

## Neraca Air Ekosistem Hutan Alam Gambut di Kawasan Taman Nasional (TN) Zamrud, Semenanjung Kampar Riau (*Water Balance of Natural Peat Forest Ecosystems in Zamrud National Park Area, Kampar Peninsula Riau*)

Hatma Suryatmojo<sup>1\*</sup>, Muhammad Ali Imron<sup>2</sup>, Rizki Ahmad Arfri<sup>1</sup>, dan/and Maryani<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorium Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, Fakultas Kehutanan, Universitas Gadjah Mada, Jl. Agro No 1 Bulaksumur Yogyakarta, 55281, Indonesia. Telp. 0274-550542

<sup>2</sup>Laboratorium Pengelolaan Satwa Liar, Fakultas Kehutanan, Universitas Gadjah Mada, Jl. Agro No 1 Bulaksumur Yogyakarta, 55281, Indonesia. Telp. 0274-550542

Info artikel:	ABSTRACT
<b>Keywords:</b> Peatland ecosystem, evapotranspiration, runoff, water balance	<i>Peatland ecosystems have various functions, both hydrologically and ecologically. The utilization and land-use conversion have changed the ecosystem balance and caused various water management problems. Ecosystem restoration is one of the efforts to restore the water function of the peat ecosystem. The study aimed to determine the water balance condition in the peatland ecosystem with protection functions. The Thornthwaite Mather Water Balance application in the Peat Hydrological Sub-Unit in the Zamrud National Park showed the ability of natural forests to restore water reserves on earth through evapotranspiration process up to 72.5% of the annual rainfall. However, only 27.5% of the water is steady in the form of surplus water. The water deficit for evapotranspiration occurred from June to October, but the shortage can still be fulfilled by the presence of deposits in peat soil. The surplus of water that becomes subsurface flow and surface runoff is 75% of the total annual surplus. Meanwhile, the remaining water potential is only 25% of the annual surplus and is used to fill and maintain the groundwater level in the peat ecosystem. The water balance profile obtained in this study can be used as a reference for water balance management targets in peatland ecosystem restoration.</i>
<b>Kata kunci:</b> Ekosistem gambut, evapotranspirasi, limpasan, neraca air	<b>ABSTRAK</b> Ekosistem lahan gambut memiliki berbagai fungsi, baik secara hidrologis maupun ekologis. Pemanfaatan dan alih fungsi lahan gambut untuk kepentingan pembangunan dan produksi, telah mengubah keseimbangan ekosistem dan menimbulkan berbagai permasalahan terkait tata airnya. Restorasi ekosistem menjadi salah satu upaya untuk pemulihan fungsi tata air ekosistem gambut. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kondisi neraca air pada kawasan dengan fungsi lindung ekosistem gambut. Hasil penerapan <i>Thornthwaite Mather Water Balance</i> pada Sub Kesatuan Hidrologi Gambut di Taman Nasional Zamrud menunjukkan bahwa, kemampuan hutan alam dalam mengembalikan cadangan air di bumi melalui proses evapotranspirasi mencapai 72,5% dari hujan tahunan, dan yang tertinggal dalam wujud surplus air hanya 27,5%. Defisit air untuk kebutuhan evapotranspirasi terjadi pada bulan Juni hingga Oktober, namun kekurangan tersebut masih dapat tercukupi dari adanya simpanan pada tanah gambut. Surplus air yang menjadi aliran bawah permukaan dan aliran permukaan adalah sebesar 75% dari total surplus tahunan. Sementara itu, potensi air yang tetap tinggal hanya 25% dari surplus tahunan, dan dipergunakan untuk mengisi dan mempertahankan tinggi muka air tanah pada ekosistem gambut. Profil neraca air yang diperoleh pada penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi target pengelolaan neraca air pada kegiatan restorasi ekosistem gambut.
<b>Riwayat artikel:</b> Tanggal diterima: 29 Juni 2021; Tanggal direvisi: 10 September 2021; Tanggal disetujui: 14 Desember 2021	

Editor: Dr. Budi Hadi Narendra, S.Hut., M.Sc

Korespondensi penulis: Hatma Suryatmojo\* (E-mail: [hsuryatmojo@ugm.ac.id](mailto:hsuryatmojo@ugm.ac.id))

Kontribusi penulis: **HS**: melakukan pengukuran lapangan, analisis data dan menulis artikel lengkap; **MAI**: melakukan pengukuran lapangan dan analisis data; **RAA** dan **M**: melakukan pengukuran lapangan, tabulasi dan analisis data

<https://doi.org/10.20886/jphka.2022.19.1.85-100>

©JPHKA - 2018 is Open access under CC BY-NC-SA license



## 1. Pendahuluan

Luas hutan rawa gambut ombrotropik secara global adalah 44.102.500 ha, terdistribusi di Asia Tenggara seluas 24.777.800 ha (Page, Rieley, & Banks, 2011). Indonesia memiliki lahan gambut terluas di wilayah Asia Tenggara (Yoshino, Ishida, Nagano, & Setiawan, 2010) yakni mencapai 14,9 juta ha, terdistribusi seluas ±6,44 juta ha di Sumatera, ±4,77 juta ha di Kalimantan, dan ±3,69 juta ha di Papua (Ritung et al., 2011). Luas lahan gambut berdasarkan Peta Lahan Gambut skala 1:50.000 adalah 13,4 juta ha, atau mengalami penyusutan 1,5 juta ha berdasarkan data tahun 2011 yang menggunakan skala peta 1:250.000 (Kementan, 2019). Lahan gambut Indonesia dikelola berdasarkan sistem Kesatuan Hidrologi Gambut (KHG), dan memiliki 865 KHG dengan luas total 24.667.804 ha (Tabel 1).

Lahan gambut yang terbentuk secara alamiah dicirikan dengan kondisi ekosistem yang selalu basah, memiliki fungsi sebagai pengatur air dan media penyimpan air. Secara hidrologis, wilayah gambut berfungsi sebagai daerah tangkapan air, daerah simpanan air bagi daerah hilir, sistem kontrol, pengatur fluktuasi air, pencegah banjir dan pencegah terjadinya penggaraman air (*saline water intrusion*) (Soewandita, 2011; Acreman & Holden, 2013). Material gambut yang masih alami (tidak terganggu), 90% terdiri dari air, dan 10% sisanya merupakan sisa bahan organik yang mengalami dekomposisi (Jaenicke, Wösten, Budiman, & Siegert, 2010). Oleh karenanya gambut dalam

kondisi alami akan selalu dalam kondisi basah dan lembap yang berfungsi sebagai pengatur dan penyimpan air. Oleh karena itu, proses hidrologi sangat penting dalam pengelolaan lahan gambut (Labadz et al., 2010).

Tingginya laju konversi lahan gambut untuk berbagai kepentingan yang tidak sesuai dengan peruntukannya, menyebabkan lahan gambut menjadi terdegradasi dan terus menerus menghasilkan emisi gas rumah kaca, mengalami penurunan fungsi hidrologi, produksi, dan ekologi (BBSDLP, 2013). Sebagian besar lahan gambut tersebut diperuntukkan bagi perkebunan sawit dan hutan tanaman industri, yang pembukaan lahannya disertai dengan pembuatan drainase berupa saluran dengan lebar hingga 25 m, sedalam 4,5 m, dan digali menggunakan eskavator (Page et al., 2004). Hal ini akan mempercepat terjadinya penurunan tanah, pemasaman tanah dan air (Noor, 2010; Evans et al., 2019), serta turut berkontribusi terhadap kemudahan lahan gambut untuk terbakar di musim kemarau, dan banjir pada musim hujan (Jayachandran, 2009; Hayasaka, Noguchi, Putra, Yulianti, & Vadreyu, 2014). Dampak lainnya adalah terjadinya kepadatan tanah (Hoojer et al., 2012; Kononen, Jauhiainen, Laiho, Kusin & Vasander, 2015), dan perubahan pola hidrologi secara ekstrim yang ditandai dengan terjadinya penurunan tinggi muka air tanah (TMAT) secara drastis terutama di sekitar kanal (Applegate, Hooijer, Mulyadi, Ichsan, & Van der Vat, 2012).

Tabel (Table) 1. Distribusi KHG di Indonesia (*Distribution of Peatland Hydrological Area/PHA in Indonesia*)

Pulau (Island)	Jumlah KHG (Total number of PHA)	Luas (Area) (Ha)	Persentase (Percentage) (%)
Sumatera	207	9.604.529	38,93
Kalimantan	190	8.404.818	34,09
Sulawesi	3	63.290	0,25
Papua	465	6.595.167	26,73
Total	865	24.667.804	100

Sumber (Source): SK.130/MENLHK /SETJEN/PKL.0/2/2017 tentang Penetapan Peta Fungsi Ekosistem Gambut Nasional, Indonesia

Untuk mengurangi luas lahan gambut terdegradasi, diperlukan upaya restorasi guna memperbaiki respon hidrologi lahan gambut yang mengarah ke kondisi alaminya. Strategi restorasi lahan gambut dilakukan melalui pendekatan 3-R, yaitu pembasahan kembali (*Re-wetting*), penanaman kembali (*Re-vegetation*), dan revitalisasi mata pencaharian (*Re-vitalization of livelihood*) (Dohong, 2017). Program *re-wetting* yang bertujuan untuk merehabilitasi secara hidrologi lahan gambut ke kondisi alamiahnya dilakukan dengan penyekatan kanal (*canal blocking*), penimbunan kanal, dan pembangunan sumur bor. Teknik penyekatan kanal memungkinkan untuk menghambat kecepatan aliran dan menampung air di kanal sehingga terinfiltrasi untuk membasahi lahan gambut (Dohong, 2017; Ritzema, Limin, Kusin, Jauhiainen, & Wösten, 2014). Penanaman kembali (*re-vegetation*) tutupan pohon sangat berguna untuk menjaga lahan gambut baru dalam kondisi tetap lembap atau basah, dan spesies yang paling sesuai untuk ditanam di area yang dibasahi adalah yang termasuk dalam flora hutan rawa gambut asli.

Dalam memahami respon hidrologi pada sebuah lanskap, menentukan neraca air dan variabel terkait adalah sangat penting untuk mengetahui referensi dan profil siklus air yang dapat digunakan sebagai indikator dan target hasil restorasi gambut. Propinsi Riau memiliki jumlah KHG terbanyak di Sumatera, yaitu 59 KHG dengan luas 5.355.374 ha atau 55,75% dari luas Provinsi Riau (SK KLHK No. 130, 2017). Ekosistem hutan alam gambut yang tersisa di Propinsi Riau salah satunya terdapat di kawasan Taman Nasional (TN) Zamrud dengan luas 31.480 ha (Desmiwita & Surati, 2017). Perubahan penggunaan lahan gambut yang masif di Provinsi Riau menyebabkan rujukan ekosistem hutan

alam hanya tersisa di kawasan TN Zamrud. Informasi profil neraca air di TN Zamrud yang memiliki fungsi lindung ekosistem gambut akan menjadi referensi penting dalam proses restorasi ekosistem gambut di Provinsi Riau.

Peran tutupan vegetasi dan simpanan biomassa ekosistem gambut memegang peranan penting menjaga keseimbangan tata air kawasan dalam kesatuan hidrologi gambut di Semenanjung Kampar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui profil neraca air pada ekosistem hutan alam gambut yang tersisa di TN Zamrud, Riau. Penelitian ini akan menjadi referensi untuk program pemulihan dan pengelolaan ekosistem gambut yang membutuhkan rekomendasi pengelolaan tata air, perencanaan revegetasi hingga pengelolaan lingkungan dan masyarakatnya. Analisis neraca air (*water balance*) akan menghasilkan informasi potensi evapotranspirasi dan limpasan permukaan pada kondisi ekosistem alami. Analisis neraca air pada lahan gambut merupakan analisis yang sangat penting untuk mengetahui kondisi kuantitas air secara spasial dan temporal. Informasi ini sangat bermanfaat untuk manajemen tata air di lahan gambut mengingat kelestarian ekosistem gambut sangat tergantung pada keseimbangan tata airnya. Dengan memahami keseimbangan neraca air pada ekosistem gambut alami, dapat menjadi referensi dalam pengelolaan tata air kawasan gambut yang akan direstorasi untuk pemulihan ekosistem dan fungsinya.

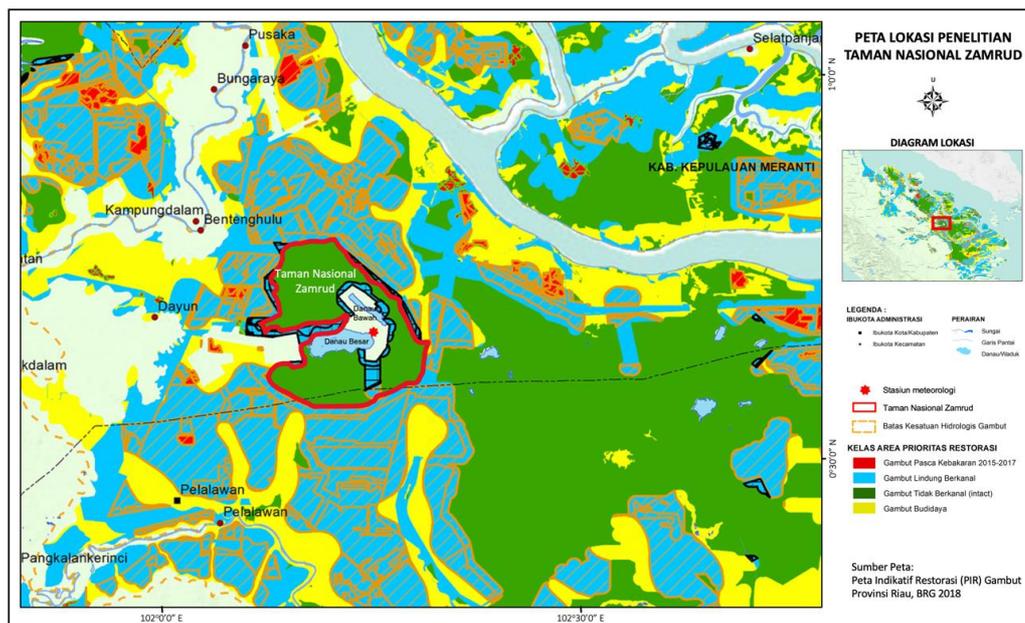
## 2. Metodologi

### 2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di kawasan TN Zamrud seluas 31.480 Ha yang terletak di Kecamatan Dayun, Kabupaten Siak, Provinsi Riau. Secara geografis kawasan tersebut terletak pada titik koordinat 00° 35" - 00° 45" LU dan 102°10" - 102° 29" BT. TN Zamrud memiliki dua danau berdampingan, yaitu

Danau Pulau Besar yang mempunyai empat pulau yaitu Pulau Besar, Pulau Tengah, Pulau Bungsu, serta Pulau Beruk, serta Danau Bawah yang alirannya dihubungkan oleh Sungai Rasau. Peralatan stasiun hidrometeorologi ditempatkan pada bagian tengah dari TN Zamrud yang mudah diakses untuk memperoleh data dan informasi yang representatif (Gambar 1 dan 2).

Pada lokasi penelitian di dalam kawasan TN Zamrud, dipasang peralatan pengukur cuaca (hujan, suhu, kelembapan, kecepatan dan arah angin, tinggi muka air sungai) dan ditempatkan pada aliran sungai yang menghubungkan Danau Pulau Besar dan Danau Bawah (Gambar 2).



Gambar (Figure) 1. Lokasi penelitian di kawasan TN Zamrud (*Research location in the Zamrud National Park*) (Sumber/source: BRG, 2018)



Gambar (Figure) 2. Stasiun hidrometeorologi (*Hydrometeorological station*) (Sumber /source: foto pribadi)

TN Zamrud merupakan bagian dari Kesatuan Hidrologi Gambut (KHG) Semenanjung Kampar yang memiliki karakter hidrologi yang berupa aliran sungai yang bersifat alamiah dan aliran kanal dengan pola pengaliran dari pertemuan antara aliran alamiah dan aliran kanal (Pramono, Bintal, Syafriadiman, & Radith, 2015). Kawasan ini berada di antara dua sungai besar, yaitu Sungai Kampar dan Siak. Berdasar data pengukuran pada stasiun hidrometeorologi yang dipasang dalam kawasan TN Zamrud (Gambar 2), curah hujan pada tahun 2018-2019 sebesar 3.213 mm/tahun dengan suhu rata-rata bulanan mencapai 29,47°C.

Kedalaman gambut pada lokasi pengamatan mencapai 10 - 14 m dan termasuk gambut dalam, sebagai bagian dari kubah gambut Zamrud. Warna lapisan humus didominasi oleh warna tanah 10R 3/4 (*Dusky Red*), pada kedalaman 20 cm warnanya 10R 2.5 / 2 (*Very Dusky Red*) dan pada kedalaman 40 cm warnanya 2.5R 3/2 (*Dusky Red*). Kemampuan menyerap dan menyimpan air ditunjukkan dengan kadar air yang tinggi pada berbagai lapisan tanah gambut. Pada kedalaman 20 cm memiliki kadar air rata-rata sekitar 627,85-766,92% dan pada kedalaman 40 cm berkisar 823,15-845,86% (Maryani et al., 2020).

Hasil pengukuran pada Petak Ukur Permanen (PUP) menunjukkan jumlah semai yang melimpah, hal ini menjadi indikasi untuk proses regenerasi vegetasi yang baik. Kerapatan jumlah setiap tingkat pertumbuhan dari semai hingga pohon yang mengecil menunjukkan keragaman tingkat pertumbuhan yang tinggi dan ruang pertumbuhan yang ideal, kerapatan pohon yang rendah memberikan ruang bagi pancang, tiang dan semai untuk tumbuh. Sementara itu, dominasi jenis yang ditemukan pada semua tingkatan pertumbuhan dalam PUP adalah *Shorea uliginosa* dan *Ganua motleyana* (Maryani et al., 2020).

Kerapatan vegetasi pada hutan alam gambut memiliki potensi penyimpanan karbon yang tinggi dari potensi biomassa atas permukaan rawa gambut. Rerata biomassa atas permukaan hutan rawa gambut untuk plot-plot yang belum ditebang adalah sebesar 248,59 ton/ha (Nugroho, 2014). Kandungan potensi biomassa gambut memiliki peran dalam penyimpanan air yang besar untuk berkontribusi mengendalikan tata air.

## 2.2. Pengumpulan Data

Pengamatan data hidrometeorologi dilakukan pada periode 2018-2019. Data primer meteorologi meliputi curah hujan, kecepatan dan arah angin, suhu udara, yang bersumber dari stasiun cuaca pada dermaga sungai Rasau (Gambar 2). Data yang diunduh selanjutnya ditabulasi menjadi data bulanan untuk penghitungan neraca air. Informasi mengenai jenis penutupan lahan dominan dan kedalaman perakaran diperoleh dari hasil pengamatan di lapangan, sementara data sekunder berupa tekstur tanah diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya (Maryani et al, 2020).

Batasan analisis neraca air pada ekosistem gambut didasarkan pada Batasan sistem hidrologi lahan gambut (*peatland*). Batasan sistem hidrologi untuk analisis neraca air pada lahan gambut adalah kesatuan hidrologi gambut (KHG), atau sub KHG. Sedangkan batasan sistem hidrologi untuk analisis neraca air pada lahan upland adalah daerah aliran sungai (DAS), atau sub-DAS. Prinsip umum dari persamaan neraca air pada kawasan hutan adalah total masukan (input) seimbang atau sama dengan total keluar (*output*) dalam kurun waktu tertentu, yang ditunjukkan pada persamaan 1 (Astuti, Suyono & Suryatmojo, 2016).

$$P = E_p + I_c + I_f + ST + RO + GW \quad (1)$$

Keterangan (*Remarks*):

P = Hujan (*Precipitation*)

Ep = Evapotranspirasi  
(*Evapotranspiration*)  
Ic = Intersepsi tajuk (*Canopy Interception*)  
If = Infiltrasi (*Infiltration*)  
ST = Tampungang lengas tanah (*soil moisture storage*)  
RO = Limpasan permukaan (*Runoff*)  
GW = Air tanah (*ground water*)

Pendekatan umum neraca air yang disampaikan pada persamaan 1 digunakan sebagai dasar pendekatan pengembangan neraca air secara hidrometeorologis yang dikembangkan dalam *Thornthwaite Mather Water Balance* (TMWB). Pendekatan neraca air menurut metode TMWB ini tidak mempertimbangkan intersepsi. TMWB menggunakan dua komponen utama yaitu nilai evapotranspirasi dan nilai total limpasan sebagai air surplus seperti yang disajikan pada persamaan 2. Air surplus terdiri dari komponen limpasan dan hasil tahanan air (*detention*) sebagai air yang digunakan untuk pengisian air tanah.

$$P = EA + TARO \quad (2)$$

Keterangan (*Remarks*):

P = Hujan (*Precipitation*)  
EA = Evapotranspirasi aktual (*Actual Evapotranspiration*)  
TARO = Total limpasan sebagai air surplus (*Total water available for runoff*)

Pendekatan neraca air menggunakan penghitungan lengas tanah yang digunakan untuk memperoleh nilai evapotranspirasi (Calvo, 1986). Metode ini dimulai dengan melakukan penghitungan nilai evapotranspirasi potensial bulanan.

$$PE = 16 \left( 10 \frac{T}{I} \right)^a \quad (3)$$

Keterangan (*Remarks*):

PE = evapotranspirasi potensial bulanan (*Monthly potential evapotranspiration*)  
T = suhu rata-rata bulanan (*monthly average temperature*)  
I = indek panas pada lokasi pengamatan, yang merupakan jumlah dari 12 indeks panas bulanan (i) yang diperoleh dari penghitungan  $i = (T/5)^{1.514}$ , dan a adalah fungsi kubik dari I (*cubic function of I*) yang dihitung dengan  
$$a = 675 * 10^{-9} I^3 - 771 * 10^{-7} I^2 + 1792 * 10^{-5} I + 0,49239$$

Analisa neraca air suatu kawasan bervegetasi membutuhkan data spesifik sebagai berikut:

- Lokasi geografis (Lintang) dari marking GPS di lapangan
- Rerata suhu bulanan dari tabulasi data stasiun meteorologi
- Hujan bulanan dari tabulasi data stasiun meteorologi
- Nilai konversi koefisien *runoff* dari referensi penelitian sebelumnya
- Kapasitas penyimpanan air berdasarkan karakteristik tanah dan sistem perakaran dari pengamatan lapangan.

Input yang bervariasi secara temporer adalah curah hujan bulanan (P) dan evapotranspirasi potensial (PE<sub>t</sub>) dalam milimeter. Kapasitas kelembapan tanah lapangan (ST<sub>f</sub>) bervariasi sebagai fungsi dari tekstur tanah dan kedalaman perakaran tanaman (diperkirakan dari informasi umum tentang jenis vegetasi), yang digunakan untuk menghitung penyimpanan air (ST).

Nilai perbedaan potensial evapotranspirasi dan presipitasi (P-PE<sub>t</sub>) negatif ketika ada potensi defisit air, sementara nilai P-PE<sub>t</sub> positif mewakili potensi surplus air. Jika nilai P-PE<sub>t</sub> kurang dari nol, bulannya disebut "bulan kering" dan dikenakan nilai akumulasi

kehilangan air potensial (APWL). Sementara nilai  $P - PE_t$  lebih dari nol, bulannya disebut sebagai "bulan basah" dan dikenakan nilai surplus. APWL adalah jumlah nilai negatif dari perbedaan  $P - PE_t$ , diakumulasi dari 1 bulan ke bulan berikutnya selama periode 1 tahun. Kelembapan tanah memiliki nilai maksimum sebesar  $ST_t$ . Status kelembapan tanah tergantung pada APWL, yang dihitung dengan dua metode berbeda yang tergantung pada apakah penguapan potensial lebih besar atau kurang dari curah hujan kumulatif.

APWL dihitung secara bertahap berdasarkan perbedaan curah hujan evapotranspirasi potensial ( $\sum P$ ).

$$APWL_t = APWL_{t-\Delta t} + (\sum PE_t - \sum P) \quad (4)$$

$APWL_t$  adalah akumulasi kehilangan air potensial pada waktu  $t$  (mm),  $APWL_{t-\Delta t}$  adalah akumulasi kehilangan air potensial pada waktu  $t - \Delta t$  (yaitu, bulan sebelumnya; mm),  $\sum PE_t$  adalah evapotranspirasi kumulatif selama periode waktu  $\Delta t$  (mm), dan  $\sum P$  adalah curah hujan kumulatif selama periode waktu  $\Delta t$  (mm).

Hubungan antara APWL dan jumlah air yang disimpan di zona akar dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$ST_t = ST_f \left[ \exp \left( \frac{-APWL_t}{ST_f} \right) \right] \quad (5)$$

$ST_t$  adalah air tersedia yang disimpan di zona perakaran pada waktu  $t$  (mm) dan  $ST_f$  adalah penyimpanan air yang tersedia pada kapasitas lapang di zona perakaran (mm).

Bulan ketika penguapan potensial kurang dari curah hujan ( $P$ ), penyimpanan di dalam tanah dihitung sebagai perbedaan antara evapotranspirasi potensial dan curah hujan terukur:

$$ST_t = ST_{f-\Delta t} + (-\sum P - \sum PE_t) \quad (6)$$

Jika  $ST_t$  penyimpanan pada waktu  $t$  lebih tinggi dari kapasitas lapang, maka perkolasi (*Recht*) hanya dihitung sebagai:

$$Rech_t = ST_t - ST_{f-\Delta t} + \sum P - \sum PE_t \quad (7)$$

dan APWL dinyatakan sama dengan nol. Sebaliknya, jika kadar air di zona akar tidak mencapai kapasitas lapang, APWL dapat ditemukan dengan menggabungkan persamaan  $ST_t$ , dan perkolasi tidak akan terjadi dalam situasi berikut.

$$APWL_t = -ST_t \ln \left[ \frac{(ST_{t-\Delta t} + \sum P - \sum PE_t)}{ST_f} \right] \quad (8)$$

APWL adalah penjumlahan nilai negatif dari selisih  $\sum P - \sum PE_t$  yang diakumulasi dari 1 bulan ke bulan berikutnya. Kelembapan tanah, air tersedia yang tersimpan di zona perakaran ( $ST$ ), memiliki nilai maksimum sebesar kapasitas lengas tanah lapangan (*Field Soil Moisture Content*, *FSMC*) dan menurun sebagai fungsi APWL. Data ini kemudian digunakan untuk menghitung evapotranspirasi aktual ( $\sum AE_t$ ).

$$\begin{aligned} \sum P > \sum PE_t &\rightarrow \sum AE_t = \sum PE_t \\ \sum P < \sum PE_t &\rightarrow \sum AE_t = \sum P - \Delta S_t \end{aligned} \quad (9)$$

*Soil moisture deficit* ( $D$ ) dinyatakan sebagai perbedaan antara evapotranspirasi aktual dan evapotranspirasi potensial. Ketika kelembapan tanah mencapai kapasitas kelembapan tanah maksimum, yaitu kapasitas air aktual (*actual water content*, *AWC*), setiap curah hujan berlebih menjadi nilai lebih, sehingga membuat nilai surplus ( $S$ ) sama dengan  $P - PE$ .

$$\begin{aligned} D &= \sum PE_t - \sum AE_t \\ S &= \sum P - \sum PE_t \end{aligned} \quad (10)$$

TMWB menyarankan bahwa hanya ada 50% dari kelebihan air di daerah tangkapan air yang akan menjadi limpasan setiap bulan. Sejumlah 50% sisanya diasumsikan ditahan dan akan

menjadi limpasan selama bulan berikutnya.

$$\sum RO_t = 50\% \sum S_t + 50\% \sum S_{t-1} \quad (11)$$

Hasil perhitungan digunakan untuk memperkirakan total limpasan (*Total water available for runoff*, TARO) sebagai air surplus. Limpasan (*Runoff*, RO) adalah total aliran dan air yang tertahan (*detention*) sebagai tampungan sementara (*temporary storage*), yaitu lengas tanah berlebih (*surplus soil moisture*). *Water detention* (DET) adalah air yang tertahan untuk persediaan air tanah. DET sama dengan bagian TARO yang tersisa dan mewakili penyimpanan air sementara, permukaan air tanah yang naik, dan jenuh tanah yang berlebihan.

Informasi dan perhitungan evapotranspirasi aktual digunakan untuk mendapatkan air total yang tersedia untuk limpasan (*Runoff*) sebagai air berlebih (surplus) setelah terjadi proses intersepsi dan evapotranspirasi (Suryatmojo et al., 2013). Pada lanskap ekosistem alami gambut yang tidak terganggu oleh adanya drainase, *runoff* mewakili penyimpanan air sementara sebagai genangan permukaan dan dihitung sebagai air yang tersimpan.

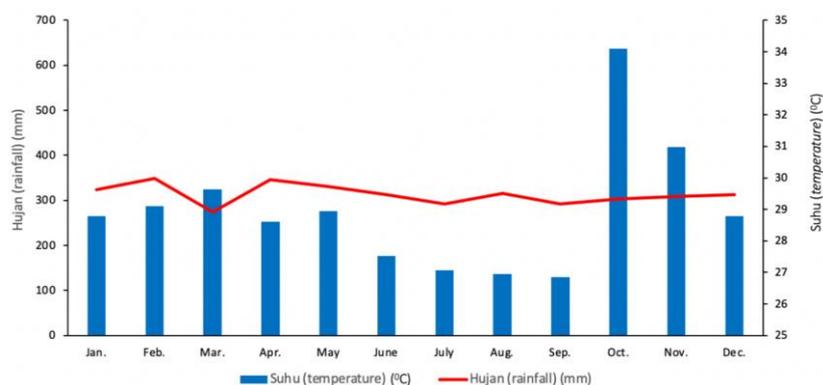
Dalam analisis TMWB, salah satu faktor penting yang harus ditetapkan adalah nilai koefisien limpasan (k). Koefisien limpasan merupakan persentase kelebihan air (setelah

dikurangi antara hujan dan evapotranspirasi aktual) yang akan melimpas sebagai limpasan. Kalibrasi nilai koefisien limpasan (k) diperlukan untuk mendekati hasil debit limpasan langsung yang diamati di lapangan. Asumsi yang dibangun dalam TMWB adalah 50% dari kelebihan air di daerah tangkapan air akan menjadi limpasan setiap bulan, dan 50% sisanya ditahan yang akan menjadi limpasan di bulan berikutnya. Asumsi ini sudah banyak digunakan dan dibuktikan efektivitasnya, terutama pada tanah mineral (Suryatmojo et al., 2013). Namun pada tanah gambut, masih membutuhkan dukungan bukti kalibrasi yang lebih kuat lagi. Hasil penelitian yang dilakukan di Sub KHG 1 Pulau Tebing Tinggi, Kabupaten Kepulauan Meranti, Provinsi Riau, diperoleh nilai koefisien limpasan (k=0,5) yang memiliki tingkat korelasi paling tinggi dengan data pengukuran lapangan (Sutikno et al., 2020). Penelitian ini menggunakan nilai k pada lahan gambut di Riau tersebut.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Karakteristik Iklim

Hasil perekaman sensor meteorologi selama tahun 2018 menunjukkan jumlah hujan bulanan dan rerata suhu bulanan seperti yang disajikan pada Gambar 3.



Sumber (*Source*): stasiun hidrometeorologi (*hydrometeorological station*).

Gambar (*Figure*) 3. Hujan bulanan dan rerata suhu bulanan (*Monthly precipitation and average monthly temperature*)

Menurut sistem klasifikasi iklim hutan Schmidt dan Ferguson, wilayah TN Zamrud termasuk dalam klasifikasi hutan hujan tropis tipe A (sangat basah) (curah hujan bulanan >100 mm). Curah hujan tahun 2018 yang diperoleh pada stasiun meteorologi (Gambar 3) adalah 3.313 mm, dengan rata curah hujan bulanan tertinggi (636 mm) terjadi pada bulan Oktober dan curah hujan bulanan terendah (191 mm) terjadi pada bulan Maret. Suhu rata-rata bulanan adalah 29°C - 30°C yang menunjukkan indeks panas yang tinggi dan merata sepanjang tahunakibat lokasi penelitian berada dekat dengan garis katulistiwa.

### 3.2. Neraca air hutan alam gambut

Metode TMWB cocok digunakan untuk kepentingan penelitian, pengelolaan, klasifikasi hingga deskripsi profil neraca air suatu wilayah (Black, 1996). Hasil perbandingan antara

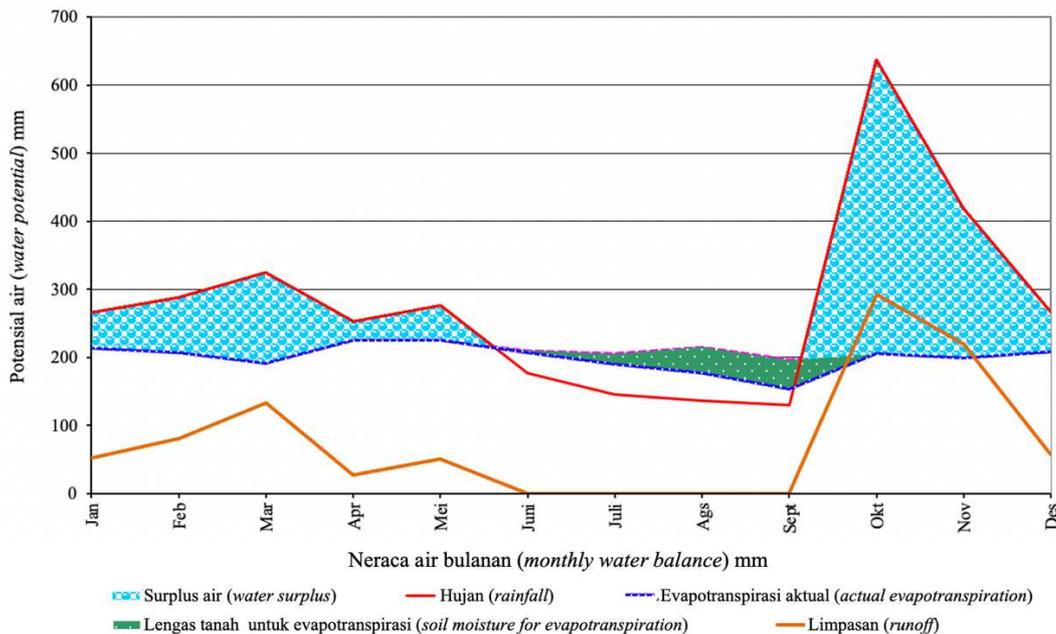
penghitungan neraca air menggunakan metode TMWB dengan penghitungan menggunakan sensor hidrometeorologi lapangan pada *tower flux* menunjukkan perbedaan hasil yang tidak signifikan pada hasil penghitungan nilai evapotranspirasi dan potensial *runoff* (Suryatmojo et al., 2013). Penutupan lahan di TN Zamrud berupa hutan alam gambut dengan tekstur tanah lempung berdebu (Maryani et al., 2020) dengan nilai air tersedia 200 mm/m dan kedalaman perakaran dari pengamatan lapangan pada beberapa pohon yang rubuh dan penggalian profil perakaran, menunjukkan rerata 1 m. Nilai  $ST_f$  diperoleh dari perkalian antara nilai air tersedia dan kedalaman rerata perakaran, maka nilai  $ST_f$  yang diperoleh adalah 200 mm. Hasil penghitungan neraca air pada kawasan hutan alam gambut di TN Zamrud tahun 2018 ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 4.

Tabel (Table) 2. Neraca air bulanan (*Monthly water balance*)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Juni	Juli	Ags.	Sept.	Okt.	Nov.	Des.	Total
P (mm)	265	287	324	251	275	177	145	135	129	636	419	265	3.313
T (°C)	29,6	30	28,9	30	29,7	29,5	29,2	29,5	29,2	29,3	29,4	29,5	
PEt (mm)	213	206	191	225	225	210	205	215	195	204	196	208	2.500
APWL (mm)	0	0	0	0	0	-32,9	-93,1	-172,6	-238,7	0	0	0	
St (mm)	200	200	200	200	200	169,7	125,6	84,4	60,6	200	200	200	
$\Delta St$ (mm)	0	0	0	0	0	-30,3	-44,1	-41,2	-23,8	139,4	0	0	
Aet (mm)	213	206	191	255	225	207	189	177	153	204	199	208	2.401
D (mm)	0	0	0	0	0	2,6	16,1	38,3	42,4	0	0	0	99
S (mm)	53	80,7	133,2	26,6	50,2	0	0	0	0	292	219,6	57,4	912
RO (mm)	52	80	133	26,6	50,2	12,5	0	0	0	292	220	57,4	684
DET (mm)	11,7	27,3	46,4	0	18,4	0	0	0	0	146	36,7	0	286

Sumber (Source): Analisis data

Keterangan (remarks): P = hujan (*rainfall*), t = suhu (*temperature*), PEt = evapotranspirasi potensial (*potential evapotranspiration*), APWL = akumulasi kehilangan air potensial (*accumulated potential water loss*), St = kapasitas simpanan air (*water storage*),  $\Delta St$  = Perbedaan kapasitas simpanan air bulanan (*gap water storage*), AEt = evapotranspirasi aktual (*actual evapotranspiration*), D = defisit (*deficit*), S = surplus air (*water surplus*), RO = limpasan (*runoff*), DET = pengisian air tanah (*groundwater detention*)



Sumber (Source): Tabel 2.

Gambar (Figure) 4. Neraca air bulanan (Monthly water balance)

Tabel 2 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai evapotranspirasi (*Actual evapotranspiration*) pada ekosistem hutan alam gambut di TN Zamrud sangat tinggi, hingga mencapai 2.401 mm atau 72,5% dari hujan tahunan. Defisit bulanan teridentifikasi terjadi pada bulan Juni-Oktober, namun besaran nilai defisit masih tergolong rendah akibat masih tersedianya simpanan air pada ekosistem hutan alam gambut dalam nilai surplus yang mencapai 912 mm atau 27,5% dari hujan tahunannya. Jumlah dari surplus air yang kemudian potensial untuk menjadi limpasan dalam aliran bawah permukaan dan aliran permukaan sebesar 75% dari surplus tahunan. Hal ini mengindikasikan bahwa ekosistem hutan alam gambut memiliki peran yang sangat besar dalam pengendalian daur air kawasan dan mengelola masukan hujan yang tinggi setiap bulannya.

Hutan gambut berperan sebagai peredam panas atau mereduksi suhu (Jauhainen, Kerojoki, Silvennoinen, Limin, & Vasand, 2014), sehingga proses evaporasi dari permukaan tanah di bawah tegakan hutan bernilai kecil. Seresah dan tumbuhan bawah dapat menghalangi

pancaran sinar radiasi matahari mencapai permukaan tanah dan mencegah gerakan udara di atasnya (Asdak, 2007). Hal ini menyebabkan pengeluaran air tanah di hutan TN Zamrud berjalan lambat sehingga tutupan vegetasi yang rapat di TN Zamrud dianggap sangat berpengaruh dalam menjaga kestabilan TMAT (Suryatmojo, Imron, Satriagasa, Saputra, & Maryani, 2019).

Evapotranspirasi yang tinggi membantu kestabilan muka air gambut, sehingga ketika terjadi hujan, ekosistem gambut masih mampu menampung dan menyimpan masukan hujan tersebut, dan mengurangi genangan berlebih. Selama empat bulan (Juni-September) tidak terdapat surplus yang artinya pada rentang waktu tersebut, kebutuhan evapotranspirasi dipenuhi oleh tampungan air pada ekosistem gambut, sehingga ketika terdapat masukan hujan yang besar pada bulan Oktober (636,4 mm), ekosistem hutan alam gambut dapat mengendalikan limpasannya.

Limpasan yang digunakan sebagai simpanan pada ekosistem hutan alam gambut memiliki nilai yang kecil yaitu 912 mm atau hanya 27,5% dari hujan

tahunan. Hal ini menunjukkan bahwa masukan hujan yang jatuh pada kawasan tersebut, mayoritas digunakan untuk memenuhi kebutuhan evapotranspirasi. Bukti tersebut menunjukkan peran penting ekosistem hutan alam gambut dalam mengendalikan daur air kawasan.

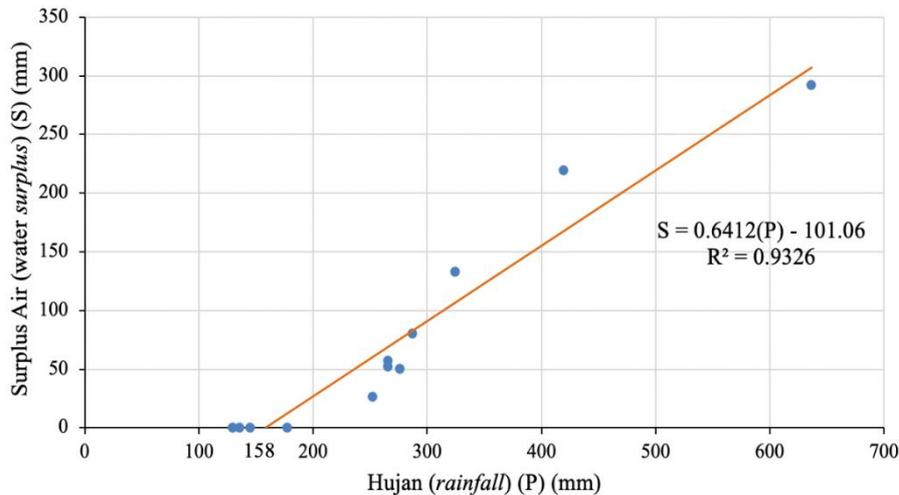
### 3.3. Hubungan hujan dengan potensial limpasan

Variasi curah hujan bulanan digunakan untuk menguji langsung hubungan antara curah hujan dan potensial limpasan. Penelitian ini tidak melakukan penghitungan debit pada sungai, sehingga hanya mengandalkan dari hasil penghitungan potensial limpasan/*runoff* dari TMWB. Limpasan yang diperoleh diasumsikan tidak hanya limpasan permukaan saja tetapi juga memasukkan simpanan aliran bawah permukaan yang menyebabkan fluktuasi muka air tanah. Gambar 5 menunjukkan hubungan linier antara curah hujan bulanan dengan surplus air pada ekosistem hutan alam gambut. Gambar 6 menunjukkan hubungan linier antara curah hujan dengan potensial limpasan/*runoff*.

Persamaan pada Gambar 5 menunjukkan bahwa ekosistem hutan alam gambut di TN Zamrud membutuhkan curah hujan bulanan

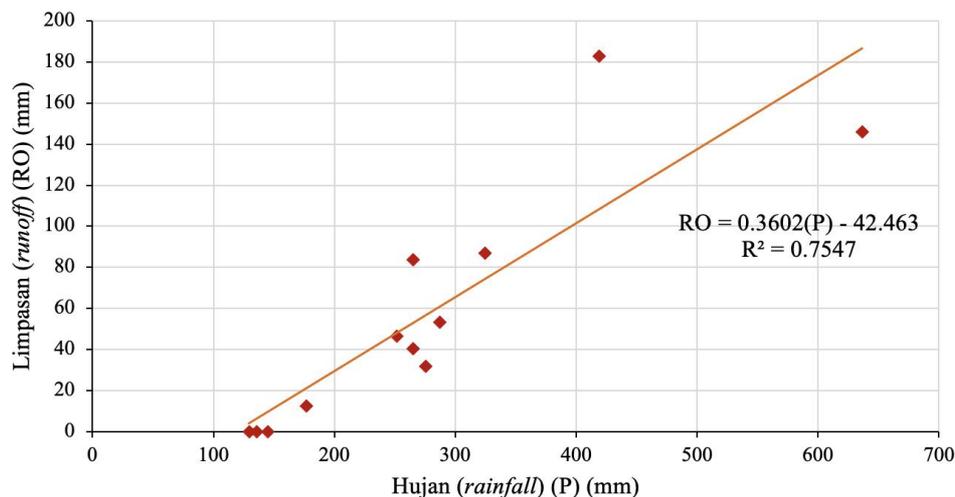
minimal 158 mm untuk mulai dapat menghasilkan surplus air. Jika dalam satu bulan tidak terjadi hujan minimal 158 mm, maka berpotensi muncul kondisi defisit. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas tampungan (*water storage*) ekosistem hutan alam gambut yang tinggi, dan mendekati prediksi yang ditetapkan dalam penghitungan TMWB berdasarkan karakteristik gambut dan sistem perakaran hutannya (Maryani et al., 2020).

Ekosistem hutan alam gambut di TN Zamrud dengan fungsi intersepsi hutan pada tajuk hingga tumbuhan bawah dan seresah, serta kapasitas penyimpanan air pada lapisan bahan organik gambut, memiliki kemampuan untuk mengendalikan dan menyimpan masukan air hujan hingga 118 mm (Gambar 6). Input hujan bulanan diatas 118 mm akan meningkatkan rembesan dan aliran bawah permukaan (*groundwater outflow*) dan setelah mencapai hujan 158 mm (Gambar 5) terjadi kejenuhan maksimal dan memicu munculnya limpasan permukaan (*surface water outflow*) ke saluran-saluran alami dan sungai. Kepadatan tutupan kanopi yang tinggi terbukti mampu mengendalikan curah hujan bersih (*net precipitation*) dengan intersepsi kanopi dan evapotranspirasi.



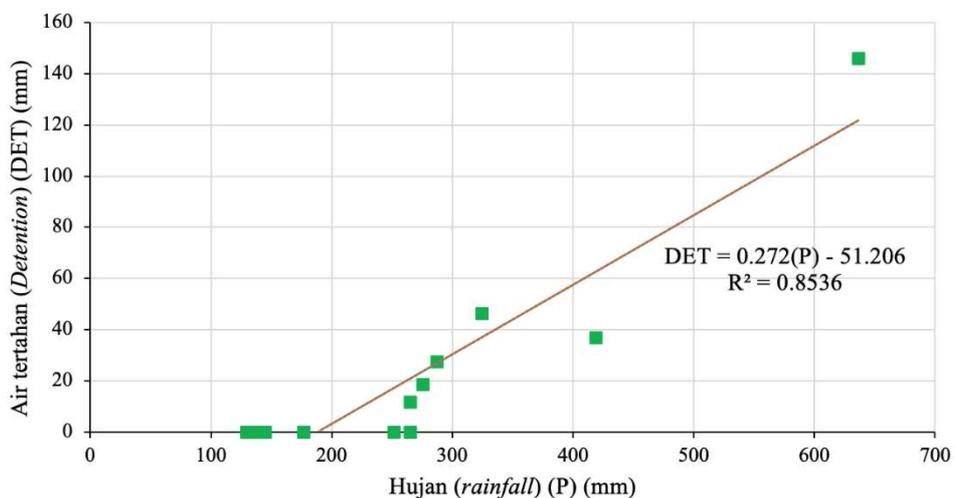
Sumber (Source): Analisis Tabel 2 (Table 2 Analysis)

Gambar (Figure) 5. Hubungan antara hujan dengan surplus air (Relationship between rainfall and water surplus)



Sumber (Source): Analisis Tabel 2 (Table 2 Analysis)

Gambar (Figure) 6. Hubungan antara hujan dengan limpasan (Relationship between rainfall and runoff)



Gambar (Figure) 7. Hubungan antara hujan dengan air tertahan (Relationship between rainfall and detention)

Gambar 7 menunjukkan kemampuan hutan alam di TN Zamrud memiliki kemampuan menahan air yang besar. Air tertahan di dalam kawasan baru mengalami penambahan ketika terjadi hujan di atas 188 mm. Kawasan Taman Nasional Zamrud yang merupakan sub KHG Semenanjung Kampar memiliki tutupan hutan alami, dengan gangguan yang minim memiliki kapasitas tampungan air (*water storage*) yang besar (SK KLHK No. 130, 2017). Kemampuan menyimpan air yang baik akan memiliki peranan yang penting dalam menjaga keseimbangan neraca air. Kemampuan

gambut di TN Zamrud dalam menyimpan air pada kedalaman hingga 40 cm memiliki kadar air rata-rata sekitar 627,85 - 845,86% dengan nilai porositas hingga kedalaman 40 cm mencapai 89,43 - 91,13%. Gambut pada kedalaman hingga 40 cm dikelompokkan sebagai gambut mentah (fibrik), sedangkan pada kedalaman 60 cm dikelompokkan sebagai gambut matang (saprik) (Maryani et al., 2020). Tingkat kematangan gambut akan memengaruhi kemampuan dalam menyimpan air. Semakin tinggi tingkat kematangan gambut, nilai porositasnya semakin kecil, dan semakin tinggi

kemampuan gambut dalam menyimpan air.

Memahami respon hidrologi pada ekosistem lahan gambut dalam sebuah KHG atau sub KHG alami menjadi penting sebagai sumber referensi (*baseline*) dalam upaya restorasi dan pemulihan fungsi lahan gambut. Informasi mengenai karakteristik iklim, karakteristik vegetasi, sifat fisik gambut, dan tingkat gangguan lahan gambut menjadi bagian penting dalam memahami proses hidrologi dalam bentuk neraca air kawasan.

## 4. Kesimpulan dan Saran

### 4.1. Kesimpulan

Hasil penerapan TMWB pada sub KHG di Taman Nasional Zamrud menunjukkan kemampuan hutan alam, dalam mengembalikan cadangan air di bumi melalui proses evapotranspirasi hingga mencapai 72,5% dari hujan tahunan. Sementara jumlah air yang tertinggal di dalam sub KHG dalam wujud surplus air hanya 27,5% dari hujan tahunan. Defisit air untuk kebutuhan evapotranspirasi terjadi pada bulan Juni hingga Oktober, namun kekurangan tersebut masih dapat tercukupi dari adanya simpanan surplus air. Mempertahankan kondisi gambut selalu basah dan tergenang menjadi penting untuk mempertahankan kecukupan air yang tersimpan agar menjadi surplus air. Jumlah dari surplus air yang kemudian potensial untuk menjadi limpasan dalam aliran bawah permukaan dan aliran permukaan, sebesar 75% dari surplus tahunan. Sementara itu, potensi air yang tetap tinggal di dalam sub KHG hanya 25% dari jumlah surplus tahunan, dan dipergunakan untuk mengisi dan mempertahankan tinggi muka air tanah pada ekosistem gambut. Keberadaan vegetasi menjadi bagian penting untuk mengatur jumlah air yang harus dikembalikan ke atmosfer, dan menjaga keseimbangan neraca air kawasan. Dengan demikian, kondisi neraca air

alami pada sub KHG di taman Nasional Zamrud dapat menjadi referensi dan target capaian, dalam pengelolaan neraca air pada kawasan-kawasan ekosistem gambut atau KHG yang sedang dilakukan proses pemulihan fungsi tata air melalui restorasi.

### 4.2. Saran

Neraca air sangat dipengaruhi oleh banyak faktor seperti sifat fisik lahan gambut, luasan, kedalaman gambut, kondisi penutupan lahan hingga intensitas gangguan terhadap sistem hidrologinya, maka diperlukan lebih banyak lagi pengukuran serupa pada berbagai jenis dan tipe lahan gambut, baik yang masih alami maupun yang sudah terganggu oleh aktivitas manusia. Pemanfaatan berbagai metode prediksi dan dikalibrasikan dengan data hasil pengukuran lapangan, akan meningkatkan akurasi dari model yang dikembangkan, dan dapat meningkatkan kualitas prediksi neraca airnya. Dalam rangka mencapai sistem pengelolaan ekosistem lahan gambut lestari, perlindungan sistem kesatuan hidrologi gambut wajib menjadi perhatian utama, dan berupaya meminimalkan gangguan hutan yang menyebabkan perubahan proses hidrologi pada sistem tata air gambut yang rapuh. Mempertahankan keseimbangan neraca air melalui strategi pembasahan (*rewetting*), mempertahankan tutupan bervegetasi melalui strategi restorasi dan rehabilitasi (*revegetation*) dan peningkatan kesejahteraan masyarakat melalui strategi pengembangan hasil pertanian, perikanan dan ekowisata yang berkelanjutan (*revitalization*), menjadi kunci penting kelestarian ekosistem gambut di Indonesia.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Dana Ilmu Pengetahuan Indonesia (DIPI) atas dukungan pendanaan penelitian, Balai

Besar Konservasi Sumberdaya Alam (BKSDA) Riau atas ijin dan pendampingan yang diberikan selama penelitian, Laboratorium Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, Fakultas Kehutanan Universitas Gadjah Mada atas dukungan dalam peralatan penelitian, dan seluruh tim peneliti yang telah berkontribusi positif hingga publikasi ini diterbitkan.

### Daftar Pustaka

- Acreman, M. & Holden, J. (2013). How wetlands affect floods. *Wetlands*, 33(5), 773-786. DOI 10.1007/s13157-013-0473-2.
- Applegate, G., Hooijer, A., Mulyadi, D., Ichsan, N., & Van der Vat, M. (2012). The impacts of drainage and degradation on tropical peatland hydrology, and its implications for effective rehabilitation. Paper presented at the *International Peat Society 14th International Peat Congress, Peatlands in Balance*, Stockholm, Sweden.
- Asdak, C. (2007). *Hidrologi dan pengelolaan daerah aliran sungai*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Astuti, S., Suyono, & Suryatmojo, H. (2016). *Hidrologi Hutan: dasar-dasar, analisis dan aplikasi*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Badan Restorasi Gambut (BRG). (2018). *Rencana tindakan restorasi gambut Provinsi Riau*. Jakarta.
- Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (BBSDLP). (2013). *Panduan pengelolaan berkelanjutan lahan gambut terdegradasi*. Jakarta.
- Black, P. E. (1996). *Watershed hydrology*, 2nd edition, CRC Press, Boca Raton, Florida. pp. 408.
- Calvo, J. C. (1986). An evaluation of Thornthwaite's water balance technique in predicting stream runoff in Costa Rica. *Hydrological Sciences Journal*, 31, 51-60. <https://doi.org/10.1080/02626668609491027>.
- Desmiwita & Surati. (2017). Upaya penyelesaian masalah pemantapan kawasan hutan pada Taman Nasional di Pulau Sumatera [Efforts to resolve the problem of stabilizing forest areas in National Parks on the island of Sumatra]. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*, 6(2), 135-146.
- Dohong, A. (2017). *Bolstering Peatlands Restoration in Indonesia through 3Rs Approach*. In: Developing International Collaborations to Address Fire and Other Conservation Issues in Central Kalimantan, Indonesia.
- Evans, D. C., Williamson, J. M., Kacaribu, F., Denny, I., Suwardiwarianto, Y., Hidayat, ... Page, S. E. (2019). Rates and spatial variability of peat subsidence in acacia plantation and forest landscapes in Sumatra, Indonesia. *Journal Geoderma*, 338, 410-421. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.028>.
- Hayasaka, H., Noguchi, I., Putra, E. I., Yulianti, N., & Vadrevu, K. (2014). Peat-fire related air pollution in Central Kalimantan, Indonesia. *Environmental Pollution*, 195, 257-266. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.031>.
- Hooijer, A., Page, S., Jauhiainen, J., Lee, W. A., Lu, X. X., Idris, A., & Anshari, G. (2012). Subsidence and carbon loss in drained tropical peatlands. *Biogeosciences*, 9, 1053-1071. <https://doi.org/10.5194/bg-9-1053-2012>.
- Jaenicke, J., Wösten, H., Budiman, A., & Siegert, F. (2010). Planning hydrological restoration of peatlands in Indonesia to mitigate carbon dioxide emissions. *Mitigation and*

- Adaptation Strategies for Global Change*, 15, 223–239. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9214-5>.
- Jauhiainen, J., Kerrojoki, O., Silvennoinen, H., Limin, S., & Vasander, H. (2014). Heterotrophic respiration in drained tropical peat is greatly affected by temperature - A passive ecosystem cooling experiment. *Environmental Research Letters*, 9, 105013.
- Jayachandran, S. (2009). Air quality and early-life mortality: evidence from Indonesia's wildfires. *Journal of Human Resources*, 44, 916-954. doi: 10.3368/jhr.44.4.916.
- Surat Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2017). *Penetapan Peta Fungsi Ekosistem Gambut Nasional, Indonesia (SK.130/MENLHK /SETJEN/PKL.0/2/2017)*
- Kementrian Pertanian (Kementan). (2019). *Peta Lahan Gambut Indonesia [Peatland Map of Indonesia] 1:50.000*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Kononen, M., Jauhiainen, J., Laiho, R., Kusin, K., & Vasander, H. (2015). Physical and chemical properties of tropical peat under stabilised land uses. *Mires and Peat*, 16, 1-13.
- Labadz, J., Allott, T., Evans, M., Billett, D. B. M., Stainer, S., Yallop, A., ... Hart, R. (2010). *Peatland hydrology*. Draft Scientific Review. IUCN UK Peatland Programme.
- Maryani, Suryatmojo, H., Imron, M. A., Saputra, N., Saliqin, D., Arfri, R. A., & Satriagasa, M. C. (2020). Relation of groundwater level and rainfalls in the peat swamp forest, burned peatland and mixed plantation areas of Kampar Peninsula, Riau Province. IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science* 533. doi:10.1088/17551315/533/1/012012
- Noor, M. (2010). *Lahan Gambut: Pengembangan, Konservasi dan Perubahan Iklim*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Nugroho, N. P. (2014). Kandungan biomassa atas permukaan pada hutan rawa gambut di Kabupaten Rokan Hilir, Provinsi Riau [Above ground surface of biomass content in peat swamp forest in Rokan Hilir District, Riau Province]. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 11(1), 41-51
- Page, S. E., Wuest, R., Weiss, D., Rieley, J., Shotyk, W., & Limin, S. H. (2004). A record of Late Pleistocene and Holocene carbon accumulation and climate change from an equatorial peat bog (Kalimantan, Indonesia): implications for past, present and future carbon dynamics. *Journal of Quaternary Science*, 19, 625-635. <https://doi.org/10.1002/jqs.884>
- Page, S. E., Rieley, J. O., & Banks, C. J. (2011). Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology*, 17, 798-818. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x>
- Pramono, H. T., Bintal, B., Syafridiman, & Radith, M. (2015). Degradasi vegetasi hutan konservasi Pulau Besar Danau Bawah Kabupaten Siak Provinsi Riau [Degradation of vegetation in the forest conservation of Pulau Besar Danau Bawah, Siak Regency, Riau Province]. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 2(2), 65-72.
- Ritung, S., Wahyunto, Nugroho, K., Sukarman, Hikmatullah, Suparto, & Tafakresnanto, C. (2011). *Peta Lahan Gambut Indonesia [Peatland Map of Indonesia] 1:250.000*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Bogor.

- Ritzema, H., Limin, S., Kusin, K., Jauhiainen, J., & Wösten, H. (2014). Canal blocking strategies for hydrological restoration of degraded tropical peatlands in Central Kalimantan, Indonesia. *Catena*, *114*, 11-20 <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.009>
- Soewandita, H. & Sudiana, N. (2011). Analisis potensi dan karakteristik gambut sebagai bahan pertimbangan untuk arahan perencanaan pengembangan kawasan di Kabupaten Siak [Potency analysis and characteristics of peatland for the regional development planning in Siak Regency]. *Sains Dan Teknologi Indonesia*, *13*(2), 130-136.
- Suryatmojo, H., Fujimoto, M., Yamakawa, Y., Kosugi, K., & Mizuyama, T. (2013). Water balance changes in the tropical rainforest with intensive forest management system. *J-Sustain*, *1*(2), 56-62.
- Suryatmojo, H., Imron, M. A., Satriagasa, M., Saputra, D. M., & Maryani. (2019). *Groundwater level response of the primary forest, ex-peatland fire, and community mix plantation in the Kampar peninsula, Indonesia*. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 361 012034
- Sutikno, S., Nasrul, B., Hendri, A., Silviana, S. H., Saputra, E., Ningrum, D. S., ... Ar Rahiem, M. M. (2020). *Neraca air kesatuan hidrologi gambut*. Kedeputian Bidang Penelitian dan Pengembangan. Badan Restorasi Gambut.
- Yoshino K., Ishida, T., Nagano, T., & Setiawan, Y. (2010). Landcover pattern analysis of tropical peat swamp lands in Southeast Asia, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, *38*, 941-946.