoba untuk memahami hubungan antara dinamika sosial dan biofisik kebakaran gambut yang diproduksi bersama di lokasi. Meskipun ada seruan untuk penelitian kebakaran tropis lintas disiplin yang mencakup ilmu sosial dan alam (Dennis et al., 2005; Vayda, 2006; Carmenta et al., 2011; Roos et al., 2014), melakukan ini di lapangan tetap menantang secara praktis dan epistemologis. Penelitian tentang kebakaran gambut biasanya bercabang menjadi studi ilmu sosial, yang berfokus pada sumber pembakaran yang dilakukan oleh manusia seperti pembukaan lahan untuk pertanian rakyat dan perkebunan, dan studi biofisik, yang menekankan tingkat emisi gas rumah kaca dan aerosol, komposisi kimia asap, dan frekuensi, lokasi, dan/atau luas kebakaran (Atwood et al., 2016;

<p>others do not.</p>	<p>Cattau et al., 2016; Stockwell et al., 2016; Konecny et al., 2016; Jayarathne et al., 2018). Yang terakhir menggunakan penginderaan jauh dan citra satelit untuk mendeteksi titik api, dengan batasan praktis pada penelitian ekstensif di darat. Meskipun studi tersebut sangat membantu dalam memahami tren yang memengaruhi distribusi kebakaran permukaan di lahan gambut di seluruh lanskap, studi tersebut hanya sedikit mengungkapkan tentang mengapa dan bagaimana beberapa kebakaran permukaan bertransisi menjadi kebakaran gambut skala lanskap dan lainnya tidak.</p>
<p><b>Tropical peat landscape vulnerability to fire</b>  Peat is a soil layer comprised of partially decomposed organic matter, covering less than 3 per cent of the Earth's surface but containing approximately one third of global soil carbon (Dargie et al., 2017). Indonesia has approximately 50 per cent of the world's tropical peatlands, which cover roughly 22 million hectares and are distributed across the islands of Sumatra, Indonesian Borneo (Kalimantan), and Papua (Page et al., 2011). Indonesia's peatland ecosystems store up to 69 Gt of carbon below ground, of the approximately 105 Gt stored in tropical peatlands across Southeast Asia, Central Africa, and the Western Amazon (Page et al., 2011, Dargie et al., 2017). Peat depth varies greatly across locations, ranging from less than three meters deep (shallow peat) to over 12 m deep. Many tropical peatland ecosystems are ombrogenous, or exclusively rain-fed, and form as peat domes between two rivers in which the peat layer is shallowest closer to the rivers and deepest at the midpoint between the rivers (Page &amp; Hooijer, 2016). Due to the water-retentive nature of peat in an intact tropical peat swamp forest, the water table rarely drops more than 40 cm below the surface under historically normal conditions (Rieley &amp; Page, 2005; Wösten et al., 2008).</p> <p>Under historically normal conditions, peat swamp forests are water-logged ecosystems and thus resist fire under most circumstances (Graham et al., 2016; Rieley &amp; Page, 2005)[1]. When peatlands are drained for agribusiness plantations via mechanically dug canals, the carbon-rich soil dries out and becomes flammable. Sources of peatland fire ignition are anthropogenic, as there is little evidence that lightning or other environmental conditions ignite peat fires in tropical peatlands without human involvement (Harrison et al., 2009; Cole et al., 2015). Furthermore, fires in tropical peatlands are actually two distinct phenomena: fires that burn the fuel available on the peatland surface—surface fires—and fires that burn through the sub-surface and</p>	<p><b>Kerentanan lanskap gambut tropis terhadap kebakaran</b>  Gambut adalah lapisan tanah yang terdiri dari bahan organik yang sebagiannya terdekomposisi, menutupi kurang dari 3 persen permukaan bumi tetapi mengandung sekitar sepertiga dari karbon tanah global (Dargie et al., 2017). Indonesia memiliki sekitar 50 persen dari lahan gambut tropis dunia, yang mencakup sekitar 22 juta hektar dan tersebar di pulau Sumatra, Kalimantan (Kalimantan), dan Papua (Page et al., 2011). Ekosistem lahan gambut Indonesia menyimpan hingga 69 gigaton karbon di bawah tanah, dari sekitar 105 gigaton yang tersimpan di lahan gambut tropis di Asia Tenggara, Afrika Tengah, dan Amazon Barat (Page et al., 2011, Dargie et al., 2017). Kedalaman gambut sangat bervariasi di setiap lokasi, mulai dari kedalaman kurang dari tiga meter (gambut dangkal) hingga lebih dari 12 m. Banyak ekosistem lahan gambut tropis bersifat ombrogenous, atau secara eksklusif tadah hujan, dan berbentuk kubah gambut di antara dua sungai di mana lapisan gambut paling dekat ke sungai dan paling dalam di titik tengah antara sungai (Page &amp; Hooijer, 2016). Karena sifat gambut yang tahan air di hutan rawa gambut tropis yang utuh, muka air tanah jarang turun lebih dari 40 cm di bawah permukaan dalam kondisi normal (Rieley &amp; Page, 2005; Wösten et al., 2008).</p> <p>Dalam kondisi normal, hutan rawa gambut adalah ekosistem yang tergenang air dan dengan demikian tahan api dalam banyak situasi (Graham et al., 2016; Rieley &amp; Page, 2005)[1]. Ketika lahan gambut dikeringkan untuk perkebunan agribisnis melalui saluran yang digali secara mekanis, karbon tanah yang subur mengering dan mudah terbakar. Sumber penyulut kebakaran lahan gambut bersifat antropogenik, karena hanya ada sedikit bukti bahwa petir atau kondisi lingkungan lainnya yang menyulut kebakaran gambut di lahan gambut tropis tanpa keterlibatan manusia (Harrison et al., 2009; Cole et al., 2015). Selain itu, kebakaran di lahan gambut tropis sebenarnya merupakan dua</p>

<p>transition into the peat soil itself, or peat fires. If biophysical conditions include low peat moisture content and water table depth, high and heavy fuel load on the surface, and high air temperature and wind speed, burning surface vegetation can ignite the peat soil. Smouldering peat soil can subsequently re-ignite surface vegetation (Usup et al., 2004; Huang et al., 2016), allowing fires to spread both above and below the surface.</p> <p>Across Peninsular Malaysia, Sumatra, and Borneo, 50 per cent of the region's peatlands are managed by smallholders or industrial plantation companies. Only 6 per cent of peatlands are considered to be unaffected by drainage (Miettinen et al., 2016). Draining the peat has three benefits to land users: first, the canals are used to access previously inaccessible deep peat areas; second, the water table drops, allowing cultivation of flood intolerant species including oil palm, fast-growing acacia and food crops; and three, previously waterlogged and locked nutrients are released from the drained upper-surface of the peat and available for crop uptake (Page &amp; Hooijer, 2016; Rieley &amp; Page, 2005; Wösten &amp; Ritzema, 2002). The lowered water table depth also has implications beyond the immediate drainage canals. The drained peat loses structure, making falling native trees more common, increasing available surface fuel loads in remaining intact forest areas (Graham et al., 2016). These combined factors result in a high risk of fire in degraded peatlands.</p>	<p>fenomena yang berbeda: kebakaran yang membakar bahan bakar yang tersedia di permukaan lahan gambut – kebakaran di permukaan – dan kebakaran yang membakar di bawah permukaan dan bertransisi ke dalam tanah gambut itu sendiri, atau kebakaran gambut. Jika kondisi biofisik meliputi kadar air gambut dan kedalaman muka air tanah yang rendah, beban bahan bakar yang tinggi dan berat di permukaan, serta suhu udara dan kecepatan angin yang tinggi, vegetasi permukaan yang terbakar dapat menyulut tanah gambut. Tanah gambut yang membara selanjutnya dapat menyalakan kembali vegetasi permukaan (Usup et al., 2004; Huang et al., 2016), memungkinkan api menyebar baik di atas maupun di bawah permukaan.</p> <p>Di seluruh Semenanjung Malaysia, Sumatera, dan Kalimantan, 50 persen lahan gambut di kawasan ini dikelola oleh petani kecil atau perusahaan industri perkebunan. Hanya 6 persen dari lahan gambut yang dianggap tidak terpengaruh oleh drainase (Miettinen et al., 2016). Mengeringkan gambut memiliki tiga manfaat bagi pengguna lahan: pertama, kanal digunakan untuk mengakses area gambut dalam yang sebelumnya tidak dapat diakses; kedua, permukaan air turun, memungkinkan budidaya spesies yang tidak tahan banjir termasuk kelapa sawit, akasia yang tumbuh cepat dan tanaman pangan; dan tiga, unsur hara yang sebelumnya tergenang air dan terkunci dilepaskan dari permukaan atas gambut yang dikeringkan dan tersedia untuk serapan tanaman (Page &amp; Hooijer, 2016; Rieley &amp; Page, 2005; Wösten &amp; Ritzema, 2002). Kedalaman muka air tanah yang lebih rendah juga memiliki implikasi di luar saluran drainase langsung. Gambut yang dikeringkan kehilangan strukturnya, membuat pohon asli yang tumbang menjadi lebih umum, meningkatkan ketersediaan bahan bakar permukaan di kawasan hutan utuh yang tersisa (Graham et al., 2016). Kombinasi faktor-faktor ini menyebabkan risiko kebakaran yang tinggi di lahan gambut yang terdegradasi.</p>
<p><b>Research site</b> This research was conducted in the Central Kalimantan province of Indonesia on the island of Borneo. The study site is located between the Kapuas and Barito rivers, with the Mantangai River bisecting the peat dome down its centre. The Borneo Orangutan Survival Foundation (BOSF) currently assists the Provincial and District Governments to manage this area as a designated Protected Forest. From 1996 to 1998, former President Suharto ordered conversion of one million hectares of peatland stretching across the Kapuas</p>	<p><b>Lokasi penelitian</b> Penelitian ini dilakukan di provinsi Kalimantan Tengah di Indonesia di Pulau Kalimantan. Lokasi studi terletak di antara Sungai Kapuas dan Sungai Barito, dengan Sungai Mantangai membelah kubah gambut di bagian tengahnya. Borneo Orangutan Survival Foundation (BOSF) saat ini membantu Pemerintah Provinsi dan Kabupaten untuk mengelola areal yang kawasannya ditetapkan sebagai Hutan Lindung. Dari tahun 1996 hingga 1998, mantan Presiden Soeharto memerintahkan konversi satu juta hektar lahan gambut yang</p>

and Barito rivers into wet rice paddy to help meet the country's food self-sufficiency goals. This 'Mega Rice Project' (MRP) scheme is widely accepted as a major environmental disaster for having produced little rice and severely altering the peatland's hydrology through extensive drainage canal construction (Goldstein, 2016). Excavator-dug canals totalling 4600 km in length throughout the peat dome in the late 1990s dried out the upper portions of the peat soil, enabling it to burn, undergo microbial oxidation, and subside, which in turn has reduced the total peat depth throughout the site over the past 20+ years. The MRP's largest east-west canal forms the northern border of our study site, with a grid of hundreds of kilometres of secondary and tertiary canals extending to the south. To the north of the major east-west canal, the forest is intact but selectively logged, with numerous small hand-dug canals that are used to retrieve logs and fire encroaching on its perimeter. Area inhabitants also use the primary and secondary canals for transit to agricultural plots and forest fragments for livelihood activities. Within an approximate two kilometre radius of the Kapuas river, the peat soil is shallow (0–2 m), with sufficient soil fertility to be cultivated for agriculture. Farther towards the centre of the peat dome, the peat soil becomes deeper (up to 12 m) and is less suitable for crop cultivation.

Of the five river-based village settlements considered within this study, population size ranged from 822 to 1792 residents and population density ranged from 1 to 12 residents per km<sup>2</sup> (Diprose, 2013). Most village inhabitants identify as indigenous Dayak, though there are some ethnically Banjar and Javanese who have inter-married with Dayaks. Based on a 2014 survey in three of the five villages, the dominant rent-generating livelihood was rubber tree cultivation, comprising 44 per cent (averaged across 3 villages, SD = 6 per cent) of residents' primary livelihood[2]. Other smallholder agriculture (food and non-food) and fishing made up just 7 per cent on average, while forest product extraction (timber and non-timber) made up 10 per cent and gold and sand mining made up 9 per cent. Because of the depth of peat throughout most of the area, company-managed oil palm plantations have remained at less than 100 hectares and are located within two kilometres of the Kapuas River (Figure 1). Few local residents work for the oil palm companies operating in the area.

The study site had extensive fires during the 2015 fire season. The total areas burned in 2014 and 2015 in the Mawas area was 11 101 ha and 30 179 ha

membentang di sungai Kapuas dan Barito menjadi sawah basah untuk membantu memenuhi tujuan swasembada pangan negara. Skema 'Mega Rice Project' (MRP) ini diterima secara luas sebagai bencana lingkungan yang besar karena hanya menghasilkan sedikit beras dan sangat mengubah hidrologi lahan gambut melalui pembangunan saluran drainase yang ekstensif (Goldstein, 2016). Kanal-kanal yang digali eskavator dengan total panjang 4600 km di seluruh kubah gambut pada akhir 1990-an mengeringkan bagian atas tanah gambut, memungkinkannya terbakar, mengalami oksidasi mikroba, dan surut, yang pada gilirannya telah mengurangi total kedalaman gambut di seluruh situs selama kurang lebih 20 tahun terakhir. Kanal timur-barat terbesar di MRP membentuk batas utara lokasi studi kami, dengan kisi kanal sekunder dan tersier sepanjang ratusan kilometer membentang ke selatan. Di sebelah utara kanal utama timur-barat, hutan masih utuh tetapi ditebang secara selektif, dengan banyak kanal kecil yang digali dengan tangan yang digunakan untuk mengambil kayu gelondongan dan api yang merambah di sekelilingnya. Penduduk setempat juga menggunakan kanal primer dan sekunder untuk transit ke petak pertanian dan fragmen hutan untuk aktivitas mata pencaharian. Dalam radius sekitar dua kilometer dari Sungai Kapuas, tanah gambut dangkal (0–2 m), dengan kesuburan tanah yang cukup untuk dibudidayakan untuk pertanian. Semakin jauh ke tengah kubah gambut, tanah gambut menjadi lebih dalam (hingga 12 m) dan kurang cocok untuk budidaya tanaman.

Terdapat lima pemukiman desa berbasis sungai yang dijadikan lokasi dalam penelitian ini, jumlah penduduk berkisar antara 822 sampai 1792 jiwa dan kepadatan penduduk berkisar antara 1 sampai 12 penduduk per km<sup>2</sup> (Diprose, 2013). Sebagian besar penduduk desa adalah orang Dayak asli, meskipun ada beberapa etnis Banjar dan Jawa yang kawin dengan Dayak. Berdasarkan survei tahun 2014 di tiga dari lima desa, mata pencaharian yang menghasilkan rente dominan adalah penanaman pohon karet, yang merupakan 44 persen (rata-rata di 3 desa, SD=6 persen) dari mata pencaharian utama penduduk[2]. Pertanian skala kecil lainnya (pangan dan non-makanan) dan penangkapan ikan rata-rata hanya mencapai 7 persen, sedangkan ekstraksi hasil hutan (kayu dan non-kayu) mencapai 10 persen dan penambangan emas dan pasir mencapai 9 persen. Karena kedalaman gambut di sebagian besar wilayah, perkebunan kelapa sawit yang dikelola perusahaan masih kurang dari 100 hektar dan terletak dalam jarak dua kilometer dari Sungai Kapuas (Gambar 1). Beberapa penduduk lokal bekerja di perusahaan kelapa sawit yang beroperasi



respectively, or over 62.6 per cent and 23.0 per cent of the 48 191 ha study area was burned, as compared to 3188 ha and no detectable areas in 2013 and 2016 respectively (Figure 2). Equally, based on analysis provided by the Global Fire Emissions Database (for complete methods and analysis approach, see van der Werf et al., 2017), the integer smoke particulate levels (PM 2.5) through the dry season months (August to November) in 2014 and 2015 over the study site area were 60 720 and 59 024 respectively, as compared to PM 2.5 of 2272 and 7 in 2013 and 2016[3]. These latter data can be used as a proxy of volume of peat burned, showing that in 2014 and 2015 not only did a large extent of land burn but that considerable volumes of peat also burned[4].

di daerah tersebut.

Lokasi penelitian mengalami kebakaran ekstensif selama musim kebakaran 2015. Total areal yang terbakar pada tahun 2014 dan 2015 di areal Mawas masing-masing adalah 11.110 ha dan 30.179 ha, atau lebih dari 62.6 persen dan 23.0 persen dari 48.191 ha areal studi yang terbakar, dibandingkan dengan 3.181 ha dan tidak ada areal yang terdeteksi pada 2013 dan 2016 (Gambar 2). Demikian pula, berdasarkan analisis yang diberikan oleh Global Fire Emissions Database (untuk metode lengkap dan pendekatan analisis, lihat van der Werf et al., 2017), tingkat partikulat asap bilangan bulat (PM 2.5) selama bulan-bulan musim kemarau (Agustus hingga November) pada tahun 2014 dan 2015 di atas areal lokasi studi masing-masing adalah 60.720 dan 59.024, dibandingkan dengan PM 2.5 dari 2272 dan 7 pada tahun 2013 dan 2016[3]. Data terakhir ini dapat digunakan sebagai proksi dari volume gambut yang terbakar, menunjukkan bahwa di Tahun 2014 dan 2015 tidak hanya sebagian besar lahan terbakar tetapi juga sejumlah besar gambut yang terbakar[4].

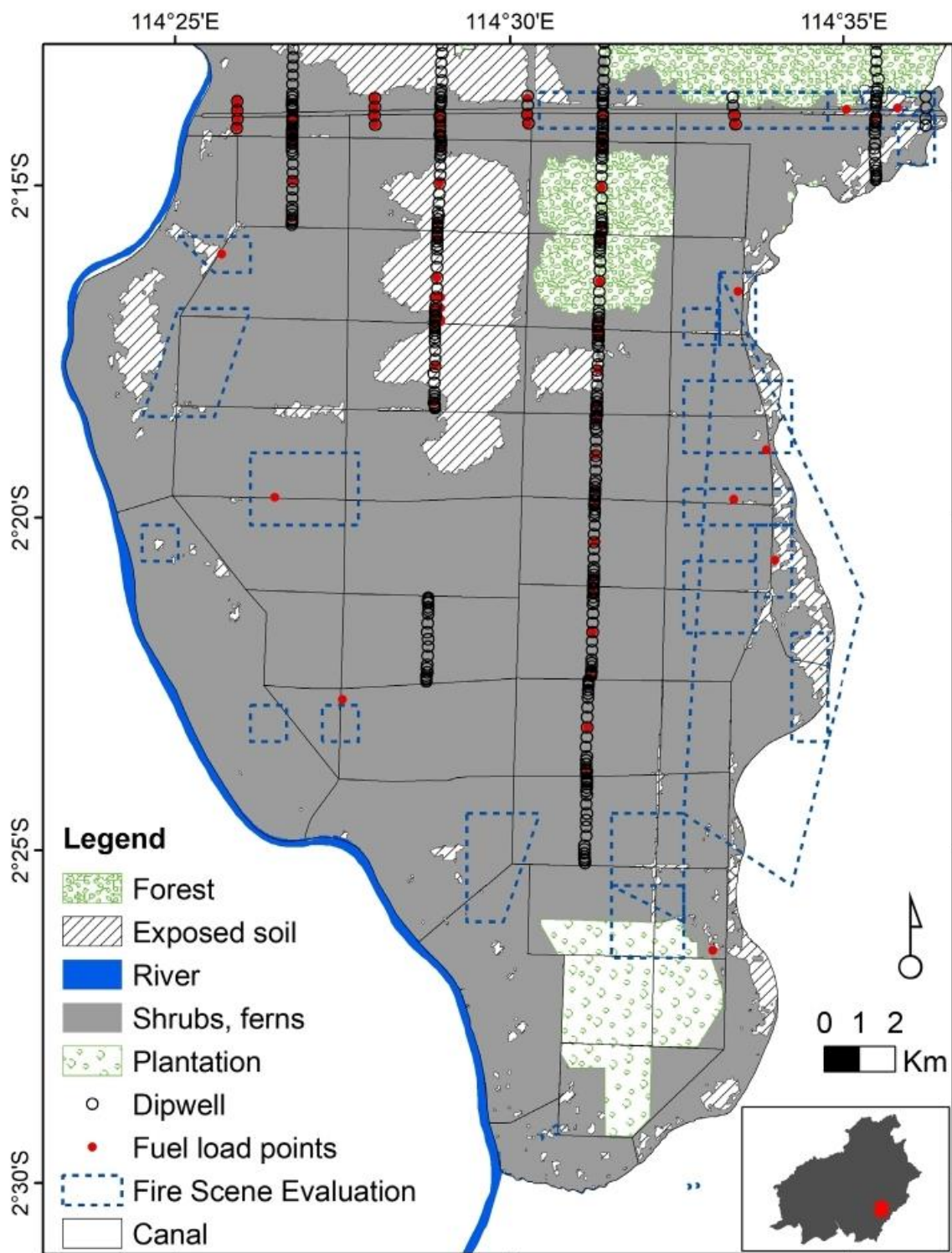


Figure 1. Fieldwork Research Site (48 190 ha, equal to 15 per cent of Block A of the ex-Mega Rice Project), Central Kalimantan, Indonesia. Map indicates current land cover derived from Landsat 8 image (August 2016), location of hydrology monitoring points (dipwells), fuel load monitoring points, and location of FSEs conducted during 2014–2016. Inset: Central Kalimantan Province, red dot is the study area. Source: Figure drawn based on authors' primary data.

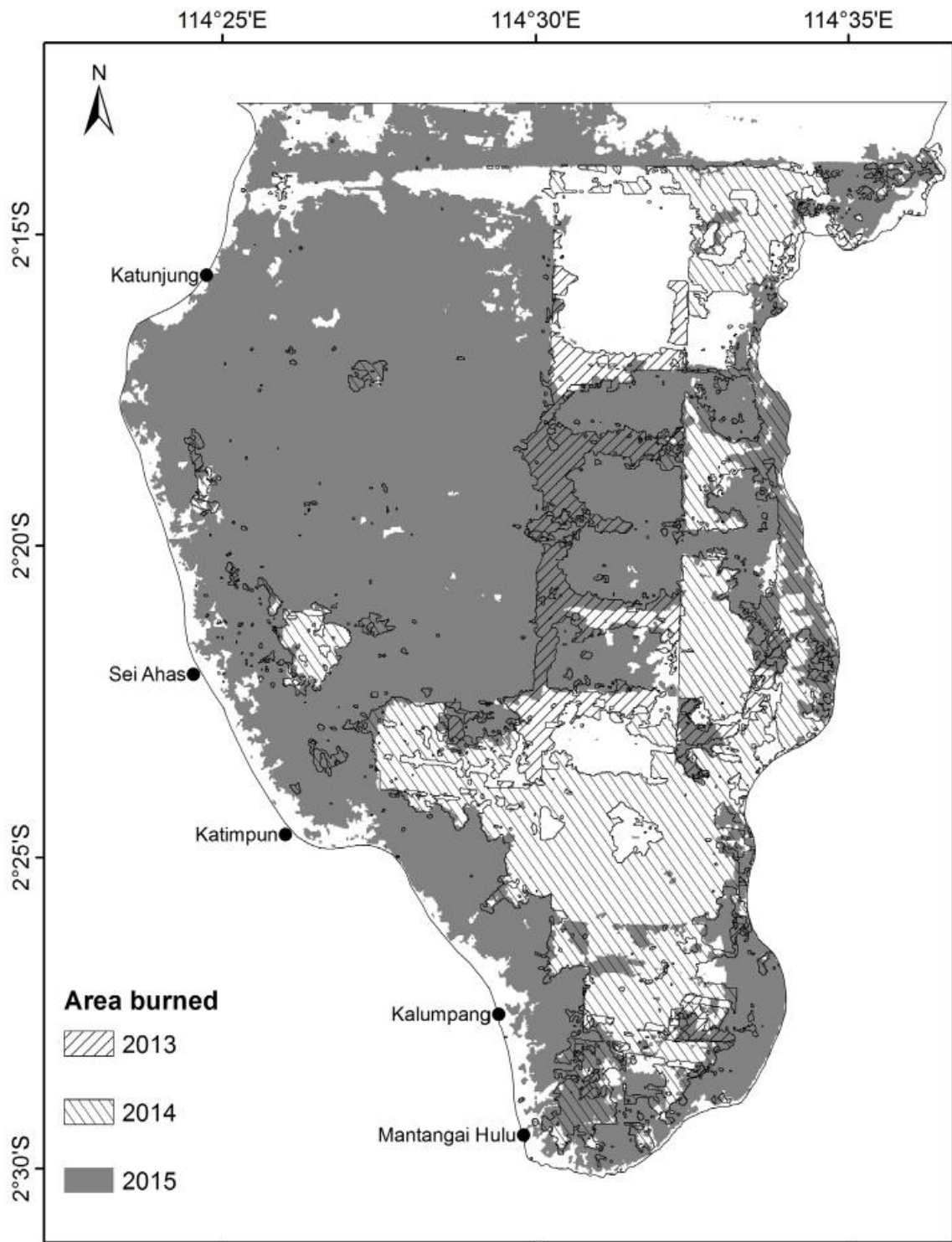


Figure 2. Map of study site indicating peat surface area burned in 2013, 2014, and 2015. Much of the area burned in 2014 likely had insufficient surface fire fuels to burn extensively in 2015, despite the latter year having drier surface conditions and a larger number of fire hotspots. Source: (Vetrita & Cochrane, 2019).

## Methods

During Central Kalimantan's fire season (August to November) in 2014–16, a multidisciplinary project team developed a Fire Scene Evaluation (FSE) manual and a 69-question form to collect data in the field on biophysical factors such as weather and environmental conditions, area burnt, and fuel and peat fire characteristics (Graham et al., 2016, Applegate et al., 2017). In 2014, 2015 and 2016 a total of 26 FSEs were conducted on active or recently extinguished fires. To support the FSE data, water table depth and fuel data were also collected. Water table depths were collected at all FSE sites, and fuel loads were collected at 14 FSE sites during this period (fuel loads were recorded at locations immediately adjacent to the fire site to represent the volume of fuel pre-burn). In addition, there were 300 dipwells spread across the area covering 60 km of transects, recording water table depths during peak wet and dry seasons, to allow creation of a hydrology model at a landscape scale. The hydrology monitoring methodology and protocols were developed by the Kalimantan Forest and Climate Partnership (Ichsan et al., 2014). Light, medium, and heavy fuel load data were additionally collected in the form of fuel load triangular transects at locations following the hydrological monitoring, and up to one km from each of the five villages (Wagner, 1982; Graham et al., 2014a) in 2011 and 2014.

In addition to the FSEs conducted during three active fire seasons, qualitative research in the five communities was undertaken involving 32 semi-structured interviews and seven retrospective and/or active fire scene investigations in 2015 and 2016. Retrospective FSEs entailed visiting sites where fires had occurred in 2014 and 2015 with members of the project team who had conducted active FSEs. By conducting open-ended, semi-structured interviews with members of the project team at the sites of previous fires, the social science members of the project were able to gather qualitative data that had not been included in the FSE, such as histories of land use and tenure in the area, histories of previous fire occurrences and probable causes, and observed and/or probable activities that had occurred in the vicinity at the time of the fire. Particular attention was paid to questioning the social rationale, if available, for observed biophysical factors that may have encouraged surface to sub-surface peat fire transition. In two instances in 2016, social scientists observed active fires with visible evidence of where and how the fires had been started. Semi-structured interviews were also

## Metode

Selama musim kebakaran Kalimantan Tengah (Agustus hingga November) pada 2014-2016, tim proyek multidisiplin mengembangkan panduan Fire Scene Evaluation (FSE) dan formulir 69 pertanyaan untuk mengumpulkan data di lapangan tentang faktor biofisik seperti cuaca dan kondisi lingkungan, area yang terbakar, dan karakteristik kebakaran bahan bakar dan gambut (Graham et al., 2016, Applegate et al., 2017). Pada tahun 2014, 2015 dan 2016 total 26 FSE telah dilakukan pada kebakaran aktif atau yang baru saja padam. Untuk mendukung data FSE, dilakukan pengumpulan data kedalaman muka air tanah dan data bahan bakar. Kedalaman muka air tanah dikumpulkan di semua lokasi FSE, dan beban bahan bakar dikumpulkan di 14 lokasi FSE selama periode ini (beban bahan bakar dicatat di lokasi yang berbatasan langsung dengan lokasi kebakaran untuk mewakili volume bahan bakar sebelum kebakaran). Selain itu, terdapat 300 sumur bor yang tersebar di wilayah yang mencakup transek 60 km, mencatat kedalaman muka air tanah selama puncak musim hujan dan kemarau, untuk memungkinkan pembuatan model hidrologi pada skala lanskap. Metodologi dan protokol pemantauan hidrologi dikembangkan oleh Kalimantan Forest and Climate Partnership (Ichsan et al., 2014). Data beban bahan bakar ringan, sedang, dan berat dikumpulkan sebagai tambahan dalam bentuk transek segitiga muatan bahan bakar di lokasi setelah pemantauan hidrologi, dan hingga satu km masing-masing dari lima desa (Wagner, 1982; Graham et al., 2014a) pada tahun 2011 dan 2014.

Selain FSE yang dilakukan selama tiga musim kebakaran aktif, penelitian kualitatif di lima komunitas dilakukan dengan melibatkan 32 wawancara semi-terstruktur dan tujuh investigasi lokasi kebakaran retrospektif dan/atau aktif pada tahun 2015 dan 2016. FSE retrospektif mencakup kunjungan ke lokasi di mana kebakaran telah terjadi pada tahun 2014 dan 2015 dengan anggota tim proyek yang telah melaksanakan FSE secara aktif. Dengan melakukan wawancara terbuka dan semi-terstruktur dengan anggota tim proyek di lokasi kebakaran sebelumnya, anggota ilmu sosial proyek dapat mengumpulkan data kualitatif yang belum dimasukkan dalam FSE, seperti sejarah penggunaan lahan dan kepemilikan di kawasan tersebut, sejarah kejadian kebakaran sebelumnya dan kemungkinan penyebabnya, dan aktivitas yang diamati dan/atau kemungkinan terjadi di sekitar pada saat kebakaran. Perhatian khusus diberikan untuk mempertanyakan aspek sosial, jika tersedia, untuk faktor-faktor biofisik yang diamati yang mungkin telah mendorong

<p>conducted throughout the project site with a range of district-level government officials, police and military officers, local residents with agricultural land holdings and those who sold land to oil palm companies, oil palm company workers, and village residents who practice deer hunting, charcoal making, bee keeping, and other activities that involve fire use[5].</p>	<p>transisi kebakaran gambut dari permukaan ke bawah permukaan. Dalam dua contoh pada tahun 2016, ilmuwan sosial mengamati kebakaran aktif dengan bukti yang terlihat di mana dan bagaimana kebakaran itu dimulai. Wawancara semi-terstruktur juga dilakukan di seluruh lokasi proyek dengan sejumlah pejabat pemerintah tingkat kabupaten, polisi dan militer, penduduk lokal yang memiliki lahan pertanian dan mereka yang menjual tanah kepada perusahaan kelapa sawit, pekerja perusahaan kelapa sawit, dan penduduk desa yang melakukan perburuan rusa, membuat arang, beternak lebah, dan kegiatan lain yang melibatkan penggunaan api[5].</p>
<p><b>Surface to peat fire transitions within a socio-biophysical landscape</b>  The frequency and extent of fires in degraded peatlands, particularly surface fires, have increased in the past two decades, particularly during drought-fuelled El Niño years such as 2015 (Chen et al., 2016; Vetruta &amp; Cochrane, 2020). Yet there is little evidence from our study site that there have been more fire ignitions during severe fire seasons when surface fires would have been more likely to transition into the sub-surface. We furthermore hypothesize that while drought in El Niño years drives the amount of fire activity, sea surface temperature is a better determinant of overall quantity of fire hotspots than water table levels. Sustained high temperatures with low precipitation frequency dries out surface vegetation (fire fuels), causing fires to ignite easily and spread across a landscape but not necessarily transition into sub-surface peat fires. Based on our observations at fire scenes and interviews with area inhabitants, the number of contained fires for human activities across the peat landscape have not correlated directly with the number or extent of landscape-scale, sub-surface peat fires that have burned across hundreds of hectares of peatland in our study area. Although many fires were ignited across shallow and deep peatlands during dry seasons, only some of these surface fires transitioned into sub-surface peat fires. We thus suggest that two of the enabling factors for this transition are primarily the availability and condition of live vegetation and woody fuels that carry surface fires and secondarily, the precipitation volume and frequency (influenced by ENSO) which subsequently affects peat moisture and depth of the water table which limits the ignition and spread of sub-surface peat fires. Whilst the data highlight, first, the direct relationship between human activities and fire ignitions—as without human-led ignitions the fires would not start—the scale of fires and the increasingly frequent transitioning of fires into the peat cannot be explained solely by weather conditions, human-led fire ignition, or by</p>	<p><b>Transisi kebakaran dari permukaan ke gambut dalam lanskap sosio-biofisik</b>  Frekuensi dan luasnya kebakaran di lahan gambut yang terdegradasi, terutama kebakaran permukaan, telah meningkat dalam dua dekade terakhir, terutama selama tahun-tahun El Niño yang dipicu oleh kekeringan seperti kejadian tahun 2015 (Chen et al., 2016; Vetruta &amp; Cochrane, 2020). Namun hanya sedikit bukti dari lokasi penelitian kami bahwa telah terjadi lebih banyak penyalaan api selama musim kebakaran yang parah ketika kebakaran permukaan lebih cenderung berpindah ke bawah permukaan. Lebih lanjut kami berhipotesis bahwa meskipun kekeringan di tahun-tahun El Niño mendorong jumlah aktivitas kebakaran, suhu permukaan laut adalah penentu yang lebih baik untuk kuantitas keseluruhan titik api daripada tingkat permukaan air. Temperatur tinggi yang berkelanjutan dengan frekuensi curah hujan rendah mengeringkan vegetasi permukaan (bahan bakar api), menyebabkan api mudah menyala dan menyebar ke seluruh lanskap tetapi tidak harus bertransisi menjadi kebakaran gambut sub-permukaan. Berdasarkan pengamatan kami di lokasi kebakaran dan wawancara dengan penduduk area, jumlah kebakaran yang terkendali untuk aktivitas manusia di seluruh lanskap gambut tidak berkorelasi langsung dengan jumlah atau luas kebakaran gambut sub-permukaan skala lanskap yang telah terjadi di ratusan hektar lahan gambut di wilayah studi kami. Meskipun banyak kebakaran terjadi di lahan gambut dangkal dan selama musim kemarau, hanya sebagian dari kebakaran permukaan ini yang bertransisi menjadi kebakaran gambut sub-permukaan. Dengan demikian kami menyatakan bahwa dua faktor pendukung untuk transisi ini terutama adalah ketersediaan dan kondisi vegetasi hidup dan bahan bakar kayu yang membawa kebakaran permukaan, dan kedua adalah volume dan frekuensi presipitasi (dipengaruhi oleh ENSO) yang selanjutnya mempengaruhi kelembaban dan kedalaman gambut dari muka air tanah yang membatasi penyalaan dan penyebaran kebakaran</p>

human activities altering fire environments in site-specific locations (Figure 3). Instead, the relevance of the larger, landscape-scale human activities that are not only contemporaneous but have been taking place in this area for the last twenty years must be taken into consideration.

Human activities that increase the fine and heavy surface fuel load or reduce the water table depth, make the landscape more vulnerable to fire spread and transition to the sub-surface, even if the actors engaged in such practices do not intend for fires to spread widely or do not involve fire ignition at all. Whilst both water table depth and available fuel load are typically defined as biophysical phenomena, they are integral to local inhabitants' everyday experience of the landscape. Inhabitants regard fuel loads as any living or dead vegetation or biomass that can be cleared, extracted, harvested, and in some circumstances burned, for rent-seeking activities such as logging, fishing, hunting, charcoal-making, and smallholder agriculture. Water tables affect inhabitants' use of the landscape since high water tables flood cropland in degraded peatlands and make accessing land for some livelihood activities challenging. Low water tables, meanwhile, make boat transit to agricultural plots and forest areas via canals and small rivers difficult. Changing land use and access depending on seasonal water table variation also affects how and where area inhabitants alter fire fuels across the peat surface, a significant factor in enabling fire transition to the sub-surface that we discuss in the following section.

Water table depth, precipitation levels and available surface fuels together enable the conditions for peat fire transition. Water table depth closely tracks regional and local rainfall patterns, lowering down to one meter below the surface in drained peatlands during severe droughts and rising above the surface to flood levels during very wet seasons (Graham et al., 2014a). While larger numbers of fire hotspots did usually occur in years when the water table was low—during 2011 the water table depth was as low as it was in 2015—and yet hotspot numbers were second lowest in 2011 and highest in 2015 (See Figure 4)[6]. Instead, we found that sea surface temperatures were more significantly correlated with hotspot abundance (and in those same years, PM 2.5 index). Hence, low water table levels do not necessarily lead to higher fire intensity or frequency—in other words, when frequent precipitation keeps the upper peat surface and fine surface fuels moist. The other reason low water table depth does not by itself enable peat fire is that peat soil ignition requires

gambut di bawah permukaan. Sementara data yang disoroti, pertama, hubungan langsung antara aktivitas manusia dan penyulutan api —karena tanpa penyalaan yang dilakukan oleh manusia, api tidak akan muncul— skala kebakaran dan semakin seringnya peralihan api ke gambut tidak dapat dijelaskan hanya oleh kondisi cuaca, penyalaan api yang disebabkan oleh manusia, atau oleh aktivitas manusia yang mengubah lingkungan kebakaran di lokasi spesifik (Gambar 3). Sebaliknya, relevansi aktivitas manusia berskala lanskap yang lebih besar yang tidak hanya pada masa yang sama tetapi telah terjadi di daerah ini selama dua puluh tahun terakhir harus pula dipertimbangkan.

Aktivitas manusia yang meningkatkan beban bahan bakar permukaan halus dan berat atau mengurangi kedalaman muka air tanah, membuat lanskap lebih rentan terhadap penyebaran api dan transisi ke bawah permukaan, bahkan jika para pelaku yang terlibat dalam praktik tersebut tidak bermaksud agar api menyebar luas atau tidak melibatkan penyalaan api sama sekali. Meskipun kedalaman muka air tanah dan beban bahan bakar yang tersedia biasanya didefinisikan sebagai fenomena biofisik, keduanya merupakan bagian integral dari pengalaman lanskap sehari-hari penduduk lokal. Penduduk menganggap beban bahan bakar sebagai vegetasi atau biomassa yang hidup atau mati yang dapat dibersihkan, diekstraksi, dipanen, dan dalam beberapa keadaan dibakar, untuk kegiatan mencari keuntungan seperti penebangan, penangkapan ikan, perburuan, pembuatan arang, dan pertanian rakyat. Muka air tanah mempengaruhi penggunaan lanskap oleh penduduk karena permukaan air yang tinggi membanjiri lahan pertanian di lahan gambut yang terdegradasi dan menjadi sulit untuk membuat akses ke lahan untuk beberapa aktivitas mata pencaharian. Sementara itu, permukaan air rendah membuat angkutan perahu ke petak pertanian dan kawasan hutan melalui kanal dan sungai kecil menjadi sulit. Mengubah penggunaan dan akses lahan yang bergantung pada variasi muka air tanah musiman juga mempengaruhi bagaimana dan di mana penduduk daerah mengubah bahan bakar api di seluruh permukaan gambut, faktor penting dalam memungkinkan transisi kebakaran ke bawah permukaan yang kita diskusikan pada bagian berikut.

Kedalaman muka air tanah, tingkat curah hujan, dan bahan bakar permukaan yang tersedia bersama-sama memungkinkan kondisi transisi kebakaran gambut. Kedalaman muka air tanah secara dekat mengikuti pola curah hujan regional dan lokal, turun hingga satu meter di bawah permukaan di lahan

flammable organic material burning on the surface for at least several hours at high temperatures. Whilst vegetation in degraded tropical peatlands may ignite easily, peat soil ignition requires the upper peat surface to be exposed to something very hot for a long time (Usup et al., 2004) such as smouldering large fallen tree logs and branches. The peat itself also requires low moisture content and sufficient wind speed to support ignition (Usup et al., 2004; Huang et al., 2016). Fuel flammability increases, therefore, through upper surface peat drying from drainage, reduction in rainfall, and subsequent forest degradation. Furthermore, fire dynamics studies illustrate that after the first fire, the second and third fires are often much greater in intensity due to the increased fuel availability caused by further tree mortality, until ultimately becoming limited, once recurrent fires consume more fuels than additional vegetation mortality makes available (Cochrane, 2003; Cochrane, 2009; Hoscilo et al., 2011). The build-up of large fuels such as logs on the surface of tropical peatlands from previous land use activities and from exposure as peat oxidizes therefore has important implications in determining whether the peat soil will ignite, though this requires the additional presence of fine and medium fuels (Usup et al., 2004). This can also be observed in degraded, non-forested areas: the areas that burned in 2014 largely did not also burn in 2015 (Figure 2), despite wide-spread burning elsewhere and high flammability in the previous year. This is likely due to the fuel in the degraded area in 2014 burning away, reducing surface flammability in 2015.

gambut yang dikeringkan selama kekeringan parah dan naik di atas permukaan hingga tingkat banjir selama musim hujan (Graham et al., 2014a). Sementara jumlah titik api yang lebih banyak biasanya terjadi pada tahun-tahun ketika permukaan air rendah –selama 2011 kedalaman muka air tanah serendah tahun 2015– namun jumlah titik api berada di urutan kedua terendah pada tahun 2011 dan tertinggi pada tahun 2015 (Lihat Gambar 4)[6]. Sebaliknya, kami menemukan bahwa suhu permukaan laut berkorelasi lebih signifikan dengan banyaknya titik api (dan pada tahun-tahun yang sama, indeks PM 2.5). Oleh karena itu, tingkat permukaan air yang rendah tidak serta merta menyebabkan intensitas atau frekuensi kebakaran yang lebih tinggi – dengan kata lain, ketika curah hujan yang sering membuat permukaan gambut bagian atas dan bahan bakar permukaan halus tetap lembab. Alasan lain mengapa kedalaman muka air tanah yang rendah tidak dengan sendirinya memungkinkan terjadinya kebakaran gambut adalah karena pengapian tanah gambut membutuhkan bahan organik yang mudah terbakar di permukaan selama setidaknya beberapa jam pada suhu tinggi. Sementara vegetasi di lahan gambut tropis yang terdegradasi dapat terbakar dengan mudah, pengapian tanah gambut mengharuskan permukaan gambut bagian atas terpapar pada sesuatu yang sangat panas untuk waktu yang lama (Usup et al., 2004) seperti bara batang pohon besar yang tumbang dan dahan. Gambut itu sendiri juga membutuhkan kadar air yang rendah dan kecepatan angin yang cukup untuk mendukung pengapian (Usup et al., 2004; Huang et al., 2016). Karenanya, kemungkinan terbakar bahan bakar meningkat melalui pengeringan gambut permukaan atas dari drainase, pengurangan curah hujan, dan degradasi hutan selanjutnya. Lebih lanjut, studi dinamika kebakaran menggambarkan bahwa setelah kebakaran pertama, kebakaran kedua dan ketiga seringkali jauh lebih besar intensitasnya karena peningkatan ketersediaan bahan bakar yang disebabkan oleh kematian pohon, hingga akhirnya menjadi terbatas, setelah kebakaran berulang menghabiskan lebih banyak bahan bakar daripada tersedianya kematian vegetasi tambahan (Cochrane, 2003; Cochrane, 2009; Hoscilo et al., 2011). Oleh karena itu, penumpukan bahan bakar besar seperti kayu gelondongan di permukaan lahan gambut tropis dari kegiatan penggunaan lahan sebelumnya dan dari paparan saat gambut teroksidasi, oleh karena itu, memiliki implikasi penting dalam menentukan apakah tanah gambut akan terbakar, meskipun ini membutuhkan tambahan bahan bakar halus dan sedang (Usup et al., 2004). Hal ini juga dapat diamati di kawasan terdegradasi dan bukan hutan: kawasan yang terbakar pada tahun 2014 sebagian besar tidak juga terbakar pada tahun

2015 (Gambar 2), meskipun terjadi kebakaran yang meluas di tempat lain dan tingkat mudah terbakar yang tinggi pada tahun sebelumnya. Hal ini kemungkinan karena bahan bakar di area terdegradasi pada tahun 2014 terbakar habis, sehingga mengurangi sifat mudah terbakar pada tahun 2015.

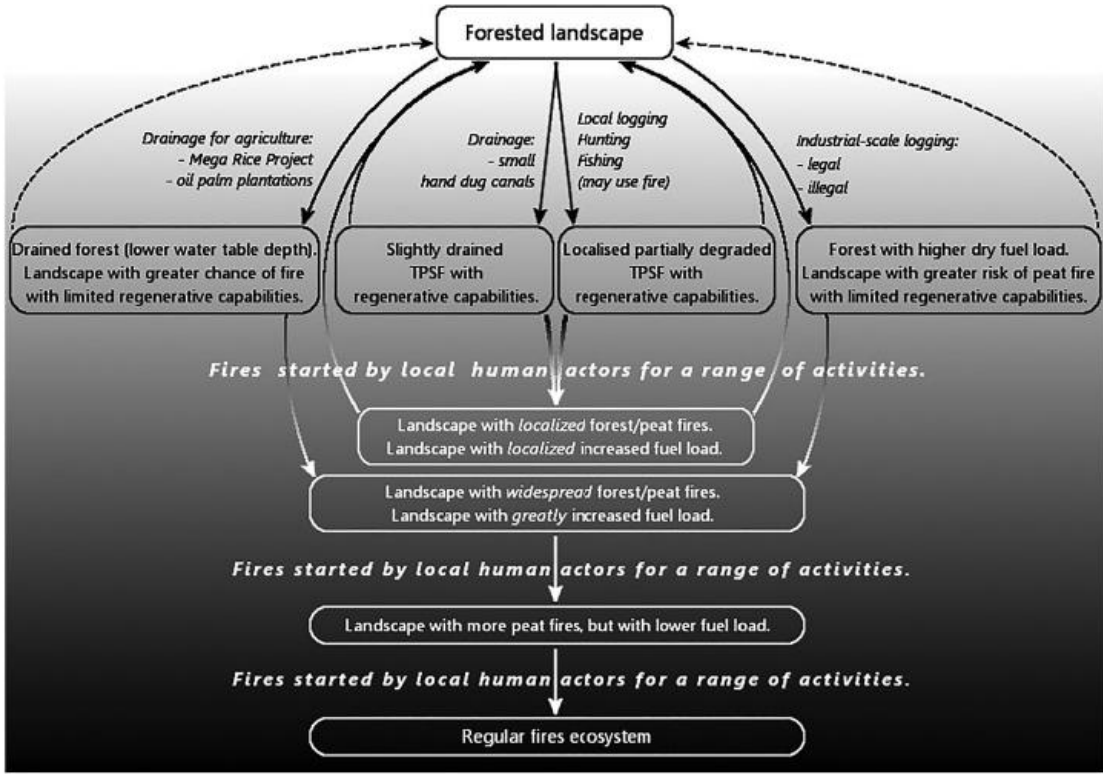


Figure 3. Schematic diagram indicating transition from a forested peat landscape to a peat ecosystem in which fires occur regularly, dependent on interactions between human activities and available fuel loads over time.

Source: Figure drawn based on authors' primary data and conceptualization.



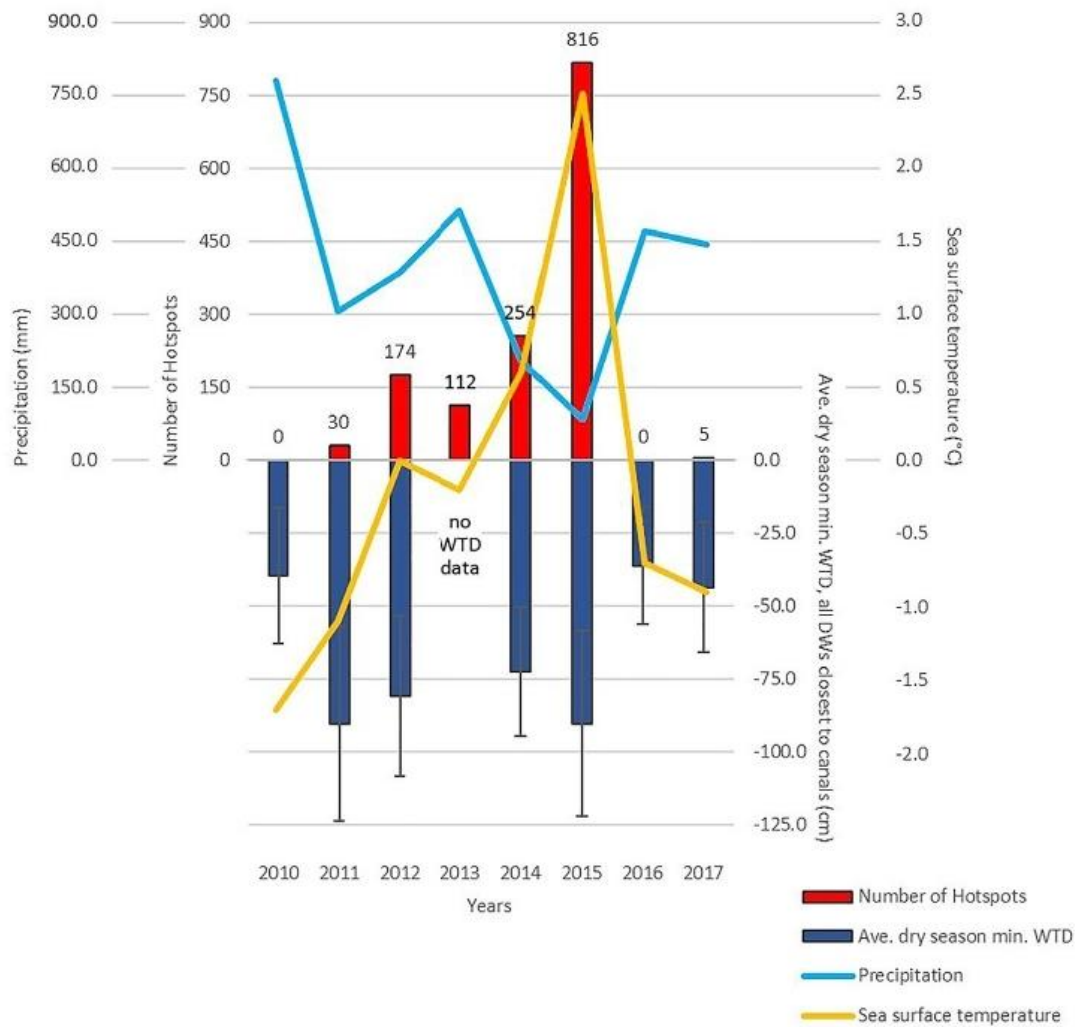


Figure 4. Fire hotspots in study site, increased sea surface temperature, precipitation, and water table depth. Number of fire hotspots correlates most strongly with sea surface temperature and low precipitation.

Source: Figure produced by authors based on hotspot data and imagery from LANCE FIRMS operated by NASA's Earth Science Data and Information System (ESDIS) with funding provided by NASA Headquarters (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>). The Water Table Data presented in this paper was collected by the KFCP Peat and Hydrology Monitoring Team as part of the joint Australia-Indonesia Governments' project Kalimantan Forest and Climate Partnership (KFCP). We acknowledge use of this data through a data sharing agreement with the Indonesian Ministry of Environment and Forestry which has been a part of successive NASA-funded projects in these peatlands (Cochrane PI; NNX13AP46G, NNX17AC95G, 80NSSC18K0235). Analyses and visualizations used in Figure 4 were also produced with the Giovanni online data system, developed and maintained by the NASA GES DISC (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) and the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/National Weather Service ([https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)).

### ***Livelihood activities, fire fuels, and sources of ignition***

Because fire in tropical peatlands requires anthropogenic ignition, all of the fires observed in deep and shallow peat areas within our project site were caused intentionally or unintentionally by human actors[7]. There is a difference, however, between human actions that involve fire ignition directly and those that alter the 'fire environment', making the landscape more vulnerable to fire spread and transition into the peat soil. Whilst land clearing for smallholder and commercial agriculture— normatively called slash-and-burn—is often cited as the cause of fire in peatlands (Page et al., 2009; Gaveau et al., 2016; Normile, 2019), we found far more heterogeneous land and fire use (c.f. Tacconi & Vayda, 2006) in our study site. In shallow peat areas close to villages where smallholders cultivate rice, vegetables, rubber, and perennial fruit trees, preparing agricultural land with fire has until recently been a significant source of fire ignitions[8] Using fire to clear land in shallow peat and mineral soils is a traditionally local indigenous Dayak practice, where soil fertility is poor and shrubs grow rapidly on unplanted land during the wet season. Local residents also use controlled fire to demonstrate active land use and thus maintain tenure in the absence of formal land titles.

It is difficult, however, to attribute the increasing frequency and extent of peat fires in the area, particularly those that spread throughout deep peat soils, to traditional agricultural land burning on shallow peat soils. Sub-surface peat fires began occurring following the large canals dug during Mega Rice Project construction in 1997–98 and most subsequent fires in the area are spatially concentrated along the canals (Konecny et al., 2016). Furthermore, there are a range of livelihood activities that involve fire use beyond clearing land for agriculture, including clearing vegetation for fish ponds, charcoal making, deer and pig hunting, bee keeping, illegal selective logging, salvage logging (collecting already dead, often partially submerged/exposed logs) and legal timber and non-timber forest product collection. Many of these activities involve setting contained fire, including burning wood to make charcoal or using smoke to tend beehives. For instance, people doing salvage logging search for exposed logs formerly buried by peat that can be cut into planks on site and towed to villages for sale. To access degraded areas where logs might be present, salvage loggers ignite surface vegetation to clear pathways through ferns and sedges, leave the area quickly to avoid being caught, and return later to collect the logs.<sup>9</sup> Deer hunting also involves clearing ferns and

### **Aktivitas mata pencaharian, bahan bakar api, dan sumber nyala api**

Karena kebakaran di lahan gambut tropis membutuhkan penyalaaan antropogenik, semua kebakaran yang diamati di daerah gambut dalam dan dangkal di dalam lokasi proyek kami disebabkan oleh aktor manusia secara sengaja atau tidak sengaja[7]. Akan tetapi, terdapat perbedaan antara tindakan manusia yang melibatkan penyalaaan api secara langsung dan yang mengubah 'lingkungan kebakaran', membuat lanskap lebih rentan terhadap penyebaran api dan transisi ke dalam tanah gambut. Meskipun pembukaan lahan untuk petani kecil dan pertanian komersial —normalnya disebut tebang-dan-bakar— sering disebut sebagai penyebab kebakaran di lahan gambut (Page et al., 2009; Gaveau et al., 2016; Normile, 2019), kami menemukan lebih jauh terkait penggunaan lahan dan api yang lebih heterogen (lihat Tacconi & Vayda, 2006) di lokasi studi kami. Di daerah gambut dangkal dekat desa di mana petani kecil menanam padi, sayuran, karet, dan pohon buah-buahan, menyiapkan lahan pertanian dengan api hingga saat ini menjadi sumber nyala api yang signifikan[8]. Menggunakan api untuk membersihkan lahan di gambut dangkal dan tanah mineral praktik tradisional Dayak asli setempat, di mana buruknya kesuburan tanah dan semak tumbuh dengan cepat di lahan yang tidak ditanami selama musim hujan. Penduduk lokal juga menggunakan api terkontrol untuk mendemonstrasikan penggunaan lahan secara aktif dan dengan demikian mempertahankan kepemilikan tanpa adanya sertifikat tanah resmi.

Namun, sulit untuk mengaitkan peningkatan frekuensi dan luasnya kebakaran gambut di daerah tersebut, terutama yang menyebar di seluruh tanah gambut dalam, dengan pembakaran lahan pertanian tradisional di tanah gambut dangkal. Kebakaran gambut di bawah permukaan mulai terjadi setelah kanal-kanal besar digali selama konstruksi Mega Rice Project pada tahun 1997–98 dan sebagian besar kebakaran berikutnya di area tersebut terkonsentrasi secara spasial di sepanjang kanal (Konecny et al., 2016). Selain itu, ada berbagai kegiatan mata pencaharian yang melibatkan penggunaan api di luar pembukaan lahan untuk pertanian, termasuk membersihkan vegetasi untuk kolam ikan, membuat arang, berburu rusa dan babi, beternak lebah, penebangan selektif ilegal, penebangan kayu (mengumpulkan yang sudah mati, seringkali sebagian terendam/kayu terbuka) dan pengambilan kayu legal dan hasil hutan bukan kayu. Banyak dari kegiatan ini melibatkan penggunaan api, termasuk membakar kayu untuk membuat arang atau menggunakan asap

sedges with fire, as hunters burn vegetation to attract deer to the new grass growth that follows a fire, luring them out of the forests into open fields. If weather conditions are hot and sufficiently dry, surface fires can spread from ferns and sedges to larger fuels such as branches and logs. These large fuels require many consecutive dry days to become sufficiently dry and a prolonged wet period to subsequently re-wet, while fine fuels are more susceptible to diurnal moisture fluctuations.

In several instances, we observed burned surface vegetation in deep peat areas that had been deliberately ignited to clear access paths to forest fragments and eliminate vegetation that was blocking canals. But as with other types of fire ignition across the peat landscape, deliberate burning of surface vegetation in deep peat does not always lead to sub-surface peat fire. Observed sites of charcoal making, for instance, showed evidence of contained fire burning for several days at a time, but no evidence of fire transition into nearby peat soil. Activities such as cutting ferns and sedges or clearing transects through the area, meanwhile, have mainly led to an increase in fine fuels, which may exacerbate the spread of fire across the surface. Additionally, interviews in 2016 indicated that non-land clearing, fire-related activities such as deer hunting, charcoal making, and bee keeping involve a small number of people in the research site and do not account for the majority of fire ignitions.

Given the lack of correlation between human activities involving fire ignition and the frequency and extent of landscape-scale fires observed, we considered land use practices that may encourage surface fires to spread beyond ignition sites and transition into peat fires but do not necessarily involve fire ignition. For instance, whilst sufficiently low water table depth is a necessary precursor to peat fire, surface fires do not transition into peat fires without available fuels of sufficient size and mass and without adequately dry conditions. Medium to large sized logs, branches, and tree roots are one of the primary mechanisms through which surface fires transition to sub-surface peat fires, retaining fire longer than other types of vegetation [10]. The exacerbated spread of fire beyond the local site thus leads to a higher chance of fire encountering large fuels elsewhere, ultimately leading to landscape-scale peat fires. Selective illegal logging is the most common activity likely to deposit large woody material on the peat surface. Based on information from BOS-Mawas' Patrol team, which conducts regular monthly patrols across the

untuk merawat sarang lebah. Misalnya, orang-orang yang melakukan pencarian penebangan kayu menyelamatkan kayu-kayu terbuka yang sebelumnya terkubur oleh gambut yang dapat dipotong menjadi papan di lokasi dan ditarik ke desa-desa untuk dijual. Untuk mengakses area terdegradasi di mana kayu mungkin ada, penebang menyalakan vegetasi permukaan untuk membersihkan jalur melalui pakis dan alang-alang, meninggalkan area tersebut dengan cepat untuk menghindari penangkapan, dan kembali lagi nanti untuk mengumpulkan kayu. Perburuan rusa juga melibatkan pembersihan pakis dan alang-alang dengan api, saat pemburu membakar vegetasi untuk menarik rusa ke rumput baru yang tumbuh setelah kebakaran, memancing mereka keluar dari hutan ke ladang terbuka. Jika kondisi cuaca panas dan cukup kering, kebakaran permukaan dapat menyebar dari pakis dan sedimen ke bahan bakar yang lebih besar seperti cabang dan batang kayu. Bahan bakar besar ini membutuhkan banyak hari untuk menjadi kering dan periode basah yang lama untuk kemudian basah kembali, sementara bahan bakar halus lebih rentan terhadap fluktuasi kelembaban diurnal.

Dalam beberapa kasus, kami mengamati vegetasi permukaan yang terbakar di area gambut dalam yang sengaja dibakar untuk membuka jalur akses ke fragmen hutan dan menghilangkan vegetasi yang menghalangi kanal. Namun seperti jenis penyalaan api lainnya di lanskap gambut, pembakaran yang disengaja pada vegetasi permukaan di gambut dalam tidak selalu menyebabkan kebakaran gambut di bawah permukaan. Lokasi pembuatan arang yang diamati, misalnya, menunjukkan bukti adanya kebakaran yang terkendali selama beberapa hari, tetapi tidak ada bukti peralihan api ke tanah gambut di dekatnya. Sementara itu, kegiatan seperti menebang pakis dan alang-alang atau membersihkan jalur melalui area tersebut, terutama mengarah pada peningkatan bahan bakar halus, yang dapat memperburuk penyebaran api ke seluruh permukaan. Selain itu, wawancara pada tahun 2016 menunjukkan bahwa pembukaan non-lahan, aktivitas terkait kebakaran seperti berburu rusa, pembuatan arang, dan peternakan lebah melibatkan sejumlah kecil orang di lokasi penelitian dan tidak menyebabkan sebagian besar penyulutan api.

Mengingat kurangnya korelasi antara aktivitas manusia yang melibatkan penyalaan api dan frekuensi serta luasnya kebakaran skala lanskap yang diamati, kami mempertimbangkan praktik penggunaan lahan yang dapat

study area in order to report any illegal activities such as logging and fire igniting, the team observed that from 2014–16, illegal logging constituted the main livelihood activity in the area[11]. Additionally, some residents collect galam, a native tree species that grows rapidly on degraded peatland and is used as a building material. Though smaller than trees harvested for sale to the local sawmills, cutting galam nevertheless deposits fragments of tree trunks, branches, and roots on the peat surface, which are a source of fuel for surface fires.

In general, these livelihood activities are spatially dispersed across the landscape in relation to peat depth and distance from canals. Extensive drainage canals, many of which are deep and wide enough for small boats to pass, increase access to more remote forest fragments and deeper peatland beyond the shallow peat soils used by village inhabitants for agriculture. This enables villagers to access deep peat areas and thus disperses possible fire ignition sources across a broader portion of the landscape. Fishing, logging, and deer hunting require local inhabitants to travel several kilometres from their home village and camp along the edges of canals in makeshift tents or in basic, semi-permanent huts, setting campfires or using gas stoves for cooking. Cooking fires can ignite surface vegetation near the camps, whether deliberately or accidentally, which can spread to surrounding areas if the vegetation is sufficiently dry with embedded logs acting as a conduit. Whilst impossible to determine the exact number of accidental and/or intentional fires—surface or sub-surface—that have been ignited by errant flames from cooking fires, field observations point to this as a likely source of some surface fire ignitions. Furthermore, historical fire burn scar maps indicate that peatland along the most accessible canals have burned the most frequently over the past two decades, over 10 times in some places (Graham et al., 2014b; Konecny et al., 2016). The edges of canals—or berms—contain embedded piles of logs mixed with peat soil, a result of Mega Rice Project canal construction in which logs were laid alongside the canals so excavators could be moved across the peatland. These fire ignitions near canals, whether intentional or unintentional, if they occur at the beginning of the dry season when surface vegetation has not yet dried out and water table levels are still high, may lead to small intrusions of fire into the peat soil but not cause extensive subsurface fires. At the end of the dry season, however, when surface vegetation is very dry and water table levels are low, a low intensity surface fire near canals may lead to severe sub-surface peat burning, even in

mendorong kebakaran permukaan untuk menyebar ke luar lokasi penyalan dan transisi menjadi kebakaran gambut tetapi tidak selalu melibatkan pengapian kebakaran. Misalnya, meskipun kedalaman muka air tanah yang cukup rendah merupakan pendahulu yang diperlukan untuk kebakaran gambut, kebakaran permukaan tidak bertransisi menjadi kebakaran gambut tanpa bahan bakar yang tersedia dengan ukuran dan massa yang cukup dan tanpa kondisi kering yang memadai. Kayu gelondongan, cabang, dan akar pohon berukuran sedang hingga besar adalah salah satu mekanisme utama yang melaluinya api permukaan bertransisi menjadi kebakaran gambut di bawah permukaan, menahan api lebih lama daripada jenis vegetasi lain[10]. Dengan demikian, penyebaran api yang diperburuk ke luar lokasi lokal mengarah pada peluang yang lebih tinggi untuk menemukan bahan bakar besar di tempat lain, yang pada akhirnya mengarah ke kebakaran gambut skala lanskap. Penebangan liar selektif adalah aktivitas paling umum yang kemungkinan besar menyimpan material kayu besar di permukaan gambut. Berdasarkan informasi dari tim Patroli BOS-Mawas yang melakukan patroli rutin bulanan di seluruh wilayah studi untuk melaporkan kegiatan ilegal seperti penebangan dan penyulut api, tim mengamati bahwa dari tahun 2014–16, pembalakan liar merupakan kegiatan mata pencaharian utama di daerah tersebut[11]. Selain itu, beberapa penduduk mengumpulkan galam, jenis pohon asli yang tumbuh dengan cepat di lahan gambut yang rusak dan digunakan sebagai bahan bangunan. Meskipun lebih kecil dari pohon yang dipanen untuk dijual ke pabrik penggergajian lokal, pemotongan galam tetap menyimpan potongan batang pohon, cabang, dan akar di permukaan gambut, yang merupakan sumber bahan bakar untuk kebakaran permukaan.

Secara umum, kegiatan mata pencaharian ini tersebar secara spasial di seluruh lanskap terkait dengan kedalaman gambut dan jarak dari kanal. Kanal drainase yang luas, banyak di antaranya dalam dan cukup lebar untuk dilalui perahu kecil, meningkatkan akses ke fragmen hutan yang lebih terpencil dan lahan gambut yang lebih dalam di luar tanah gambut dangkal yang digunakan oleh penduduk desa untuk pertanian. Hal ini memungkinkan penduduk desa untuk mengakses area gambut yang dalam dan dengan demikian menyebarkan kemungkinan sumber penyulut api di bagian lanskap yang lebih luas. Penangkapan ikan, penebangan, dan perburuan rusa mengharuskan penduduk setempat melakukan perjalanan beberapa kilometer dari desa asal mereka dan berkemah di sepanjang tepi kanal di tenda-tenda darurat atau di gubuk sederhana semi-permanen, memasang api unggun atau menggunakan

the absence of heavy surface fire fuels.

Since the area's first major fire season in 1997/98, the landscape has changed during every subsequent fire season: the mineral content of the peat soil increases, large fuels burn away and decrease across the landscape over time, and canal width and depth changes, further altering water table levels. All of these factors influence how fires spread across the peat surface and the lateral and vertical transition of fires through the sub-surface peat soil. Most of the landscape within the study site has experienced a cycle in which fire leads to more fire as a result of increased surface fuel loads. This typically continues for two to three burning seasons, after which the majority of the largest surface fuels will have burned away (Cochrane, 2003). If there are no fires after this point, the trees and vegetation may still regenerate. However, if the land burns more than three times, the local ecosystem becomes severely degraded, with ferns and sedges replacing tree species as the dominant vegetation (Hoscilo et al., 2011). As a result, the fires may still regularly burn through light fuels but are less likely to burn into the peat layer due to lack of remaining large fuels that can generate sufficient heat for peat ignition. The ecosystem thus remains stuck in a cycle of 'retrogressive succession', which is made up primarily of dense, fine fuels (Hoscilo et al., 2011; Graham et al., 2016). This surface vegetation remains highly vulnerable to nearannual surface fires, particularly—but not exclusively—during abnormally dry seasons.

kompur gas untuk memasak. Api untuk memasak dapat menyulut vegetasi permukaan di dekat kamp, baik sengaja atau tidak sengaja, yang dapat menyebar ke daerah sekitarnya jika vegetasi cukup kering dengan batang kayu yang berfungsi sebagai saluran. Meskipun tidak mungkin untuk menentukan jumlah pasti kebakaran yang tidak disengaja dan/atau disengaja —di permukaan atau di bawah permukaan— yang telah disulut oleh nyala api yang menyimpang dari kebakaran saat memasak, pengamatan lapangan menunjukkan hal ini sebagai kemungkinan sumber dari beberapa penyalan api permukaan. Lebih lanjut, peta bekas luka bakar catatan kebakaran menunjukkan bahwa lahan gambut di sepanjang kanal yang paling mudah diakses telah terbakar paling sering selama dua dekade terakhir, lebih dari 10 kali di beberapa tempat (Graham et al., 2014b; Konecny et al., 2016). Tepi kanal —atau tanggul— berisi tumpukan kayu gelondongan yang bercampur dengan tanah gambut, hasil pembangunan kanal Mega Rice Project, di mana batang kayu diletakkan di sepanjang kanal sehingga eskavator dapat dipindahkan melintasi lahan gambut. Penyulutan api di dekat kanal ini, baik disengaja maupun tidak disengaja, jika terjadi di awal musim kemarau ketika vegetasi permukaan belum mengering dan muka air tanah masih tinggi, dapat menyebabkan sedikit intrusi api ke dalam tanah gambut tetapi tidak menyebabkan kebakaran bawah permukaan yang luas. Namun, pada akhir musim kemarau, ketika vegetasi permukaan sangat kering dan permukaan air tanah rendah, kebakaran permukaan dengan intensitas rendah di dekat kanal dapat menyebabkan pembakaran gambut di bawah permukaan yang parah, bahkan tanpa adanya bahan bakar api permukaan yang berat.

Sejak musim kebakaran besar pertama di kawasan itu pada tahun 1997/98, lanskap telah berubah selama setiap musim kebakaran berikutnya: kandungan mineral dari tanah gambut meningkat, bahan bakar besar terbakar habis dan berkurang di seluruh lanskap seiring waktu, lebar dan kedalaman kanal berubah, selanjutnya mengubah tingkat permukaan air. Semua faktor ini mempengaruhi bagaimana api menyebar di seluruh permukaan gambut dan transisi api lateral dan vertikal melalui tanah gambut di bawah permukaan. Sebagian besar lanskap dalam lokasi studi telah mengalami siklus di mana kebakaran menyebabkan lebih banyak kebakaran sebagai akibat dari peningkatan beban bahan bakar permukaan. Hal ini biasanya berlanjut selama dua hingga tiga musim pembakaran, setelah itu sebagian besar bahan bakar permukaan terbesar akan habis terbakar (Cochrane, 2003). Jika tidak ada kebakaran setelah titik ini, pohon dan vegetasi masih dapat beregenerasi.

	<p>Namun, jika lahan terbakar lebih dari tiga kali, ekosistem lokal menjadi rusak parah, dengan pakis dan alang-alang menggantikan spesies pohon sebagai vegetasi dominan (Hoscilo et al., 2011). Akibatnya, api mungkin masih menyala secara teratur melalui bahan bakar ringan tetapi kecil kemungkinannya untuk membakar lapisan gambut karena kurangnya bahan bakar besar yang tersisa yang dapat menghasilkan panas yang cukup untuk penyulutan gambut. Ekosistem tetap terjebak dalam siklus 'suksesi mundur', yang terutama terdiri dari bahan bakar padat dan halus (Hoscilo et al., 2011; Graham et al., 2016). Vegetasi permukaan ini tetap sangat rentan terhadap kebakaran permukaan hampir tahunan, terutama –tetapi tidak secara eksklusif– selama musim kemarau yang tidak normal.</p>
<p><b>Conclusion: Beyond slash-and-burn peat fire ignition</b>  In a drained peatland ecosystem, activities undertaken by landscape users are necessary sources of fire ignition in both shallow and deep peat areas. Likewise, localized, land use-related activities remain highly relevant in influencing both the extent and frequency of surface fires, and the transition to sub-surface peat fires. But we counter existing understandings of peat fires as driven exclusively by agricultural land clearing by attending to human activities that alter the biophysical surface of the peat in ways that make it more vulnerable to burning. More generally, this analysis advances understanding of Indonesia's peat fires that are based on livelihood-driven land use decisions but do not take biophysical dynamics of surface to sub-surface fire transition into account (e.g. Medrilzam et al., 2014). We have argued, first, that it is important to understand that not all surface fires in Indonesia's peatlands transition into sub-surface peat fires, the latter of which have a more severe impact on greenhouse gas emissions and regional air quality. Second, we identify the factors that are likely to influence a surface fire to transition vertically and laterally into a sub-surface peat fire: size, location, and characteristics of fire fuels across the landscape and sea surface temperature, which indicates how dry the fuels are likely to be during a fire season. While we have sought to present the interrelation between the social and biophysical elements that can influence a surface-to-peat transition, additional forthcoming papers from this project address in much greater detail the biophysical nuances of factors influencing surface-to-peat fire transition and fire spread through the peat, including soil moisture. The depth of the peatland's water table also influences how a fire spreads through the peat soil but, we contend, a low water table does not by itself cause</p>	<p><b>Kesimpulan: Melampaui tebang-dan-bakar penyalaan api gambut</b>  Pada ekosistem lahan gambut yang dikeringkan, aktivitas yang dilakukan oleh pengguna lanskap merupakan sumber penyulut api yang diperlukan baik di daerah gambut dangkal maupun dalam. Demikian pula, aktivitas terkait penggunaan lahan yang dilokalkan tetap sangat relevan dalam mempengaruhi tingkat dan frekuensi kebakaran permukaan dan transisi ke kebakaran gambut di bawah permukaan. Namun kami menentang pemahaman tentang kebakaran gambut yang didorong secara eksklusif oleh pembukaan lahan pertanian dengan memperhatikan aktivitas manusia yang mengubah permukaan biofisik gambut dengan cara yang membuatnya lebih rentan terhadap kebakaran. Secara lebih umum, analisis ini memajukan pemahaman tentang kebakaran gambut di Indonesia yang didasarkan pada keputusan penggunaan lahan berdasarkan mata pencaharian tetapi tidak memperhitungkan dinamika biofisik dari transisi kebakaran permukaan ke bawah permukaan (misalnya Medrilzam et al., 2014). Kami berpendapat, pertama, penting untuk dipahami bahwa tidak semua kebakaran permukaan di lahan gambut Indonesia bertransisi menjadi kebakaran gambut sub-permukaan, yang terakhir memiliki dampak yang lebih parah pada emisi gas rumah kaca dan kualitas udara regional. Kedua, kami mengidentifikasi faktor-faktor yang mungkin mempengaruhi kebakaran permukaan untuk bertransisi secara vertikal dan lateral menjadi kebakaran gambut sub-permukaan: ukuran, lokasi, dan karakteristik bahan bakar api di seluruh lanskap dan suhu permukaan laut, yang menunjukkan seberapa kering bahan bakar tersebut kemungkinan terjadi selama musim kebakaran. Meskipun kami telah berusaha untuk menyajikan keterkaitan antara elemen sosial dan biofisik yang dapat mempengaruhi transisi permukaan-ke-gambut, artikel tambahan yang</p>

surface to subsurface fire transition. Significantly, we have attributed the presence and type of fire fuels to the various human activities undertaken historically and contemporarily by local land users. Though vegetation clearing ahead of agricultural cultivation may account for some fire ignitions in the area, we have found that this practice— frequently referred to by scientists and government officials as slash-and-burn—is an insufficient cause of landscape-scale peat fires that have increased in frequency and severity in recent years in this research site. Peat fire transition occurs in a context shaped by interactions between activities involving fire ignition, short- and long-term human activities that manipulate the landscape’s surface fire fuels, particularly medium and large logs along canals, and biophysical conditions, including seasonal precipitation and temperature.

Though we attribute fires in this area to human-led sources of ignition and activities that make the fire environment more vulnerable to peat fire transition, we seek to counter narratives that blame individual land users for landscape-scale peat fires. Livelihood options in this area, and subsequent land usage, are limited and have become more so with the introduction of agricultural fire bans and ongoing ecosystem degradation. Many of the activities undertaken by local residents have existed since before the cycle of degradation began and at a point when, given their scale and the former resilience of the ecosystem, were supportable as they were confined to shallow peat only with non-invasive activities in the deep peat (non-timber forest product collection and fishing). However, canal construction for state- and corporate-led projects in the area resulted in extreme biophysical conditions pushing the ecosystem past its tipping point, a context in which fire-dependent livelihood activities are no longer possible without the risk of landscape-scale fire erupting under enabling biophysical conditions.

Finally, while this research has significance for understanding the complexity of peat fires beyond those that are a result of slash-and-burn agriculture, we note that there are limitations to broadly generalizing empirical findings from this unique peatland landscape to other peatland areas in Indonesia. The site in which this research was conducted has a particular history, given its historical development as the Mega Rice Project with large canals constructed through a deep peat dome, and biophysical conditions that are distinct from peatlands found in coastal Sumatra, for instance. This landscape also has heterogeneous land use and land cover and is currently

akan datang dari proyek ini membahas secara lebih rinci tentang nuansa biofisik dari faktor-faktor yang mempengaruhi transisi kebakaran permukaan-ke-gambut dan api menyebar melalui gambut, termasuk kelembaban tanah. Kedalaman muka air tanah lahan gambut juga mempengaruhi penyebaran api melalui tanah gambut, tetapi kami berpendapat, muka air tanah yang rendah tidak dengan sendirinya menyebabkan transisi kebakaran dari permukaan ke bawah permukaan. Secara signifikan, kami menghubungkan keberadaan dan jenis bahan bakar api dengan berbagai aktivitas manusia yang dilakukan secara historis dan kontemporer oleh pengguna lahan lokal. Meskipun pembukaan vegetasi sebelum penanaman pertanian mungkin menyebabkan beberapa penyalaan api di daerah tersebut, kami menemukan bahwa praktik ini —yang sering disebut oleh para ilmuwan dan pejabat pemerintah sebagai tebang-dan-bakar— adalah penyebab yang tidak memadai dari kebakaran gambut skala lanskap yang telah meningkat dalam frekuensi dan tingkat keparahan dalam beberapa tahun terakhir di lokasi penelitian ini. Transisi kebakaran gambut terjadi dalam konteks yang dibentuk oleh interaksi antara aktivitas yang melibatkan penyalaan api, aktivitas manusia jangka pendek dan jangka panjang yang memanipulasi bahan bakar kebakaran permukaan lanskap, terutama kayu gelondongan medium dan besar di sepanjang kanal, dan kondisi biofisik, termasuk curah hujan dan suhu musiman.

Meskipun kami mengaitkan kebakaran di area ini dengan sumber penyulut yang disebabkan oleh manusia dan aktivitas yang membuat lingkungan kebakaran lebih rentan terhadap transisi kebakaran gambut, kami mencari kontra-narasi yang menyalahkan pengguna lahan individu atas kebakaran gambut skala lanskap. Pilihan mata pencaharian di daerah ini, dan penggunaan lahan berikutnya, menjadi terbatas dan semakin terbatas dengan diberlakukannya larangan pembakaran untuk aktivitas pertanian dan degradasi ekosistem yang sedang berlangsung. Banyak kegiatan yang dilakukan oleh penduduk lokal telah ada sejak sebelum siklus degradasi dimulai dan pada titik ketika, mengingat skala dan ketahanan ekosistem sebelumnya, dapat mendukung karena mereka terbatas pada gambut dangkal hanya dengan kegiatan non-invasif di gambut dalam (pengumpulan dan penangkapan hasil hutan bukan kayu). Namun, pembangunan kanal untuk proyek-proyek yang diprakarsai oleh negara dan perusahaan di daerah tersebut mengakibatkan kondisi biofisik yang ekstrim yang mendorong ekosistem melewati titik kritisnya, sebuah konteks dimana aktivitas mata pencaharian yang bergantung pada api tidak mungkin lagi tanpa risiko

<p>used for rent-seeking activities by several thousand local village residents but remains largely outside of plantation concessions. This is in contrast to peatlands that have been homogeneously planted with oil palm and pulpwood plantations and are managed by company concession holders. Yet, elements of the landscape discussed in this paper are now common to most peatlands across Indonesia, as they have been affected by canal drainage, are used by local residents and/or concession holders in shallow and deep peat areas, and include some intact forest that has been selectively logged and impacted by adjacent drainage. Furthermore, the interactions between human activities, fire fuels, and sub-surface peat fire transition in this site emphasize the need to understand peatland fire dynamics in the context of the iterative relationship between biophysical conditions, socio-economic dynamics, and livelihood strategies of particular communities living in Indonesia's peatlands. Further field-based research on the socio-biophysical dynamics particular to each fire-prone peat landscape is thus needed to assess the causes of fires that transition into the peat layer itself, leading to regional haze crises.</p>	<p>kebakaran skala lanskap yang meletus di bawah kondisi biofisik yang memungkinkan.</p> <p>Terakhir, walaupun penelitian ini memiliki arti penting untuk memahami kompleksitas kebakaran gambut selain yang diakibatkan oleh pertanian tebang-dan-bakar, kami mencatat bahwa terdapat keterbatasan dalam menggeneralisasi temuan empiris dari lanskap lahan gambut yang unik ini ke area lahan gambut lainnya di Indonesia. Lokasi penelitian ini memiliki sejarah tersendiri, mengingat sejarah perkembangannya sebagai Mega Rice Project dengan kanal-kanal besar yang dibangun melalui kubah gambut yang dalam, dan kondisi biofisik yang berbeda dengan lahan gambut yang terdapat di pesisir Sumatera, misalnya. Lanskap ini juga memiliki tata guna lahan dan tutupan lahan yang heterogen dan saat ini digunakan untuk kegiatan pencarian sewa oleh ribuan penduduk desa setempat tetapi sebagian besar masih berada di luar konsesi perkebunan. Berbeda dengan lahan gambut yang telah ditanami secara homogen dengan perkebunan kelapa sawit dan kayu pulp dan dikelola oleh pemegang konsesi perusahaan. Namun, elemen lanskap yang dibahas dalam artikel ini sekarang umum di sebagian besar lahan gambut di seluruh Indonesia, karena telah dipengaruhi oleh drainase kanal, digunakan oleh penduduk setempat dan/atau pemegang konsesi di kawasan gambut dangkal dan dalam, dan termasuk beberapa hutan utuh yang telah ditebang secara selektif dan terkena dampak drainase yang berdekatan. Lebih lanjut, interaksi antara aktivitas manusia, bahan bakar api, dan transisi kebakaran gambut sub-permukaan di situs ini menekankan perlunya memahami dinamika kebakaran lahan gambut dalam konteks hubungan interaktif antara kondisi biofisik, dinamika sosial-ekonomi, dan strategi mata pencaharian khususnya masyarakat yang tinggal di lahan gambut Indonesia. Oleh karena itu, penelitian berbasis lapangan lebih lanjut tentang dinamika sosio-biofisik khususnya pada setiap lanskap gambut yang rawan kebakaran diperlukan untuk menilai penyebab kebakaran yang bertransisi ke lapisan gambut itu sendiri, yang menyebabkan krisis kabut asap regional.</p>
<p><b>Endnotes</b></p> <p>[1] The first peatland fires of significance in Indonesia occurred in 1982–83, which coincided with expanded peatland development throughout Sumatra.</p> <p>[2] More recent interviews have indicated that rubber prices have fallen so low in the area that this percentage may no longer be the case.</p>	<p><b>Catatan Akhir</b></p> <p>[1] Kebakaran lahan gambut pertama yang signifikan di Indonesia terjadi pada tahun 1982–1983, yang bertepatan dengan perluasan pengembangan lahan gambut di seluruh Sumatera.</p> <p>[2] Wawancara yang lebih baru menunjukkan bahwa harga karet telah jatuh begitu rendah di daerah tersebut sehingga persentase ini mungkin tidak</p>



- [3] Analysis conducted per grid cell, grid cell = 771 km<sup>2</sup> , two grid cells covered the entire study area, plus a small additional area to the south.
- [4] Surface vegetation PM emissions are usually a minor component (approximately 10 per cent) of total PM, and certainly less than or equal to the uncertainty in the peat PM emissions, particularly in this specific area where vegetation is dominated by invasive ferns rather than forest.
- [5] 2016 was also a relatively wet year, with only a brief and mild fire season, allowing for few opportunities to observe active fires in the field.
- [6] Figure 4 shows the water table depth recorded at the dipwells placed either 50 m or 100 m from the canals. This is because, as can be seen in Figure 1, most fires and FSEs took place within 100 m from the canal, and so best represented flammable peatland conditions (Medrilzam et al., 2017).
- [7] There may be isolated incidents of tropical peatland fire ignitions occurring from natural sources (lightning) and from unintentional human actions such as discarding cigarette ends, however these remain unproven and undocumented.
- [8] Following the 2015 fires, all agricultural land burning has been banned by the national government. These regulations are reinforced at a provincial and local level, though with less enforcement. Fire continues to be used illegally, however, and our field observations indicate that the fire ban has led to less responsible fire use as many fires are now ignited but left unattended out of fear of punitive action.
- [9] Some of these activities, such as salvage logging and charcoal making, may be unique to this area and not commonly practised in other peatland landscapes in Indonesia.
- [10] At the time of construction and for several years after, the berms were higher than the surrounding peat surface. Because fire has occurred frequently along the canal berms, however, many of the berms' peat soil and embedded logs have burned away, lowering the berms to the level of the peatland surface.
- [11] However, there was a decrease in this activity (logged trunks per kilometre per month) across this three year period.

- lagi menjadi masalah.
- [3] Analisis dilakukan per sel grid, sel grid = 771 km<sup>2</sup>, dua sel grid menutupi seluruh area studi, ditambah area tambahan kecil di selatan.
  - [4] Emisi PM vegetasi permukaan biasanya merupakan komponen kecil (kira-kira 10 persen) dari total PM, dan tentunya kurang dari atau sama dengan ketidakpastian emisi PM gambut, terutama di area spesifik ini di mana vegetasi didominasi oleh pakis invasif daripada hutan.
  - [5] Tahun 2016 juga merupakan tahun yang relatif basah, dengan hanya musim kebakaran yang singkat dan ringan, sehingga hanya sedikit kesempatan untuk mengamati kebakaran aktif di lapangan.
  - [6] Gambar 4 menunjukkan kedalaman tabel air yang dicatat di sumur-sumur bor yang terletak 50 m atau 100 m dari kanal. Hal ini karena, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1, sebagian besar kebakaran dan FSE terjadi dalam jarak 100 m dari kanal, sehingga paling baik mewakili kondisi lahan gambut yang mudah terbakar (Medrilzam et al., 2017).
  - [7] Mungkin ada insiden kebakaran lahan gambut tropis yang terisolasi yang terjadi dari sumber alam (petir) dan dari tindakan manusia yang tidak disengaja seperti membuang puntung rokok, namun ini tetap tidak terbukti dan tidak terdokumentasi.
  - [8] Pasca kebakaran 2015, semua pembakaran lahan pertanian telah dilarang oleh pemerintah pusat. Peraturan ini diperkuat di tingkat provinsi dan lokal, meskipun dengan penegakan yang lebih sedikit. Namun, api terus digunakan secara ilegal, dan pengamatan lapangan kami menunjukkan bahwa larangan pembakaran telah menyebabkan penggunaan api yang kurang bertanggung jawab karena banyak kebakaran yang sekarang dinyalakan tetapi dibiarkan tanpa pengawasan karena takut akan tindakan hukuman.
  - [9] Beberapa dari aktivitas ini, seperti penebangan kayu bekas dan pembuatan arang, mungkin unik di daerah ini dan tidak umum dilakukan di lanskap lahan gambut lainnya di Indonesia.
  - [10] Pada saat konstruksi dan beberapa tahun setelahnya, tanggul lebih tinggi dari permukaan gambut di sekitarnya. Karena kebakaran sering terjadi di sepanjang tanggul kanal, namun banyak dari tanah gambut tanggul dan batang kayu yang tertanam telah terbakar habis sehingga menurunkan tanggul hingga setinggi permukaan lahan gambut.
  - [11] Namun, terjadi penurunan aktivitas ini (batang yang ditebang per kilometer per bulan) selama periode tiga tahun ini.

## References

- Atwood EC, Enghart S, Lorenz E, Halle W, Wiedemann W, Siegert F (2016) Detection and characterization of low temperature peat fires during the 2015 fire catastrophe in Indonesia using a new high-sensitivity fire monitoring satellite sensor (FireBird) PloS one 11 (8), e0159410.
- Barber C, Schweithelm J (2000) Trial by Fire: Forest Fires and Forestry Policy in Indonesia's Era of Crisis and Reform. World Resources Institute, Washington DC.
- Betha R, Maharani P, Lestari P, Joshi UM, Reid JS, Balasubramanian R (2013) Chemical speciation of trace metals emitted from Indonesian peat fires for health risk assessment. Atmospheric Research 122, 571–8.
- Bompard JM, Guizol P (1999) Land management in the province of South Sumatra, Indonesia. Fanning the flames: the institutional causes of vegetation fires. European Union Forest Fire Prevention and Control Project, Palembang, Indonesia.
- Byron N, Shepherd G (1998) Indonesia and the 1997-98 El Niño: Fire problems and long-term solutions. Natural Resource Perspectives 28, 1–20.
- Carmenta R, Parry L, Blackburn A, Vermeylen S, Barlow J (2011) Understanding human-fire interactions in tropical forest regions: A case for interdisciplinary research across the natural and social sciences. Ecology and Society 16 (1), 53–75.
- Carmenta R, Zabala A, Daeli W, Phelps J (2017) Perceptions across scales of governance and the Indonesian peatland fires. Global Environmental Change 46, 50–9.
- Cattau ME, Harrison ME, Shinyo I, Tungau S, Uriarte M, DeFries R (2016) Sources of anthropogenic fire ignitions on the peat-swamp landscape in Kalimantan, Indonesia. Global Environmental Change 39, 205–19.
- Chen CC, Lin HW, Yu JY, Lo MH (2016) The 2015 Borneo fires: What have we learned from the 1997 and 2006 El Niños? Environmental Research Letters 11, 104003.
- Chokkalingam U, Kurniawan I, Ruchiat Y (2005) Fire, livelihoods, and environmental change in the Middle Mahakam peatlands, East Kalimantan. Ecology and Society 10 (1), 26–34.
- Cochrane MA (2003) Fire science for rainforests. Nature 421, 913–9. Cochrane MA (2009) Tropical Fire Ecology. Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg.
- Cole LES, Bhagwat SA, Willis KJ (2015) Long-term disturbance dynamics and resilience of tropical peat swamp forests. Journal of Ecology 103 (1), 16–30.
- Dargie G, Lewis S, Lawson IT, Page SE, Bocko YE, Ifo SA (2017) Age, extent, and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex. Nature 542, 86–90.
- Dennis RA, Mayer J, Applegate G et al. (2005) Fire, people and pixels: linking social science and remote sensing to understand underlying causes and impacts of fires in Indonesia. Human Ecology 33 (4), 465–504.
- Diprose R (2013) KFCP Participation and Benefits. Brief 1: KFCP Community Participation and Benefits 2010-2012. Indonesia-Australia Forest Carbon Partnership, Jakarta.
- Field RD, Shen SSP (2008) Predictability of carbon emissions from biomass burning in Indonesia from 1997 to 2006. Journal of Geophysical Research 113, G04024.
- Field RD, van der Werf GR, Fanin T et al. (2016) Indonesian fire activity and smoke pollution in 2015 show persistent nonlinear sensitivity to El Niño-induced drought. Proceedings of the National Academy of Sciences 113 (33), 9204–9.
- Gaveau DLA, Pirard R, Salim MA et al. (2016) Overlapping land claims limit the use of satellites to monitor no-deforestation commitments and no-burning compliance. Conservation Letters 10 (2), 257–64.
- Glauber AJ, Gunawan I (2016) The Cost of Fire: An Economic Analysis of Indonesia's 2015 Fire Crisis. World Bank, Jakarta, Indonesia.
- Goldstein JE (2016) Knowing the subterranean: land grabbing, oil palm, and divergent expertise in Indonesia's peat soil. Environment and Planning A 48 (4), 754–70.

- Goldstein JE (2020) Lots of smoke, but where's the fire? Contested causality and shifting blame in the Southeast Asian haze crisis. In Elinoff E, Vaughn T (eds) *Disastrous Times: Beyond Environmental Crisis in Asia*. University of Pennsylvania Press, Philadelphia.
- Graham LLB, Giesen W, Page SE (2016) A common-sense approach to tropical peat swamp forest restoration in Southeast Asia. *Restoration Ecology* 25, 312–21.
- Graham LLB, Manjin S, Juni ET, Waldram M, Masal F, Ichsan N, Faturochman, Applegate G (2014a) KFCP heavy fuel load assessment: line intersect method and heavy fuel load results. Scientific Report, Indonesia-Australia Forest Carbon Partnership (IAFCP), Jakarta.
- Graham LLB, Masal F, Manjin S, Juni ET (2014b) Hotspot monitoring, fire investigation and types and distribution of land assets in the KFCP area. Technical Report, Indonesia-Australia Forest Carbon Partnership (IAFCP), Jakarta.
- Harrison ME, Page SE, Limin SH (2009) The global impact of Indonesian forest fires. *Biologist* 56 (3), 156–63.
- Hoscilo A, Page SE, Tansey KJ, Rieley JO (2011) Effect of repeated fires on land-cover change on peatland in southern Central Kalimantan, Indonesia, from 1973 to 2005. *International Journal of Wildland Fire* 20 (4), 578–88.
- Hu Y, Fernandez-Anez N, Smith TEL, Rein G (2018) Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes. *Journal of the International Association of Wildland Fire* 27 (5), 293–312.
- Huang X, Restuccia F, Gramola M, Rein G (2016) Experimental study of the formation and collapse of an overhang in the lateral spread of smouldering peat fires. *Combustion and Flame* 168, 393–402.
- Huijnen V, Wooster MJ, Kaiser JW et al. (2016) Fire carbon emissions over maritime southeast Asia in 2015 largest since 1997. *Scientific Reports* 6, 26886.
- Ichsan N, Hooijer A, Vernimmen R, Applegate GB (2014) KFCP Hydrology and Peat Monitoring Methodology. Scientific Report. Kalimantan Forests and Climate Partnership. Indonesia-Australia Forest Carbon Partnership, Jakarta.
- Jayarathne T, Stockwell CE, Gilbert AA et al. (2018) Chemical characterization of fine particulate matter emitted by peat fires in Central Kalimantan, Indonesia, during the 2015 El Niño. *Atmospheric Chemistry & Physics* 18, 2585–600.
- Kim JS, Jeong SJ, Kug JS, Williams M (2019) Role of local air-sea interaction in fire activity over Equatorial Asia. *Geophysical Research Letters* 46 (24), 14789–97.
- Konecny K, Ballhorn U, Navratil P et al. (2016) Variable carbon losses from recurrent fires in drained tropical peatlands. *Global Change Biology* 22, 1469–80.
- Koplitz SN, Mickley LJ, Marlier ME et al. (2016) Public health impacts of the severe haze in Equatorial Asia in September–October 2015: demonstration of a new framework for informing fire management strategies to reduce downwind smoke exposure. *Environmental Research Letters* 11 (9), 094023.
- Lave R, Biermann C, Lane SN (2018) Introducing critical physical geography. In Lave R, Biermann C, Lane SN (eds) *The Palgrave Handbook of Critical Physical Geography* 3–21. Springer International Publishing, Cham.
- Marlier ME, DeFries R, Voulgarakis A et al. (2013) El Niño and health risks from landscape fire emissions in southeast Asia. *Nature Climate Change* 3, 131–6.
- Medrilzam M, Dargusch P, Herbohn J, Smith C (2014) The socio-ecological drivers of forest degradation in part of the tropical peatlands of Central Kalimantan, Indonesia. *Forestry* 87 (2), 335–45.
- Medrilzam M, Smith C, Aziz AA, Herbohn J, Dargusch P (2017) Smallholder farmers and the dynamics of degradation of peatland ecosystems in central Kalimantan, Indonesia. *Ecological Economics* 136, 101–13.
- Miettinen J, Shi C, Liew SC (2016) Land cover distribution in the peatlands of Peninsular Malaysia, Sumatra and Borneo in 2015 with changes since 1990. *Global Ecology and Conservation* 6, 67–78.
- Miettinen J, Shi C, Liew SC (2017) Fire distribution in Peninsular Malaysia, Sumatra and Borneo in 2015 with special emphasis on peatland fires. *Environmental Management* 60 (4), 747–57.
- Normile D (2019) Parched peatlands fuel Indonesia's blazes. *Science* 366 (6461), 18–9.
- Page SE, Hooijer A (2016) In the line of fire: the peatlands of Southeast Asia. *Philosophical Transactions: Biological Sciences* 371, 20150176.

- Page SE, Hoscilo A, Langner A et al. (2009) Tropical peatland fires in Southeast Asia. In Cochrane M (ed) *Tropical Fire Ecology*, 263–89. Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg.
- Page SE, Rieley JO, Banks CJ (2011) Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology* 17 (2),798–818.
- Purnomo H, Shantiko B, Sitorus S et al. (2017) Fire economy and actor network of forest and land fires in Indonesia. *Forest Policy and Economics* 78, 21–31.
- Rieley JO, Page SE (2005) *Wise Use of Tropical Peatlands: Focus on Southeast Asia*. Alterra Publishing, Wageningen, The Netherlands.
- Roos C, Bowman DMJS, Balch JK et al. (2014) Pyrogeography, historical ecology, and the human dimensions of fire regimes. *Journal of Biogeography* 41, 833–6.
- Smith TEL, Evers S, Yule CM, Gan JY (2018) In situ tropical peatland fire emissions factors and their variability, as determined by field measurements in peninsula Malaysia. *Global Biogeochemical Cycles* 3 (2),18–31.
- Stockwell CE, Jayarathne T, Cochrane MA et al. (2016) Field Measurements of trace gases and aerosols emitted by peat fires in Central Kalimantan, Indonesia, during the 2015 El Niño. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16, 11711–32.
- Sze JS, Lee JSH (2019) Evaluating the social and environmental factors behind the 2015 extreme fire event in Sumatra, Indonesia. *Environmental Research Letters* 14, 015001.
- Tacconi L, Vayda AP (2006) Slash and burn and fires in Indonesia: A comment. *Ecological Economics* 56 (1), 1–4.
- Taufik M, Setiawan BI, Van Lanen HAJ (2019) Increased fire hazard in human-modified wetlands in Southeast Asia. *Ambio* 48 (4), 363–73.
- Thornton SA, Dudin, Page SE, Upton C, Harrison ME (2018) Peatland fish of Sebangau, Borneo: Diversity, monitoring and conservation. *Mires and Peat* 22, 1–25.
- Turetsky MR, Benscoter B, Page S, Rein G, van der Werf GR, Watts A (2015) Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience* 8, 11–4.
- Usup A, Hashimoto Y, Takahashi H, Hayasaka H (2004) Combustion and thermal characteristics of peat fire in tropical peatland in Central Kalimantan, Indonesia. *Tropics* 14, 1–19.
- van der Werf GR, Randerson JT, Giglio L, et al. (2017) Global fire emissions estimates during 1997–2015. *Earth Systems Science Data* 9, 697–720.
- Vayda AP (2006) Causal explanation of Indonesian forest fires: concepts, applications, and research priorities. *Human Ecology* 34 (5), 615–35.
- Vetrita Y, Cochrane MA (2019) Annual Burned Area from Landsat, Mawas, Central Kalimantan, Indonesia, 1997-2015. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Available at: <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1708>.
- Vetrita Y, Cochrane MA (2020) Fire frequency and related land-use and land-cover changes in Indonesia's peatlands. *Remote Sensing* 12 (1), 5.
- Wagner CEV (1982) Practical aspects of the line intersect method. Information Report PI-X-12. Petawawa National Forestry Institute, Canadian Forest Service, Ottawa.
- Wooster MJ, Perry GLW, Zoumas A (2012) Fire, drought and El Niño relationships on Borneo (Southeast Asia) in the pre-MODIS era (1980–2000). *Biogeosciences* 9, 317–40.
- Wösten JHM, Clymans E, Page SE, Rieley JO, Limin SH (2008) Peat-water interrelationships in tropical peatland ecosystems in Southeast Asia. *Catena* 73, 212–24.
- Wösten JHM, Ritzema HP (2002) Challenges in land and water management for peatland development in Sarawak. In Rieley J, Page S (eds) *Peatlands for people: natural resource functions and sustainable management*. Proceedings of the International Symposium on Tropical Peatlands, 51–55. BPPT/IPA, Jakarta.
- Yulianti N, Hayasaka H (2013) Recent active fires under El Niño conditions in Kalimantan, Indonesia. *American Journal of Plant Sciences* 04 (03), 685–96.
- Ziegler AD, Gillen J, Newell B, Grundy-Warr C, Wasson, RJ (2013) *Comprehensive research in geography*. *Area* 45 (2), 252–4.