

ANALISIS PENJALARAN KEKERINGAN METEOROLOGI MENUJU KEKERINGAN HIDROLOGI PADA DAS LARONA

(Analysis of Meteorological Drought Propagation to Hydrological Drought through Larona Watershade)

Ika Purnamasari^a, Hidayat Pawitan^b, Findy Renggono^c

^aPascasarjana Klimatologi Terapan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680 — ika.purnamasarikli@gmail.com

^bDepartemen Geofisika dan Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

^cBalai Besar Hujan Buatan, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, PUSPITEK Serpong, Tangerang 15314

Abstract. Hydrological drought is water deficit from normal conditions on the hydrological system. Hydrological drought occurs through a complex process preceded by a rainfall deficit. The series of processes that show a change of drought signals through the hydrological cycle is expressed as drought propagation. This study aims to identify the characteristics of hydrological and meteorological drought and to identify meteorological drought propagation to hydrological drought through Larona Watershade. Standardized Precipitation Index (SPI) is used as indicator to identify meteorological drought while hydrological drought is characterised by Standardised Streamflow Index (SSI) with 1, 3, 6 and 12 months accumulation periods. Propagation meteorological drought to hydrological drought was analyzed using Pearson correlation. The results showed that duration and severity escalate by the increase in the accumulation period SPI and SSI. While the number of drought events is inversely proportional to the accumulation period SPI and SSI. Although the number of hydrological drought events was fewer, but they occurred over longer duration and much severe than the meteorological one. Severe hydrological drought (SSI 1 = -14.8) in 1997-1998 has declined water storage of Lake Towuti by 90% leading to reduction in Larona hydropower production. Furthermore, our findings provide promising approach to detect hydrological drought that may occur in the near future.

Keywords: hydrological drought, meteorological drought, standardised precipitation index, standardise streamflow index

(Diterima: 03-02-2017; Disetujui: 05-03-2017)

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Kekeringan merupakan bencana yang berkembang secara perlahan dan sering kali waktu awal dan akhir kejadian kekeringan sulit ditentukan. Bencana ini menjadi tantangan yang dihadapi hampir seluruh negara di dunia. Selama periode 1970-2005, sebanyak 15% bencana yang terjadi di dunia merupakan kejadian kekeringan dan bencana terkait kekeringan (Dirmeyer, 2011). Badan Nasional Penanggulangan Bencana mencatat selama kurun waktu 1815-2015 terdapat 1752 kejadian kekeringan di Indonesia dengan persentase kejadian 10 % dari bencana lain (BNPB, 2015).

Kekeringan didefinisikan sebagai kondisi defisit air dari kondisi normal dalam sistem hidrologi (Sheffied and Wood, 2011). Kekeringan dibedakan berdasarkan bentuk dalam siklus hidrologi. Kekeringan curah hujan disebut kekeringan meteorologi, kekeringan kelembaban tanah dinyatakan sebagai kekeringan pertanian serta kekeringan air bumi, aliran sungai dan danau yang dikenal dengan kekeringan hidrologi (Tallaksen dan Van Lanen, 2004; Van Loon dan Laaha, 2015). Kejadian kekeringan dapat dikuantifikasi dan dijelaskan melalui sifat-sifat kekeringan yang disebut karakteristik

kekeringan. Identifikasi karakteristik kekeringan diperlukan untuk memahami proses dan dampak kekeringan (Van Loon, 2015). Indikator kekeringan berkembang pesat untuk mengidentifikasi karakteristik kekeringan berupa waktu kejadian, durasi kekeringan, volume defisit kekeringan serta intensitas kekeringan (Fleig 2004; Hisdal *et al.*, 2004; Tallaksen dan Van Lanen 2004). Lloyd-Hughes (2014) menyatakan terdapat lebih dari 100 indikator kekeringan. Indikator kekeringan harus dipilih berdasarkan jenis kekeringan yang dikaji.

Kekeringan berdampak pada berbagai sektor salah satunya pada sektor energi (Van Loom, 2015). Dampak kekeringan pada bidang energi merupakan kajian yang menarik mengingat bahwa pembangkit listrik tenaga air (PLTA) di Indonesia menyokong 11% produksi listrik negara (Kementerian ESDM, 2015). Daerah Aliran Sungai (DAS) Larona dipilih sebagai wilayah kajian karena pada DAS ini terdapat tiga PLTA (Larona, Karebbe dan Balambano). Pembangkit listrik ini menjadi sumber energi utama kegiatan pertambangan nikel PT Vale Indonesia (NCAR, 2006). Wilayah DAS Larona hulu terdiri dari tiga danau utama (Towuti, Mahalona dan Matano) dengan potensi sumber daya air 4,5 milyar m³/tahun. Saat terjadi El Nino kuat 1997-1998 DAS Larona mengalami kekeringan yang berakibat pada penurunan produksi energi listrik.

Penggunaan indikator kekeringan yang utama adalah sebagai alat pemantauan dan peringatan dini kekeringan (Bachmair *et al.*, 2016). Sedikit tindakan dapat dilakukan untuk mencegah kekeringan meteorologi, namun banyak langkah yang dapat diambil untuk mencegah atau mengurangi dampak kekeringan hidrologi. Indikator kekeringan meteorologi yang banyak digunakan di dunia adalah *Standardised Precipitation Index* (SPI). Metode SPI pertama kali dikembangkan pada tahun 1993 oleh Tom McKee, Nolan Doesken dan John Kleist dari Pusat Iklim Colorado dengan tujuan utama untuk mendefinisikan dan pemantauan kekeringan. Kelebihan metode SPI adalah nilai indeks dapat dibandingkan secara spasial dan temporal. Selain itu, SPI memberikan indikator keparahan dan peluang kejadian kekeringan. Penambahan nilai negatif menunjukkan kekeringan yang semakin parah (Lloyd-Hughes dan Saunders, 2002). Kekurangan SPI diantaranya yaitu pemilihan distribusi peluang yang tepat masih dalam kajian literatur (Stagge *et al.*, 2015) dan *fitting* fungsi distribusi peluang dengan data yang banyak bernilai nol seringkali bermasalah (Wu *et al.*, 2007). Walaupun demikian, perhitungan yang sederhana, penggunaan data yang minimal (hanya curah hujan) dan fleksibilitas SPI menjadikan metode ini disarankan *World Meteorological Organization* (WMO) sebagai indikator yang dipilih untuk memantau kekeringan meteorologi (Hayes *et al.*, 2011). Svensson *et al.* (2015) dan Barker *et al.* (2016) mengembangkan indikator kekeringan hidrologi terstandarisasi bernama *Standardised Streamflow Index* (SSI). Namun untuk mengembangkan sistem peringatan dini kekeringan hidrologi perlu pemahaman penjalaran defisit meteorologi hingga terbentuk kekeringan hidrologi. Folland *et al.* (2015) dan Barker *et al.* (2016) mengkaji penjalaran kekeringan meteorologi menuju kekeringan hidrologi dengan menggunakan indikator terstandarisasi.

Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik kekeringan meteorologi dengan metode SPI dan hidrologi dengan SSI pada DAS Larona, mengenali hubungan kejadian kekeringan hidrologi dan kekeringan meteorologi serta mengidentifikasi pola penjalaran dan perlambatan kekeringan meteorologi menuju kekeringan hidrologi. Kajian ini merupakan langkah awal untuk membangun teknik deteksi dini kekeringan hidrologi pada DAS Larona yang sangat bermanfaat dalam manajemen danau untuk operasional PLTA.

1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kekeringan hidrologi dan meteorologi serta mengidentifikasi hubungan penjalaran dari kekeringan meteorologi menuju kekeringan hidrologi pada DAS Larona.

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi dan Waktu

Lokasi penelitian dikhususkan pada wilayah Daerah Aliran Sungai Larona Hulu, Sorowako dengan luas area 2,477 km². Wilayah DAS dibatasi oleh *outlet* PLTA Larona yang terletak di Kabupaten Luwu Timur, Sulawesi Selatan. DAS berada pada koordinat 2°20'–3°00' Lintang Selatan dan 121°10' BT–121°45' Bujur Timur. DAS Larona hulu terdiri dari tiga danau utama yaitu Matano, Mahalona dan Towuti yang dikenal dengan istilah kompleks Danau Malili. Danau Towuti merupakan danau terhilir yang berinteraksi langsung dengan PLTA Larona pada bendung Batubesi.

2.2. Bahan dan Alat

Bahan penelitian berupa data sekunder yang meliputi data data *inflow* harian Danau Towuti tahun 1986–2015, data curah hujan harian wilayah DAS Larona dari stasiun penakar hujan Timampu, Damsite, Hydro, Matano, Nuha, Palumba, Tokalimbo, Togo, Plansite, Wawandulu, Bano Dam, Karebbe Dam dan Ledu-ledu tahun 1986–2015 (sesuai ketersediaan data pada titik tersebut) dan peta administrasi DAS Larona. Alat yang digunakan meliputi seperangkat komputer yang dilengkapi perangkat lunak R, Minitab 15, ArcGIS 10.1, serta Microsoft Office.

2.3. Analisis Data

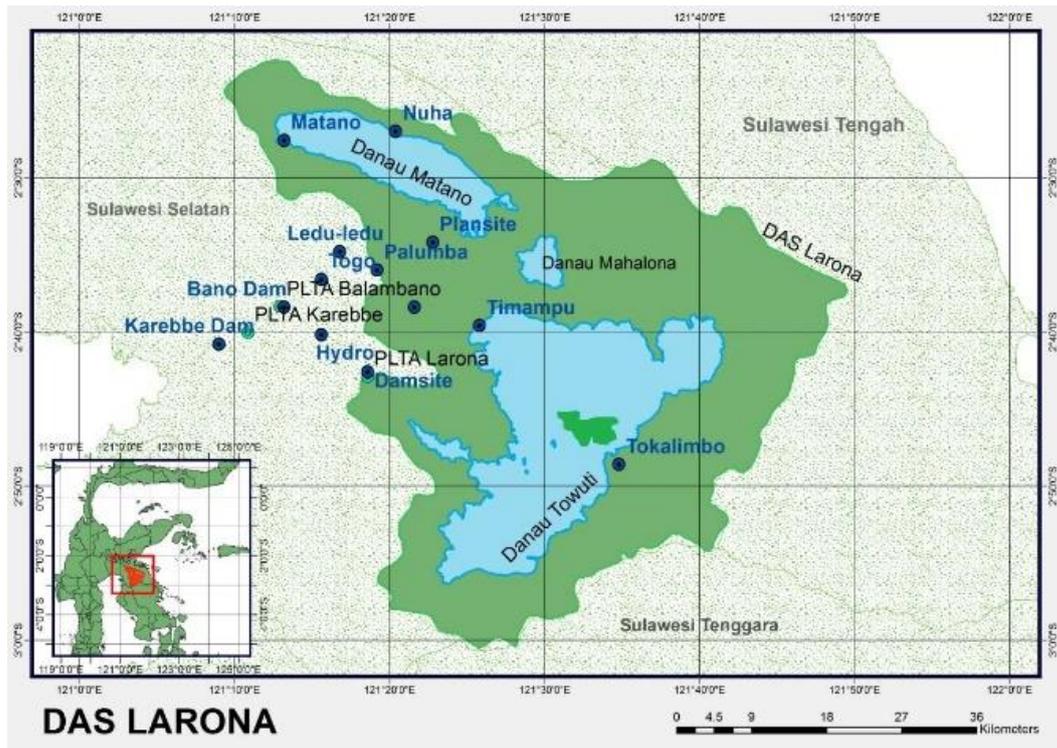
Penelitian ini terbagi dalam tiga tahap yang meliputi: 1) Persiapan berupa penghitungan curah hujan wilayah dan penghitungan *inflow* Danau Towuti; 2) Mengidentifikasi karakteristik kekeringan meteorologi dengan metode *Standardised Precipitation Index* (SPI) dan kekeringan hidrologi dengan metode *Standardised Streamflow Index* (SSI); 3) Analisis penjalaran kekeringan hidrologi dari kekeringan meteorologi.

2.3.1. Persiapan

Tahapan persiapan berupa penghitungan nilai curah hujan wilayah yaitu menggunakan metode Poligon Thiessen dengan persamaan 1 dan metode aritmatik (persamaan 2). Curah hujan wilayah dari stasiun Timampu, Hydro, Damsite, Bano Dam dan Karebbe Dam tahun 1986–2015 (sesuai ketersediaan data pada titik tersebut) digunakan untuk perhitungan SPI.

$$P_w = \sum_{i=1}^n P_i a_i \quad (1)$$

dengan P_w adalah curah hujan wilayah, P_i adalah curah hujan pada stasiun ke- i dan a_i adalah persentase luas wilayah yang diwakili stasiun ke- i (Bhavani, 2013).



Gambar 1. Stasiun hujan dan PLTA pada DAS Larona Hulu

Gambaran kondisi curah hujan bulanan pada DAS Larona dihitung dengan menggunakan metode aritmatik (persamaan 2) dari stasiun penakar hujan Timampu, Damsite, Hydro, Matano, Nuha, Palumba, Tokalimbo, Togo, Plansite, Wawandulu, Bano Dam, Karebbe Dam dan Ledu-ledu tahun 1986-2015 (sesuai ketersediaan data pada titik tersebut). Data curah hujan harian kemudian dibuat dalam bentuk bulanan dengan menjumlahkan tinggi hujan harian dalam satu bulan.

$$P_w = \frac{i}{n} (P_i) \quad (2)$$

Inflow Danau Towuti tidak diukur langsung melainkan dihitung dari outflow danau dan nilai tinggi muka air (TMA) danau Towuti dengan persamaan (3). Nilai outflow adalah penjumlahan canal flow (debit air untuk menggerakkan turbin) dan spill way flow (debit air sisa yang dikeluarkan dari danau).

$Inflow = net\ storage + canal\ flow + spill\ way\ flow$ (3)
Storage dihitung dengan persamaan lengkung debit sebagai berikut:

$$S = 5,03750 L^2 - 2.630 L + 328,312 \quad (4)$$

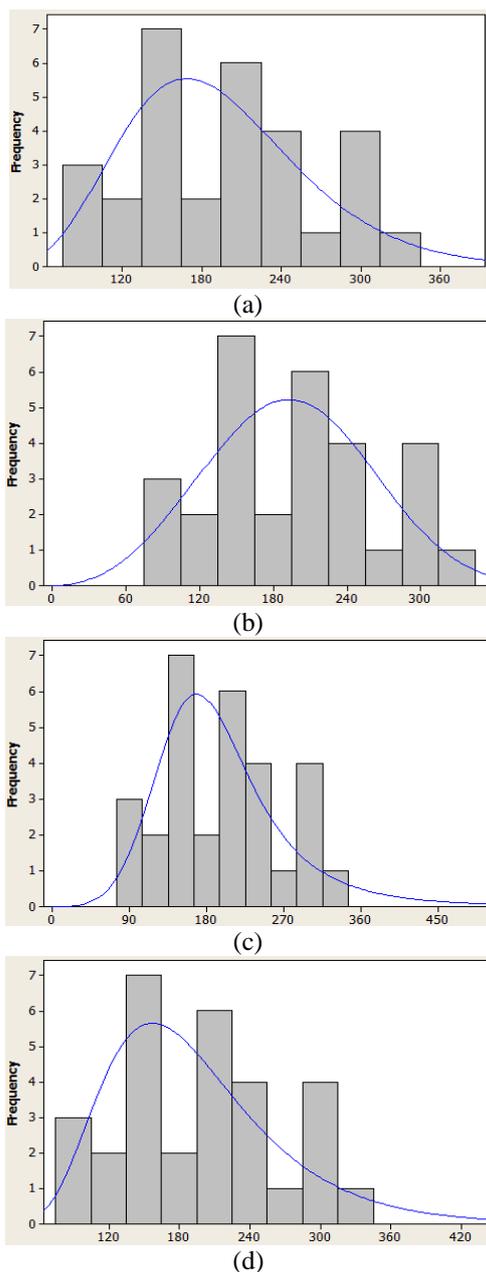
dengan S adalah storage (x 10⁶ m³), L adalah TMA (Tauhid dan Arifin, 2000). Inflow harian dalam satu bulan dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai inflow bulanan.

2.3.2. Identifikasi karakteristik kekeringan meteorologi dan hidrologi

Kekeringan meteorologi diidentifikasi dengan menggunakan metode *Standardise Precipitation Index* (SPI). Nilai SPI dihitung dengan terlebih dahulu menjumlahkan data curah hujan dalam selang waktu

akumulasi yang ditentukan (biasanya 1, 3, 6, 9, 12 atau 24 bulan) (WMO, 2012; Barker *et al.*, 2016) dan melakukan *fitting* nilai akumulasi curah hujan dengan fungsi distribusi peluang. Selanjutnya melakukan transformasi nilai distribusi peluang menjadi distribusi normal terstandarisasi dengan rata-rata 0 dan standar deviasi 1. Perhitungan SPI pada dasarnya adalah gambaran jumlah standar deviasi nilai akumulasi curah hujan dari rata-rata jangka panjangnya (McKee *et al.*, 1993; Lloyd-Hughes dan Saunders, 2002; Vincen-Serrato, 2012; Stagge *et al.*, 2015; Barker *et al.*, 2016). Distribusi Gamma seringkali cocok dengan data curah hujan sehingga perhitungan SPI dilakukan dengan distribusi Gamma. Penelitian yang dilakukan oleh Guttman (1999) serta Stagge *et al.* (2015) menunjukkan bahwa distribusi Gamma sebagian besar sesuai dengan distribusi curah hujan.

Kekeringan hidrologi diidentifikasi dengan menggunakan metode *Standardise Streamflow Index* (SSI). Perhitungan SSI memiliki prinsip yang sama dengan SPI yaitu dengan terlebih dahulu mengakumulasi data debit dalam periode waktu tertentu (Vincen-Serrato, 2012). Tidak ada fungsi distribusi peluang khusus yang secara luas digunakan dalam perhitungan SSI. Vincen-Serrato (2012) menggunakan beberapa fungsi distribusi peluang dalam perhitungan SSI.



Gambar 2. Histogram frekuensi inflow bulan Maret Danau Towuti dan kurva teoritis distribusi Gamma (a), Weibull (b), Loglogistik (c) dan Lognormal (d)

Penelitian ini menggunakan distribusi Gamma untuk menghitung nilai peluang inflow. Data inflow pada Danau Towuti dipilih untuk analisis kekeringan hidrologi karena menggambarkan debit aliran yang masuk kedalam sistem DAS Larona hulu. Hasil pengujian data inflow bulanan dengan menggunakan distribusi Gamma, Weibull, Lognormal dan Loglogistik (Gambar 2) menunjukkan bahwa data inflow sebagian besar mengikuti distribusi Gamma dan Weibull dibuktikan dengan nilai Anderson Darling yang lebih kecil (Tabel 1).

Package SPEI dalam R (Begueria dan Vincen-Serrano, 2015) digunakan dalam menghitung SPI dan SSI untuk periode akumulasi 1, 3, 6, dan 12 bulan. Periode akumulasi dinyatakan sebagai SPI_x dan SSI_x. SPI₃ dan

SSI₆ menunjukkan SPI dengan periode akumulasi curah hujan 3 bulan dan SSI dengan periode akumulasi inflow 6 bulan.

Kejadian kekeringan didefinisikan sebagai periode ketika nilai indeks secara terus menerus bernilai negatif dengan minimal periode 1 bulan pada ambang batas yang ditentukan (McKee *et al.*, 1993; Vidal *et al.*, 2010; Barker *et al.*, 2016). Ambang batas untuk mendefinisikan kekeringan adalah -1 (agak kering), -1.5 (kering) dan -2 (sangat kering) (Lloyd-Hughes dan Saunders, 2002). Karakteristik kekeringan yang diidentifikasi adalah durasi setiap kejadian kekeringan dalam resolusi bulanan dan keparahan kekeringan (jumlah nilai indeks SPI atau SSI) setiap kejadian kekeringan (Vidal *et al.*, 2010; Barker *et al.*, 2016).

Tabel 1. Nilai Anderson Darling distribusi inflow

| No | Distribusi | Nilai Anderson Darling |
|----|-------------|------------------------|
| 1 | Weibull | 0.267 |
| 2 | Gamma | 0.277 |
| 3 | Lognormal | 0.361 |
| 4 | Loglogistik | 0.347 |

2.3.3. Penjalaran kekeringan

Perbandingan SSI dengan SPI memberikan indikasi waktu yang dibutuhkan defisit curah hujan melewati siklus hidrologi hingga terjadinya defisit dalam DAS. Periode akumulasi SPI 1-12 bulan dan SSI dikorelasikan silang dengan menggunakan koefisien korelasi Pearson untuk menganalisis periode akumulasi SPI yang paling tepat untuk mengkarakterisasikan SSI 1. Aliran minimum bulanan terdeskripsikan dengan baik pada SSI 1 bulan yaitu menggambarkan rata-rata aliran 30 hari yang sering digunakan dalam kajian aliran minimum tahunan (Gustard *et al.*, 1992; Barker *et al.*, 2016). Periode akumulasi SPI yang memiliki korelasi terkuat dengan SSI1 digunakan sebagai indikator untuk menganalisis penjalaran kekeringan (Barker *et al.*, 2016). Selanjutnya dilakukan korelasi Pearson antara SSI 1 bulan dan SPI 1-12 bulan dengan selang waktu 0-3 bulan setelah seri waktu SPI untuk menggambarkan keberadaan selang waktu antara kejadian kekeringan meteorologi dengan hidrologi.

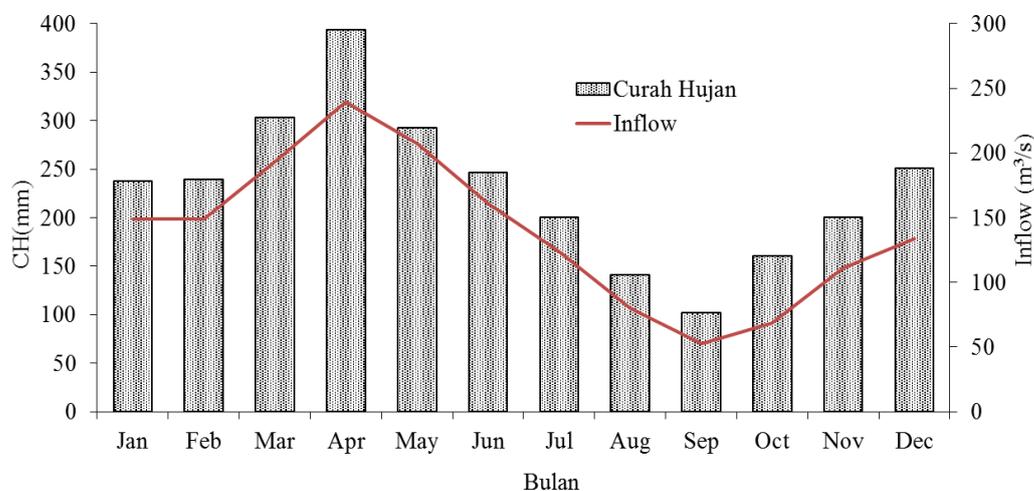
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kondisi Hidrologi DAS

Wilayah DAS Larona memiliki pola curah dengan satu puncak musim hujan dan satu puncak musim kering dalam periode satu tahun. Pola ini dipengaruhi oleh angin muson. Hasil pengamatan selama 30 tahun sejak tahun 1986 hingga 2015 dari stasiun Timampu, Hydro, Damsite, Matano, Nuha, Plansite, Palumba, Tokalimbo, Wawondula dan Ledu-ledu menunjukkan bahwa periode basah DAS Larona (curah hujan lebih dari 200 mm/bulan) terjadi pada bulan Desember hingga Juli (Gambar 3). Puncak musim hujan terjadi pada bulan Maret-April-Mei dengan rata-rata curah hujan bulan

April mencapai 394,0 mm. Periode kering DAS Larona berlangsung pada bulan Agustus hingga Oktober. Bulan terkering terjadi pada September, pada bulan ini curah hujan hanya 101,9 mm. Curah hujan tahunan DAS Larona mencapai 2769,3 mm/tahun dengan rata-rata

curah hujan bulanan sebanyak 230,8 mm. Pada periode El Nino, curah hujan berkurang sebanyak 22 % sedangkan La Nina meningkatkan curah hujan hingga 50% dari kondisi normalnya (Renggono, 2011).



Gambar 3. Rata-rata curah hujan dan inflow bulanan DAS Larona tahun 1986-2015

Pola kenaikan curah hujan DAS Larona diikuti oleh pola kenaikan inflow Danau Towuti (Gambar 3). Periode inflow maksimum terjadi pada bulan Maret-April Mei dengan puncak inflow pada bulan April yaitu 239,4 m³/s atau setara dengan 0,6 x 10⁹ m³/bulan. Periode minimum terjadi pada bulan Agustus-September-Oktober dengan inflow terendah pada bulan September yaitu 52,5 m³/s. Selama bulan ini inflow Danau Towuti hanya 0,1 x 10⁹ m³ atau turun 80% dari inflow maksimum pada bulan April. Secara keseluruhan tinggi rata-rata inflow bulanan Danau Towuti adalah 139,1 m³/s (0,4 x 10⁹ m³) dengan volume inflow tahunan 4,3 x 10⁹ m³.

3.2. Karakteristik Kekeringan

Karakteristik kekeringan yang menunjukkan sifat kekeringan pada DAS Larona dinyatakan dalam bentuk jumlah kejadian kekeringan, awal dan akhir terjadinya kekeringan, durasi kekeringan dan keparahan kekeringan. Kejadian kekeringan dinyatakan saat nilai indeks SPI dan SSI menunjukkan nilai kurang dari -1. Garis merah pada Gambar 3 dan 4 menunjukkan ambang batas kejadian kekeringan. Nilai indeks -1,0 sampai -1,49 dinyatakan sebagai kondisi agak kering. Kondisi kering saat indeks bernilai -1,5 sampai -1,99 dan sangat kering ketika indeks bernilai kurang dari samadengan -2.

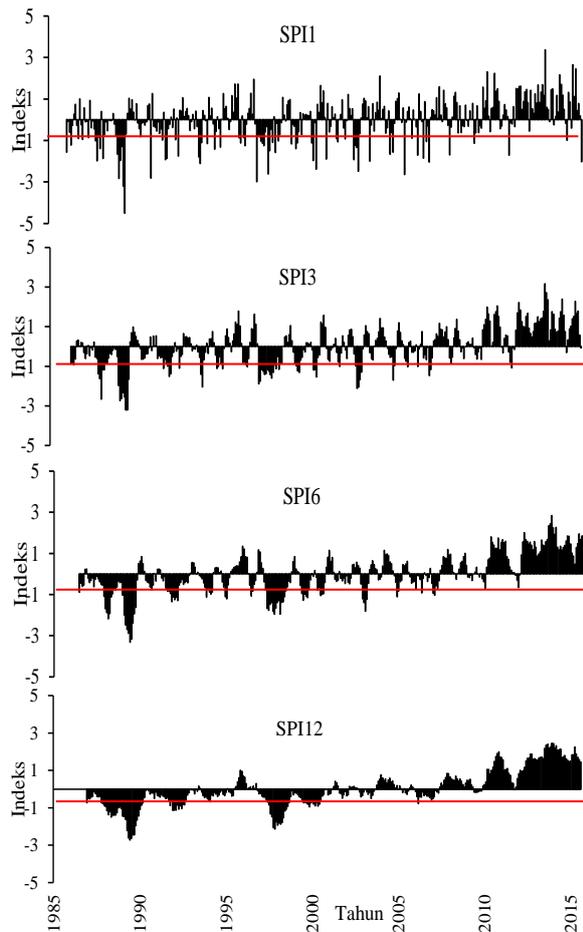
3.2.1. Kekeringan Meteorologi

Seri waktu nilai indeks kekeringan meteorologi DAS Larona tahun 1986-2015 dengan SPI periode akumulasi 1 bulan hingga 12 bulan disajikan pada Gambar 4. Gambar 4 menunjukkan bahwa menurut SPI 1, kekeringan terjadi hampir setiap tahun hingga tahun 2015 dengan periode bulan kering sebanyak 16%. Kekeringan terjadi hingga tahun 2011 menurut SPI 3

dengan periode sebanyak 52 bulan (14%). Menurut SPI 6, kekeringan hanya terjadi sampai tahun 2006 dengan jumlah bulan kering sebanyak 13%. DAS Larona tidak mengalami kejadian kekeringan meteorologi setelah tahun 1998 menurut analisis dengan SPI 12 bulan. Periode kering pada SPI 12 berjumlah 39 bulan (11%).

Sebagian besar kekeringan pada DAS Larona termasuk dalam kategori agak kering dengan jumlah bulan kering menurut SPI 1-12 bulan berturut-turut yaitu 45%, 57%, 52% dan 40%. Kategori kering berkisar antara 9-19% sedangkan bulan sangat kering hanya 7-12% dari keseluruhan bulan kajian (360 bulan).

Hasil plot indeks SPI pada Gambar 4 menunjukkan bahwa durasi dan tingkat keparahan kekeringan meteorologi meningkat dengan bertambahnya periode akumulasi SPI tercermin dari periode kering dan periode basah yang semakin jelas dan fluktuasi nilai indeks yang semakin berkurang. Rekapitulasi karakteristik kekeringan berupa durasi dan keparahan kekeringan disajikan pada Tabel 2. Terdapat 40 kali kejadian kekeringan meteorologi pada DAS Larona menurut SPI 1. Jumlah kekeringan berkurang menjadi 19 menurut SPI 3, 11 kejadian berdasarkan SPI 6 dan hanya empat kejadian berdasarkan SPI 12 bulan. Kekeringan meteorologi pada DAS Larona memiliki panjang durasi yang berbeda pada setiap periode akumulasi SPI. Pada SPI 1, 77% kejadian kekeringan berdurasi 1 bulan dengan durasi maksimum 6 bulan (Desember 1988-Mei 1989). SPI 3 dan 6 menunjukkan hasil yang sama yaitu 30-50% kejadian kekeringan berdurasi 1 bulan dengan durasi maksimum 11-13 bulan (April 1997-April 1998). Sedangkan durasi kekeringan hasil SPI 12 adalah 5-14 bulan. Durasi kejadian kekeringan semakin lama dengan peningkatan periode akumulasi SPI. Rata-rata durasi menurut SPI 1-12 berturut-turut yaitu 1,4, 2,5, 4,6 dan 6,7 bulan. Durasi kekeringan maksimum terjadi pada kekeringan tahun 1987-1988 dan 1997-1998.



Gambar 4. Seri waktu kekeringan meteorologi DAS Larona tahun 1986-2015 menurut SPI 1-12 bulan. (Garis merah menunjukkan ambang batas kejadian kekeringan meteorologi)

Tabel 2. Karakteristik kekeringan DAS Larona Tahun 1986-2015

| | Jumlah Kejadian | Durasi (bulan) | | Keparahan (-) | |
|-------|-----------------|----------------|------|---------------|-------|
| | | Rata-rata | Maks | Rata-rata | Maks |
| SPI1 | 40 | 1,4 | 6 | -2,5 | -15,4 |
| SPI3 | 19 | 2,7 | 11 | -4,2 | -20,2 |
| SPI6 | 11 | 4,6 | 13 | -6,9 | -23,5 |
| SPI12 | 6 | 6,7 | 14 | -10,7 | -26,8 |
| SSI1 | 34 | 1,5 | 7 | -2,2 | -14,8 |
| SSI3 | 16 | 3,7 | 17 | -5,6 | -32,1 |
| SSI6 | 9 | 5,4 | 15 | -9,4 | -35,7 |
| SSI12 | 8 | 6,6 | 15 | -11,0 | -37,3 |

Keparahan kekeringan dihasilkan dari penjumlahan indeks kekeringan bernilai kurang dari -1 selama satu periode kejadian kekeringan. Keparahan kekeringan bertambah dengan peningkatan durasi kekeringan. Berdasarkan analisis dengan SPI 1, keparahan kekeringan maksimum bernilai -15,4 terjadi pada bulan Desember 1988-Mei 1989. Bulan April-Mei periode ini dikategorikan sebagai kondisi sangat kering dengan nilai indeks -3,2 dan -4,5. Identifikasi dengan SPI 3 menghasilkan nilai keparahan hingga -20,2 dengan rata-rata keparahan -3,7. Dua kejadian kekeringan dengan keparahan tertinggi yaitu pada Januari-November 1997 dan Desember 1988-Juli 1989

dengan nilai -15,6 dan -20,2. Bulan Januari-Juni 1989 merupakan periode sangat kering (nilai indeks -2,7 sampai -3,2 sedangkan pada kejadian tahun 1997, teridentifikasi sebagai kering saja. Keparahan SPI 6 dan 12 bernilai kurang dari -23 dengan besar rata-rata keparahan SPI 12 satu setengah kali lipat dari SPI 6.

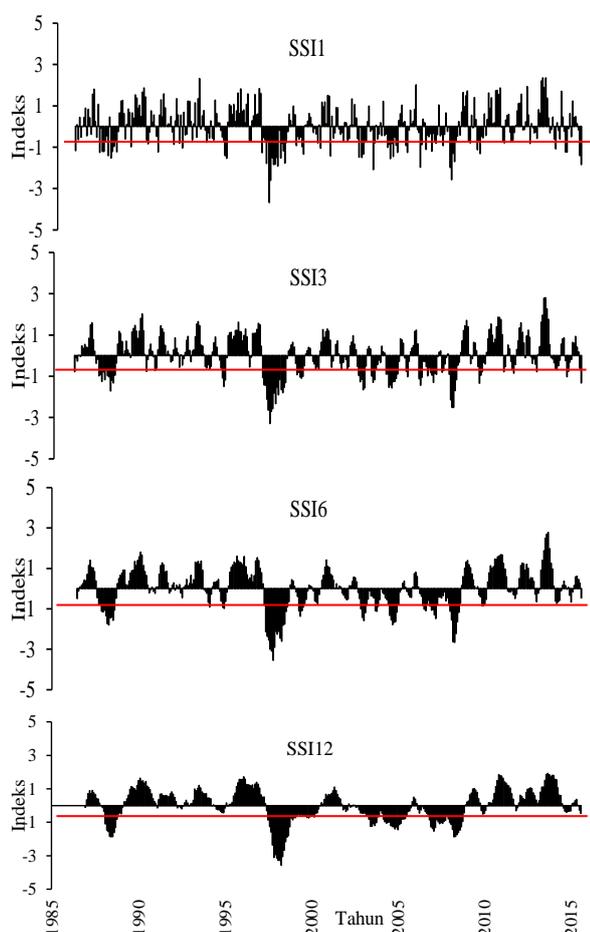
3.2.2. Kekeringan Hidrologi

Seri waktu nilai indeks kekeringan hidrologi DAS Larona tahun 1986-2015 dengan SSI periode akumulasi 1 bulan hingga 12 bulan disajikan pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 4 dapat diketahui bahwa menurut SSI 1 dan 3 bulan kekeringan hidrologi pada DAS Larona berlangsung hingga tahun 2015 dengan jumlah bulan kering 50 dan 51 bulan atau 14%. Kekeringan hanya terjadi hingga tahun 2008 menurut SPI 6 dan 12 dengan jumlah bulan kering sebanyak 14-15%. Lebih dari 50% bulan kering hidrologi pada DAS Larona termasuk kategori agak kering. Kategori kering sebanyak 18-32% sedangkan kategori sangat kering hanya 8% menurut SPI 1, 18% berdasarkan SPI 3, 30% untuk SPI 6 dan pada SPI 12 berjumlah 14%.

Kejadian kekeringan hidrologi pada DAS Larona hasil SSI 1-12 bulan berturut-turut adalah 34, 16, 9 dan 8 kejadian (Tabel 2). Kejadian kejadian kekeringan ini lebih sedikit dibandingkan dengan kekeringan meteorologi untuk semua periode akumulasi SSI kecuali SSI 12. Kekeringan hidrologi pada SSI 1-3 sebagian besar (44-77 %) berdurasi 1 bulan dengan rata-rata durasi 1,5-3,7 bulan serta durasi maksimum 7 dan 17 bulan. Durasi kekeringan hidrologi maksimum berdasarkan SSI 6 dan 12 memiliki lama yang sama yaitu 15 bulan walaupun rata-rata durasi SSI 12 dua kali lebih lama dibandingkan rata-rata SSI 6 bulan. Minimal durasi kekeringan pada SSI 6 dan 12 adalah 2 bulan. Durasi kekeringan maksimum selama 17 bulan terjadi pada bulan Januari 1997-Juni 1998. Rata-rata durasi kekeringan hidrologi periode akumulasi 1-6 bulan lebih lama dibandingkan rata-rata durasi kekeringan meteorologi.

Keparahan kekeringan bertambah dengan peningkatan periode akumulasi SSI. Berdasarkan Gambar 5 dapat diketahui bahwa keparahan kekeringan tertinggi terjadi pada periode kering 1997-1998, 2007-2008 dan 1987-1988 dengan rentang nilai keparahan (SSI 1-12) berturut-turut yaitu -14,8 hingga -37,2, -7,5 sampai -13,4 dan -8 sampai -12,6. Pada periode ini terdapat kondisi hidrologi sangat kering (nilai indeks per bulan < -2) yaitu pada bulan Mei-Juni tahun 1997 dan Januari 2008 (SPI 1), April-November 1997 dan Januari-Maret 2008 (SPI 3), Mei 1997-April 1998 dan Maret-Mei 2008 (SPI 6) serta Januari-Juli menurut SPI 12 bulan. Kekeringan ini diketahui menyebabkan turunnya tinggi muka air danau Towuti hingga 316,4 m sehingga volume danau berkurang 10 kali lipat dari volume rata-rata. Rata-rata dan keparahan maksimum kekeringan hidrologi hasil SSI 3-12 bulan lebih besar dari keparahan meteorologi. Barker *et al.* (2016) menemukan hasil bahwa kekeringan hidrologi memiliki nilai keparahan lebih tinggi dan durasi lebih lama dibandingkan dengan kekeringan meteorologi. Kajian terhadap 121 DAS di

Inggris menunjukkan bahwa jumlah kejadian kekeringan meteorologi lebih banyak dibandingkan kekeringan hidrologi.



Gambar 5. Seri waktu kekeringan hidrologi DAS Larona tahun 1986-2015 menurut SSI 1-12 bulan. (Garis merah menunjukkan ambang batas kejadian kekeringan hidrologi)

3.3. Penjalaran Kekeringan

Penjalaran kekeringan pada penelitian ini dimaksudkan untuk menggambarkan perubahan sinyal kekeringan meteorologi menjadi kekeringan hidrologi melalui siklus hidrologi. Penjalaran kekeringan dikuantifikasi dengan mengkorelasikan indikator kekeringan hidrologi SSI 1 bulan dengan indikator kekeringan meteorologi SPI 1-12 bulan untuk mengidentifikasi skala waktu saat defisit curah hujan merambat melalui siklus hidrologi dan menyebabkan defisit dalam sistem DAS. Untuk menganalisis adanya selang waktu (*lag*) antara kejadian kekeringan meteorologi dengan kekeringan hidrologi, korelasi dilakukan antara SSI 1 bulan dengan SPI 1-12 bulan menggunakan selang waktu 0-3 bulan.

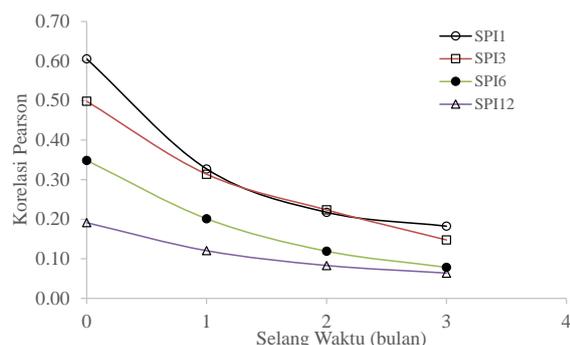
Korelasi antara SSI 1 bulan dengan SPI 1-12 bulan DAS Larona tahun 1986-2015 disajikan pada Tabel 3. Hasil korelasi menunjukkan bahwa SSI 1 berkorelasi kuat ($r \geq 0,50$) dengan SPI 1 dan 3 bulan. Korelasi

terkuat terjadi dengan SPI 1 bulan dengan nilai korelasi 0,61. Hal ini menunjukkan bahwa kekeringan pada DAS Larona Hulu dipengaruhi kuat oleh defisit curah hujan bulan yang sama hingga tiga bulan sebelumnya. Sifat ini sama dengan hasil penelitian Barker et al (2016) yang menyatakan bahwa sebagian besar kekeringan hidrologi DAS berkorelasi kuat dengan SPI 1, 2 dan 3 bulan. Vicente-Serrano dan Lopez-Moreno (2005) menemukan bahwa SPI periode akumulasi 1-3 bulan berkorelasi kuat dengan debit sungai terstandarisasi pada DAS dengan simpanan kecil di Spanyol. Lorenzo-Lacruz et al. (2013) menemukan bahwa pada kondisi geologi dengan permeabilitas yang rendah, SSI 1 bulan berkorelasi kuat dengan periode akumulasi SPI pendek sedangkan pada wilayah yang didominasi oleh batukapur SSI 1 berkorelasi kuat dengan SPI 12. Nilai korelasi berkurang dengan peningkatan waktu akumulasi SPI. Berdasarkan hasil ini dapat disimpulkan bahwa SPI 1-3 bulan dapat dijadikan sebagai indikator awal kejadian kekeringan hidrologi pada DAS Larona.

Tabel 3. Korelasi SPI 1-12 bulan dengan SSI1 bulan

| No | SPI | SSI 1 bulan |
|----|----------|-------------|
| 1 | 1 bulan | 0,60 |
| 2 | 3 bulan | 0,50 |
| 3 | 6 bulan | 0,38 |
| 4 | 12 bulan | 0,24 |

Hasil korelasi SSI 1 bulan dan SPI dengan selang waktu 0-3 bulan sebelumnya pada semua periode akumulasi waktu (SPI 1-12 bulan) disajikan pada Gambar 6. Berdasarkan gambar ini dapat diketahui bahwa korelasi terkuat dengan inflow Danau Towuti diperoleh saat tidak ada selang waktu dengan SPI yang berarti bahwa sebagian besar waktu kejadian kekeringan hidrologi bersamaan dengan waktu kekeringan meteorologi. Sebagai contoh pada kejadian kekeringan hidrologi dengan keparahan tertinggi pada tahun 1997-1998 yang berlangsung dari bulan Maret berdasarkan SSI 1 didahului oleh kekeringan meteorologi yang berlangsung dari bulan maret menurut SPI 1 dan bulan Januari menurut SPI 3. Kondisi hidrologi sangat kering pada bulan Juni 2003 terjadi ketika kondisi meteorologi kering pada bulan yang sama. Korelasi yang tinggi dengan SPI tanpa selang waktu menunjukkan bahwa kekeringan meteorologi berpotensi untuk dijadikan sebagai alat deteksi dini kekeringan hidrologi pada DAS Larona. Pola hubungan ini telah berhasil digunakan di Inggris untuk menduga debit musiman (tinggi, sedang atau rendah) (Svensson, 2016). Korelasi semakin melemah dengan bertambahnya selang waktu indeks SSI dengan SPI untuk semua periode akumulasi SPI.



Gambar 6. Korelasi SSI 1 bulan dengan selang waktu 0-3 bulan dari SPI 1-12 bulan

4. Kesimpulan

Karakteristik kekeringan hidrologi dan meteorologi dianalisis dengan menggunakan metode SSI dan SPI. Durasi dan keparahan kekeringan bertambah dengan peningkatan periode akumulasi SPI dan SSI. Sedangkan jumlah kejadian kekeringan berbanding terbalik dengan periode akumulasi SPI dan SSI. Kejadian kekeringan hidrologi pada DAS Larona lebih sedikit dibandingkan dengan kekeringan meteorologi. Rata-rata durasi kekeringan hidrologi dalam DAS lebih lama dibandingkan dengan kekeringan meteorologi yang mendahuluinya. Tingkat keparahan kekeringan hidrologi lebih tinggi dari keparahan meteorologi. Kekeringan hidrologi terparah (SSI 1 = -14,8) terjadi tahun 1997-1998 menyebabkan volume Danau Towuti berkurang 90% sehingga produksi PLTA terganggu.

Kekeringan hidrologi pada DAS Larona Hulu dipengaruhi kuat oleh defisit curah hujan bulan yang sama hingga tiga bulan sebelumnya yang ditunjukkan dengan nilai korelasi Pearson $\geq 0,50$. Metode SPI 1-3 bulan dapat dijadikan sebagai indikator kejadian kekeringan hidrologi pada DAS Larona. Nilai korelasi berkurang dengan peningkatan waktu akumulasi SPI. Korelasi yang tinggi pada kondisi tidak ada selang waktu antara SSI dan SPI menunjukkan bahwa indikator kekeringan meteorologi dengan SPI berpotensi untuk dijadikan sebagai alat deteksi dini kekeringan hidrologi pada DAS Larona.

Daftar Pustaka

- [1] [BNPB] Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2015. *Perbandingan jumlah kejadian bencana per jenis bencana 1815-2015*. <http://dibi.bnpb.go.id/DesInventar/dashboard.jsp?countrycode=id&continue=y&lang=ID> [1 September 2015].
- [2] Barker L. J., J. Hannaford, A. Chiverton, C. Svensson, 2016. From meteorology to hydrological drought using standardized indicator. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, pp. 2483–2505.
- [3] Bhavani R., 2013. Comparison of mean and weighted annual rainfall in anantapuram district. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2(7): 2794-2800.
- [4] Bachmair, S., K. Stahl, K. Collins, J. Hannaford, M. Acreman, M. Svoboda, C. Knutson, K. H. Smith, N. Wall, B. Fuch, N.

- D. Crossman, I. C. Overton, 2016. Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. *WIREs Water*. 3(4): 516-536.
- [5] Dirmeyer P., 2011. *Floods and Droughts in a Changing Climate – Now and the Future*. <http://earthzine.org/?s=Droughts> [30 Agustus 2015].
- [6] Fleig A., 2004. Hydrological drought –A comparative study using daily discharge series from around the world [disertasi]. Universitas Albert-Ludwigs., Freiburg. http://www.geo.uio.no/edc/downloads/msc_thesis_fleig.pdf [30 Juni 2015].
- [7] Folland, C. K., J. Hannaford, J. P. Bloomfield, M. Kendon, C. Svensson, B. P. Marchant, J. Prior, E. Wallace, 2015. Multi-annual droughts in the English Lowlands: a review of their characteristics and climate drivers in the winter half-year. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19(5), pp. 2353–2375.
- [8] Gustard, A., A. Bullock, J. M. Dixon, 1992. Low flow estimation in the United Kingdom. Institute of Hydrology, Wallingford, UK. IH Report. 88(108), pp. 1992.
- [9] Guttman, N. B., 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *J. Am. Water Resour. As.*, 35 (2), pp. 311–322.
- [10] Hayes, M., M. Svoboda, N. Wall, M. Widhalm, 2011. The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *B. Am. Meteorol. Soc.* 92, pp. 485–488.
- [11] Hissdal, H., L. M. Tallaksen, B. Clausen, E. Peters, A. Gustard, 2004. Hydrological Drought Characteristics. *Elsevier Science B.V. Amsterdam, the Netherlands. Developments in Water Science*. 48(5), pp. 139–198.
- [12] Kementerian ESDM, 2015. *Statistik ketenagalistrikan 2014. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*. <https://www.djk.esdm.go.id/images/pdf/statistik-ketenagalistrikan/Statistik%20Ketenagalistrikan%202014%20FINAL.pdf> [September 2015].
- [13] Lloyd-Hughes, B., 2014. The impracticality of a universal drought definition. *Theor. Appl. Climatol.* 117, 607–611.
- [14] Lloyd-Hughes, B., M. A. Saunders, 2002. A drought climatology for Europe. *Int. J. Climatol.* 22, pp. 1571–1592.
- [15] Lorenzo-Lacruz, J., S. M. Vicente-Serrano, J.C. González-Hidalgo, J. I. López-Moreno, N. Cortesi, 2013. Hydrological drought response to meteorological drought in the Iberian Peninsula. *Clim. Res.*, 58, pp. 117–131.
- [16] McKee, T. B., N. J. Doesken, J. Kleist, 1993. The Relationship of Drought Frequency and duration to Time Scales, Proceeding of the 8th Conference on Applied Climatology.
- [17] NCAR, 2006. Feasibility study for the augmentation of rain in Sulawesi. Final report to INCO Soroako Indonesia. National Center for Atmospheric Research, Research Application Laboratory USA.
- [18] Renggono F., 2011. Pengaruh ENSO terhadap pola angin dan curah hujan di DAS Larona Sulawesi Selatan. *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*. 12, pp. 63-68.
- [19] Sheffield, J. E. F. Wood, 2011. Drought: Past problems and future scenarios. London: Earthscan.
- [20] Stage, J. H., L. M. Tallaksen, L. Gudmundsson, A. F. Van Loon, K. Stahl, 2015. Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *Int. J. Climatol.* 35, 4027–4040.
- [21] Svensson, C., A. Brookshaw, A. Scaife, V. Bell, J. Mackay, C. Jackson, J. Hannaford, H. Davies, A. Arribas, S. Stanley, 2015. Long-range forecasts of UK winter hydrology. *Environ. Res. Lett.* 10(6), 064006, pp. 1-6.
- [22] Svensson, C., J. Hannaford, I. Prodocimi, 2017. Statistical distributions for monthly aggregations of precipitation and streamflow in drought indicator applications. *Water Resour. Res.* 53(2), pp. 999-1018.

- [23] Tallaksen L. M., H. A. J. Van Lanen, 2004. Hydrological drought: Processes and estimation methods for streamflow and groundwater. In: *Developments in Water Science*. 48. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science B.V.
- [24] Tauhid Y. I., A. Jon, 2000. Pengamatan Jangka Panjang Kondisi Air Danau Towuti. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*. 1(1), pp. 93-100.
- [25] Van Loon A. F., G. Lahaa, 2015. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology* 526 (2015), pp. 3-14.
- [26] A. F. Van Loon, 2015. Hydrological drought explained. *WIREs Water Wiley Periodicals*. 2, pp. 359-392.
- [27] Vicente-Serrano, S. M. and J. I. López-Moreno, 2005. Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 9, pp. 523–533.
- [28] Vicente-Serrano, S. M., J. I. López-Moreno, S. Beguería, J. Lorenzo-Lacruz, C. Azorin-Molina, E. Morán-Tejeda, 2012. Accurate computation of a streamflow drought index, *J. Hydrol. Eng.* 17, pp. 318–332.
- [29] Vidal, J. P., E. Martin, L. Franchistéguy, F. Habets, J. M. Soubeyrroux, M. Blanchard, M. Baillon, 2010. Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, pp. 459–478.
- [30] [WMO] World Meteorological Organization, 2012. Standardized Precipitation Index User Guide. WMO No 1090.
- [31] Wu, H., M. D. Svoboda, M. J. Hayes, D. A. Wilhite, F. Wen, 2007. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons, *Int. J. Climatol.* 27, 65–79.