

Jurnal TEKNIK SUMBER DAYA AIR

- Eksperimen Laboratorium Mekanisme Gerakan Material Vulkanik pada Berbagai Kemiringan Lereng, Intensitas Hujan, dan Ketebalan Abu Vulkanik** 1-16
F. Tata Yunita, Indratmo Soekarno, Joko Nugroho, dan Untung Budi Santosa
- Optimasi Pengaturan Release Waduk Wonogiri Berbasis Neraca Air Simultan pada Dua Tampungan Waduk Terpadu** 17-28
Jennifer Dharmawangsa, Rachmad Jayadi, dan Kurniawan Putra Santoso
- Perbandingan Pola Distribusi Hujan Terukur dan Metode Empiris dalam Perhitungan Debit Banjir Rencana DAS Jurug** 29-42
Destiana Wahyu Pratiwi dan Arlendenovega Satria Negara
- Uji Model Fisik 2 Dimensi Stabilitas Lapis Pelindung Struktur Jetty Muara Sungai Tukad Unda** 43-54
Ma'ruf Hadi Sutanto, Ida Ayu Irawati Diah Ratna Putra, M Hendro Setiawan, Bayu Purnama, Irham Adrie Hakiki, dan Adi Prasetyo
- Uji Tingkat Erosi Tanah dengan Variasi Intensitas Curah Hujan Menggunakan Alat Rainfall Simulator (Studi Kasus Daerah Rawan Erosi Desa Harapan, Tanete Riaja, Barru)** 55-66
Abd. Syawal A. Dali, Ansyar Pendang, dan Ratna Musa
- Evaluasi Penentuan Kebutuhan Air Pengolahan Tanah dengan Persamaan Van De Goor & Zijlstra pada Budidaya Padi Sawah** 67-76
Chusnul Arif, Moh Yanuar J. Purwanto, Satyanto Krido Saptomo, Sutoyo, Arien Heryansyah, dan Hanhan A. Sofiyuddin
- Analisis Indeks dan Penyebaran Daerah Kekeringan Akibat Fenomena ENSO di DAS Ngrowo Kabupaten Tulungagung** 77-92
Chintya Ayu Permata Herdita, Ari Murdhianti, Donny Harisuseno, dan Ery Suhartanto
- Penilaian Debit Lingkungan Berbasis Pendekatan Hidrologi pada DAS Citarum Hulu** 93-106
Ika Sari Damayanthi Sebayang, Indratmo Soekarno, M. Cahyono, dan Arno Adi Kuntoro

Jurnal TEKNIK SUMBER DAYA AIR

Jurnal Teknik Sumber Daya Air (JTSDA) adalah jurnal berbahasa Indonesia yang memuat naskah ilmiah dalam bidang Teknik Sumber Daya Air (SDA) dengan proses review secara *double-blind peer-reviewed*. JTSDA terbit 2 (dua) kali dalam setahun, *open access*, menerima berbagai tipe naskah, baik naskah penelitian (*research articles*), naskah kasus teknik (*technical notes*), ataupun naskah ulasan (*review articles*). Ketiga tipe naskah JTSDA tersebut mencakup aspek konservasi SDA, pendayagunaan SDA, pengendalian daya rusak SDA, sistem informasi SDA, serta kelembagaan SDA. JTSDA diterbitkan oleh Himpunan Ahli Teknik Hidraulik Indonesia (HATHI).

Penasehat : Ketua Umum HATHI

Pengarah : Ketua Bidang IV: Pertemuan Ilmiah, Seminar, dan Jurnal

Editor in Chief : Dr. Evi Anggraheni (Universitas Indonesia)
Hydrology, Water Resources Planning and Management, Water-related Disaster Management

Section Editors : Dr. Muhammad Ramdhan Olli (Universitas Gorontalo)
Erosion and Sedimentation Engineering, Water-related Disaster Management
Finna Fitriana, M.S. (Universitas Katolik Parahyangan)
Hydraulics, Hydrology, Water Quality

Dr. Mahendra Andiek Maulana (Institut Teknologi Sepuluh Nopember)
Hydrology, Erosion and Sedimentation Engineering, Water-related Disaster Management

Dr. Benazir (Universitas Gadjah Mada)
Coastal Engineering, Sea and Ocean Hazards, Tsunami Engineering

Dr. Roby Hambali (Universitas Bangka Belitung)
Hydrology, Erosion and Sedimentation Engineering, Water-related Disaster Management

Dr. Ani Hairani (Universitas Muhammadiyah Yogyakarta)
Hydraulics, Hydrology, Erosion and Sedimentation Engineering, Water-related Disaster Management

Stephen Sanjaya, M.Sc. (Universitas Katolik Parahyangan)
Hydrology, Water Resources Planning and Management, Water-related Disaster Management

Reviewers : Prof. Djoko Legono (UGM)	Dr. Moch Amron (HATHI)
Prof. Suripin (UNDIP)	Dr. Albert Wicaksono (UNPAR)
Prof. Budi WS (UGM)	Dr. Bobby Minola Ginting (UNPAR)
Prof. Radiana Triatmadja (UGM)	Dr. Doddi Yudianto (UNPAR)
Prof. Denik Sri Krisnayanti (UNDANA)	Dr. Eng. Farouk Maricar (UNHAS)

Assistant Editors : Asep Harhar Muharam *Copy-Editor, Layout Editor*
Ahmad Rizki Rivai *Layout-Editor, Proofreader*
Muhammad Rizki Amin *Translator, Layout-Editor,*



Alamat Redaksi:

Himpunan Ahli Teknik Hidraulik Indonesia

Gedung Direktorat Jenderal Sumber Daya Air Lt. 8
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Jl. Patimura No. 20 Kebayoran Baru, Jakarta Selatan 12100
Telepon & Fax. +6221-72792263
<http://jtsda.hathi.id> | jtsda@hathi.id

Jurnal TEKNIK SUMBER DAYA AIR

DAFTAR ISI

Daftar Isi	ii
Eksperimen Laboratorium Mekanisme Gerakan Material Vulkanik pada Berbagai Kemiringan Lereng, Intensitas Hujan, dan Ketebalan Abu Vulkanik	1-16
<i>F. Tata Yunita, Indratmo Soekarno, Joko Nugroho, dan Untung Budi Santosa</i>	
Optimasi Pengaturan <i>Release</i> Waduk Wonogiri Berbasis Neraca Air Simultan pada Dua Tampungan Waduk Terpadu	17-28
<i>Jennifer Dharmawangsa, Rachmad Jayadi, dan Kurniawan Putra Santoso</i>	
Perbandingan Pola Distribusi Hujan Terukur dan Metode Empiris dalam Perhitungan Debit Banjir Rencana DAS Jurug	29-42
<i>Destiana Wahyu Pratiwi dan Arlendenovega Satria Negara</i>	
Uji Model Fisik 2 Dimensi Stabilitas Lapis Pelindung Struktur Jetty Muara Sungai Tukad Unda	43-54
<i>Ma'ruf Hadi Sutanto, Ida Ayu Irawati Diah Ratna Putra, M Hendro Setiawan, Bayu Purnama, Irham Adrie Hakiki, dan Adi Prasetyo</i>	
Uji Tingkat Erosi Tanah dengan Variasi Intensitas Curah Hujan Menggunakan Alat Rainfall Simulator (Studi Kasus Daerah Rawan Erosi Desa Harapan, Tanete Riaja, Barru)	55-66
<i>Abd. Syawal A. Dali, Ansyar Pendang, dan Ratna Musa</i>	
Evaluasi Penentuan Kebutuhan Air Pengolahan Tanah dengan Persamaan Van De Goor & Zijlstra pada Budidaya Padi Sawah	67-76
<i>Chusnul Arif, Moh Yanuar J. Purwanto, Satyanto Krido Saptomo, Sutoyo, Arien Heryansyah, dan Hanhan A. Sofiyuddin</i>	
Analisis Indeks dan Penyebaran Daerah Kekeringan Akibat Fenomena ENSO di DAS Ngrowo Kabupaten Tulungagung	77-92
<i>Chintya Ayu Permata Herdita, Ari Murdhianti, Donny Harisuseno, dan Ery Suhartanto</i>	
Penilaian Debit Lingkungan Berbasis Pendekatan Hidrologi pada DAS Citarum Hulu	93-106
<i>Ika Sari Damayanthi Sebayang, Indratmo Soekarno, M. Cahyono, dan Arno Adi Kuntoro</i>	

EKSPERIMEN LABORATORIUM MEKANISME GERAKAN MATERIAL VULKANIK PADA BERBAGAI KEMIRINGAN LERENG, INTENSITAS HUJAN, DAN KETEBALAN ABU VULKANIK

F. Tata Yunita^{1*}, Indratmo Soekarno¹, Joko Nugroho¹, dan Untung Budi Santosa²

¹ Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

² Praktisi dan Asesor Keahlian Bidang Teknik Hidraulika Sumber Daya Air

*ftyunita@students.itb.ac.id

Pemasukan: 14 November 2022 Perbaikan: 28 November 2022 Diterima: 28 November 2022

Intisari

Perubahan iklim berdampak pada peningkatan intensitas dan frekuensi cuaca ekstrim dan menyebabkan potensi kejadian banjir lahar pasca erupsi semakin tinggi. Fokus penelitian terkait banjir lahar umumnya lebih mengamati fenomena banjir yang terjadi di alur sungai, sementara penelitian terkait mekanisme gerakan material vulkanik di lereng masih sangat terbatas. Pengamatan proses pembentukan aliran lahar di lereng puncak menjadi tantangan karena kondisi medan yang sulit dan berbahaya. Oleh karena itu, dalam penelitian ini observasi dan pengukuran mekanisme gerakan material vulkanik lereng dilakukan dengan eksperimental model fisik skala laboratorium. Eksperimen berupa demonstrasi plot (demplo) lereng yang tertutup material vulkanik (abu vulkanik gradasi <2 mm) dilakukan dalam 36 set percobaan dengan beberapa variasi kemiringan lereng (8°, 15°, 20°, 25°), intensitas hujan (45-120 mm/jam) dan ketebalan abu vulkanik (0 cm, 1 cm, 2,5 cm, 5 cm), di mana durasi percobaan maksimal 2 jam. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa mekanisme pergerakan material vulkanik di lereng terjadi dalam 2 mekanisme, yaitu longsor dan erosi. Mekanisme longsor terjadi secara rotasional pada intensitas hujan antara 55-80 mm/jam, dimana pergerakan material dipicu oleh terganggunya stabilitas lereng akibat erosi di kaki lereng dan/atau meningkatnya tegangan air pori dan bobot lapisan tanah akibat infiltrasi. Mekanisme erosi diawali dengan terbentuknya galur-galur akibat adanya aliran permukaan setelah lapisan abu vulkanik di permukaan lereng jenuh, dimana intensitas hujan pemicu umumnya >80 mm/jam. Longsor tidak terjadi pada kemiringan lereng 8°, sedangkan erosi dapat terjadi pada semua variasi kemiringan lereng. Lapisan abu vulkanik terbukti menghambat infiltrasi sehingga meningkatkan potensi terjadinya aliran permukaan dan erosi.

Kata Kunci: aliran lahar, abu vulkanik, eksperimental model fisik, longsor, erosi.

Latar Belakang

Perubahan iklim telah mempengaruhi pola hidrologi global, baik secara regional maupun sub-regional, termasuk di Indonesia. Curah hujan tahunan di wilayah selatan Indonesia seperti Jawa, Lampung, Sumatera Selatan, Sulawesi Selatan, dan

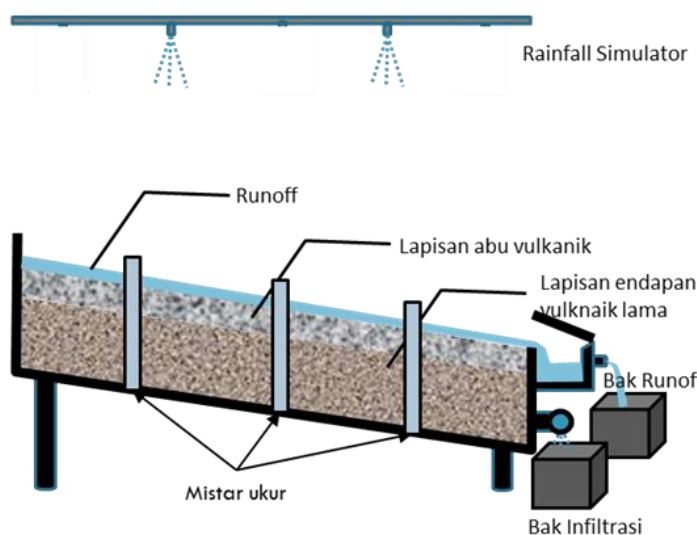
Nusa Tenggara mengalami penurunan, sedangkan di bagian utara yang terdiri dari Kalimantan dan Sulawesi Utara meningkat (Hulme & Sheard, 1999; Lasco & Boer, 2006). Sementara intensitas curah hujan dan frekuensi kejadian ekstrim terus meningkat di sebagian besar tempat di Asia Tenggara dari tahun 1960 hingga 1990, (Manton dkk., 2001). Hal ini mengakibatkan meningkatnya potensi bencana terkait hidroklimatologi, terbukti dengan semakin tingginya frekuensi kejadian banjir di berbagai wilayah.

Pasca-erupsi merupakan periode yang rentan terhadap ancaman banjir lahar di wilayah gunung berapi karena adanya deposit material vulkanik baru di lereng yang belum terkonsolidasi dan tidak stabil, sehingga pada saat hujan sangat mudah terangkut oleh aliran permukaan (Kusumosubroto, 2013). Erupsi gunung berapi secara drastis mengubah kondisi hidrologi dan angkutan sedimen pada DAS yang berada dekat sumber erupsi, banjir lahar lebih mudah terjadi bahkan dengan intensitas hujan yang rendah (Major & Mark, 2006; Gran dkk., 2011), dimana pola banjir ini terutama dipengaruhi oleh perubahan tutupan lahan karena terbakar atau tertutup oleh material erupsi. Material erupsi, baik abu vulkanik maupun piroklastik, telah mengakibatkan hilangnya vegetasi dan mengurangi kapasitas infiltrasi, serta menurunkan kekasaran (*roughness*) alami permukaan lereng (Major dkk., 1996). Penurunan kapasitas infiltrasi berdampak pada meningkatnya *runoff*, sedangkan penurunan kekasaran lereng mengakibatkan meningkatnya kecepatan *runoff*. Kedua hal tersebut merupakan faktor yang mengakibatkan pergerakan aliran material vulkanik di lereng.

Fokus penelitian terkait banjir lahar umumnya lebih mengamati fenomena banjir yang terjadi di alur sungai. Fenomena yang dikaji umumnya terkait hubungan curah hujan-limpasan (*rainfall-runoff*) dan angkutan sedimennya, beberapa diantaranya di Miyakejima (Tagata dkk., 2005), Sakurajima (Teramoto dkk., 2006; Miyata dkk., 2016), Montserrat (Alexander dkk., 2010) dan St. Helens (Major & Mark, 2006). Sementara itu penelitian terkait mekanisme pergerakan material vulkanik di lereng masih sangat terbatas, karena kendala lokasi yang sulit dan berbahaya, terlebih pada periode pasca erupsi. Untuk mengatasi kendala tersebut, beberapa penelitian melakukan eksperimen skala laboratorium, seperti eksperimen pembentukan aliran lahar dengan material abu vulkanik dari Gunung Kelud dan Chaiten (Jones dkk. 2017), eksperimen pengaruh abu vulkanik di lereng terhadap infiltrasi dan erosi (Duhita dkk., 2021), serta eksperimen peningkatan beban akibat penjejukan pada lapisan abu vulkanik (Williams dkk., 2021). Namun demikian variasi parameter kemiringan lereng dan ketebalan lapisan abu vulkanik dalam penelitian tersebut masih terbatas. Oleh karena itu, dalam penelitian ini eksperimental model fisik skala laboratorium dilakukan dengan berbagai variasi parameter intensitas hujan, kemiringan lereng dan ketebalan abu vulkanik. Penelitian ini dimaksudkan untuk memahami mekanisme pergerakan material vulkanik baru di lereng yang dipicu oleh hujan, serta meninjau beberapa parameter yang mungkin mempengaruhi mekanisme tersebut.

Metodologi Studi

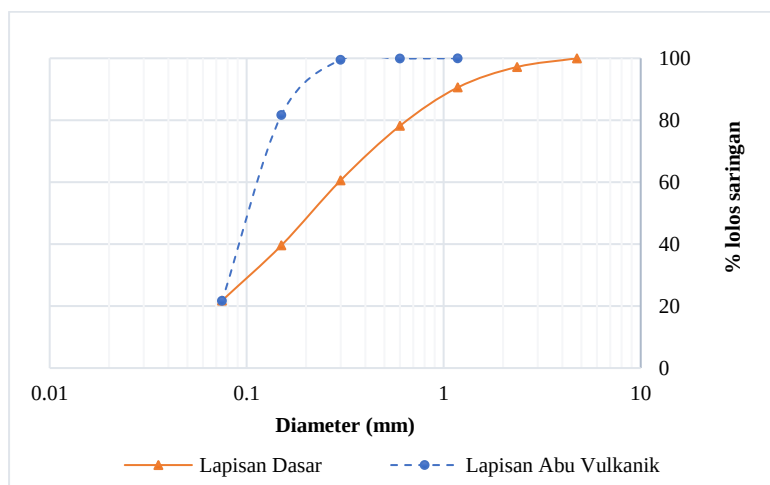
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan *rainfall simulator* untuk melihat pengaruh endapan material vulkanik terhadap mekanisme pergerakan material vulkanik baru di lereng dalam pembentukan aliran lahar. Simulasi hujan menggunakan perangkat simulator hujan artifisial (*Artificial Rainfall Apparatus*) di Laboratorium Lahar Balai Teknik Sabo Yogyakarta. Hujan yang dihasilkan oleh simulator berupa hujan yang konstan terhadap waktu. Dalam eksperimen ini akan diujikan beberapa skenario intensitas hujan, kemiringan lereng dan ketebalan abu vulkanik untuk melihat pengaruh variasi parameter terhadap mekanisme pergerakan material yang dipicu oleh hujan. Uji model fisik dilakukan dengan membuat demplot di laboratorium berukuran 3,00 m x 0,75 m dengan material lereng menggunakan pasir dan abu vulkanik bergradasi serupa kondisi di lapangan, atau berskala 1:1, ilustrasi demplot disajikan pada Gambar 1. Demplot tersebut merepresentasikan permukaan lereng dengan kemiringan tertentu (8° , 15° , 20° , 25°) yang tertutup abu vulkanik dengan variasi ketebalan 0 cm; 1 cm; 2,5 cm dan 5 cm. Gradasi material vulkanik dan curah hujan yang jatuh pada demplot menyerupai dengan kondisi alami.



Gambar 1. Ilustrasi demplot uji model fisik

Karakteristik material yang digunakan pada demplot berdasarkan sampling abu vulkanik dari erupsi Gunung Merapi tanggal 3 Maret 2020 dan 27 Maret 2020. Sedangkan material lapisan dasar mengacu pada karakteristik material lereng Gunung Merapi pada DAS Gendol. Gradasi material lapisan tanah asli dan material abu vulkanik ditampilkan pada Gambar 2.

Kalibrasi *rainfall simulator* meliputi kalibrasi diameter butir hujan dan keseragaman hujan yang dihasilkan oleh *rainfall simulator* dengan menggunakan *Flour Method* (Metode Tepung) (Hudson, 1963; Horne, 2017; Sousa Júnior, dkk. 2017). Intensitas hujan yang diujicobakan dalam kalibrasi ini konstan, namun dalam kalibrasi dicoba beberapa variasi intensitas hujan yang berkisar antara 18-74 mm/jam. Kalibrasi *rainfall simulator* dilakukan pada area seluas 3,00 m x 2,00 m yang akan digunakan dalam uji model fisik.



Gambar 2. Gradasi lapisan abu vulkanik dan lapisan dasar

Untuk diameter hujan alami, beberapa literatur telah memformulasikan fungsi hubungan diameter dan intensitas hujan dalam bentuk fungsi power (Laws & Parsons, 1943; van Dijk dkk., 2002; Yakubu dkk., 2014; Kelkar, 2021). Berdasarkan penelitian terdahulu, pada intensitas hujan tinggi, di atas 70-100 mm/jam, diameter butir hujan rata-rata menjadi relatif konstan atau mendekati nilai diameter butir hujan tertentu. Berikut ini bentuk persamaan umum dari hubungan parameter diameter butir hujan terhadap intensitas hujan alami yang berupa fungsi power:

$$D_{50} = yI^z \quad (1)$$

dengan keterangan:

D_{50} : diameter butir hujan rata-rata (mm);

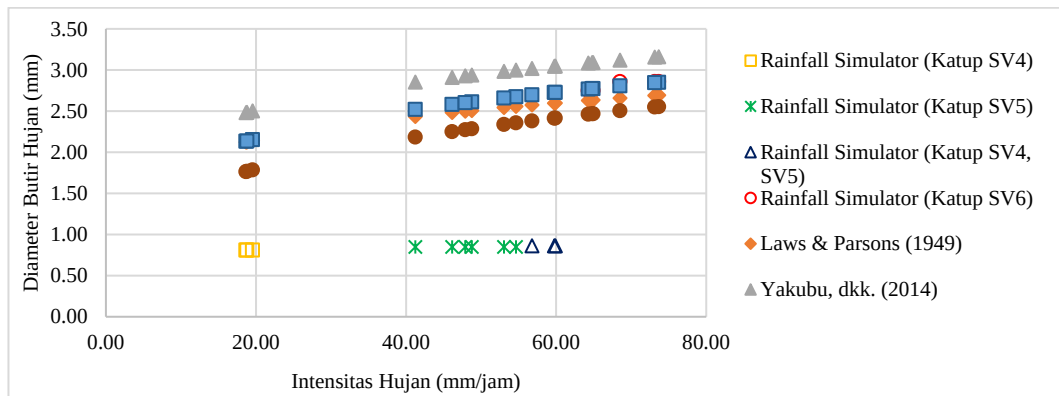
I : intensitas hujan (mm/jam);

y : konstanta (jam);

z : konstanta fungsi power tak berdimensi (*dimensionless power function constant*).

Berdasarkan beberapa penelitian terkait fungsi tersebut menunjukkan nilai konstanta y berkisar antara 0,80-1,48, sedangkan nilai z berkisar antara 0,173-0,270. Perbedaan ini terjadi karena lokasi dilakukannya penelitian yang berbeda. Sebagai contoh penelitian terhadap nilai konstanta y dan z di wilayah Washington D. C. (USA) diperoleh sebesar 1,28 dan 0,173 (Laws & Parsons, 1943), di wilayah Poona (India) sebesar 0,80 dan 0,270 (Kelkar 2021), di wilayah Skudai (Malaysia) sebesar 1,48 dan 0,176 (Yakubu dkk., 2014), sementara di wilayah Jawa Barat (Indonesia) sebesar 1,15 dan 0,211 (van Dijk dkk., 2002).

Grafik perbandingan diameter butir hujan alami dan butir hujan yang dihasilkan oleh *rainfall simulator* ditampilkan pada Gambar 3. Dari hasil kalibrasi diperoleh diameter butir hujan yang dihasilkan oleh sprinkler untuk berbagai variasi intensitas hujan pada bukaan katup 4 dan 5 sebesar 0,81-0,86 mm. Sedangkan pada bukaan katup 6 diameter butir hujan yang dihasilkan sebesar 2,75-2,86 mm. Diameter butir hujan yang dihasilkan oleh sprinkler katup 6 memberikan nilai yang mendekati diameter hujan alami dari hasil penelitian Van Dijk (2002) di wilayah Jawa Barat.



Gambar 3. Perbandingan diameter butir hujan *rainfall simulator* terhadap hujan alami

Kalibrasi keseragaman curah hujan dilakukan dengan melakukan pengukuran curah hujan pada area demplot dengan jarak interval pengukuran setiap 50 cm. Keseragaman curah hujan (C_u) yang dihasilkan oleh *rainfall simulator* dihitung dengan menggunakan formula yang dibuat oleh Christiansen (1943) berikut (Kara dkk., 2008; Maroufpoor dkk., 2010):

$$C_u = 100 \left(\frac{\sum_{i=1}^n |x - \bar{x}|}{n\bar{x}} \right) \quad (2)$$

Berdasarkan persyaratan ASTM (2019) tentang rainfall simulator untuk model erosi lahan, nilai koefisien keseragaman curah hujan harus memenuhi minimal 70% (Anon, 2019). Dari hasil kalibrasi diperoleh bahwa curah hujan yang dihasilkan oleh rainfall simulator memenuhi syarat nilai keseragaman pada intensitas hujan antara 45 – 125 mm/jam. Dengan demikian curah hujan dalam uji model hanya akan dilakukan dalam jangkauan nilai tersebut.

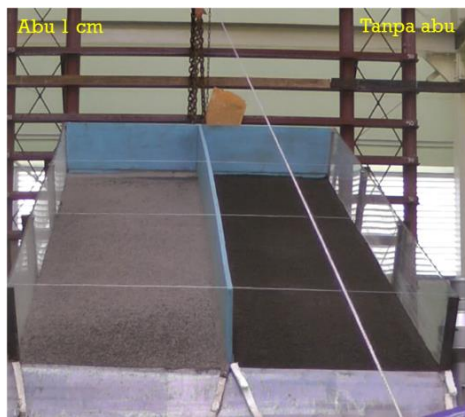
Hasil Studi dan Pembahasan

Mekanisme Pergerakan Material Vulkanik

Berdasarkan 36 eksperimen yang dilakukan, terjadi 7 kejadian longsor, 15 kejadian erosi, serta 14 kejadian tanpa erosi dan longsor. Dengan demikian, dari pengamatan uji model fisik tersebut dijumpai dua mekanisme pergerakan material vulkanik di lereng, yaitu melalui mekanisme longsor (*shallow landslide*) dan erosi (*riil and sheet erosion*). Pergerakan material vulkanik di lereng berupa longsor dapat terjadi baik pada kondisi terbentuknya aliran permukaan maupun tanpa aliran permukaan. Sedangkan mekanisme erosi terjadi akibat terbawanya material vulkanik oleh aliran permukaan. Longsor tidak terjadi pada kemiringan lereng 8° , sementara erosi dapat terjadi pada semua variasi kemiringan lereng dalam uji model.

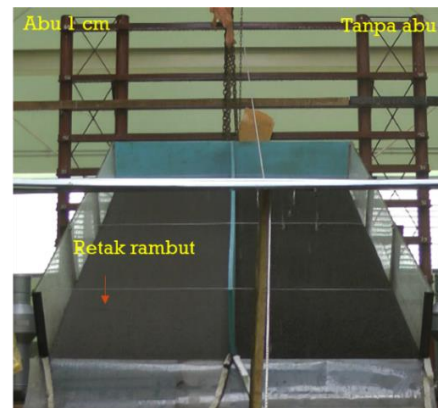
Gambar 4 menyajikan dokumentasi kronologis keruntuhan lereng dengan kemiringan demplot 25° , sebagai contoh tahapan terjadinya longsor, baik yang didahului aliran permukaan maupun tanpa aliran permukaan. Pada demplot kiri merupakan lereng yang tertutup abu vulkanik, sedangkan pada demplot kanan tanpa abu vulkanik. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa pergerakan material vulkanik di lereng demplot dengan mekanisme longsor yang didahului oleh terbentuknya aliran

permukaan, terjadi akibat erosi oleh aliran permukaan di kaki demplot yang mengakibatkan terganggunya stabilitas lereng sehingga pada akhirnya mengalami keruntuhan yang berupa longsor rotasional (lihat Gambar 4, demplot kiri). Tipikal keruntuhannya dimulai dari kaki lereng demplot yang kemudian merambat ke atas hingga puncak lereng.



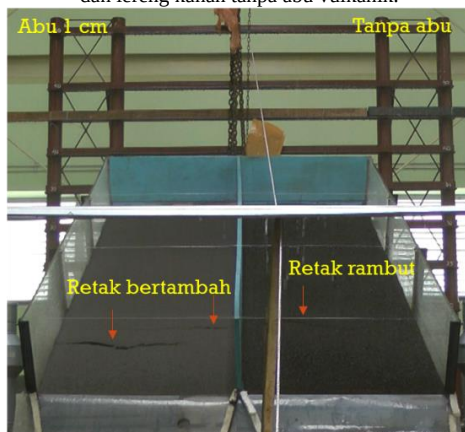
t = 0:0:0 (kondisi awal)

Lereng kiri tertutup abu vulkanik setebal 1 cm dan lereng kanan tanpa abu vulkanik.



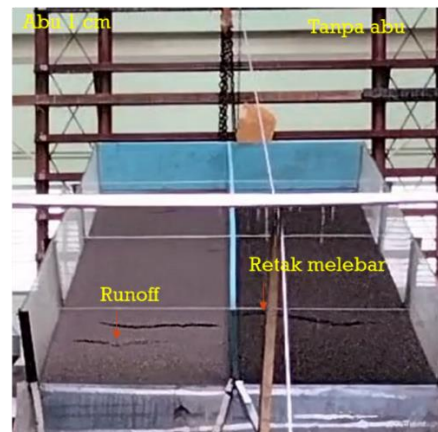
t = 0:12:45

Pada lereng kiri mulai terjadi retak rambut.



t = 0:20:15

Pada lereng kiri retak bertambah, sedang pada lereng kanan mulai muncul retak rambut.



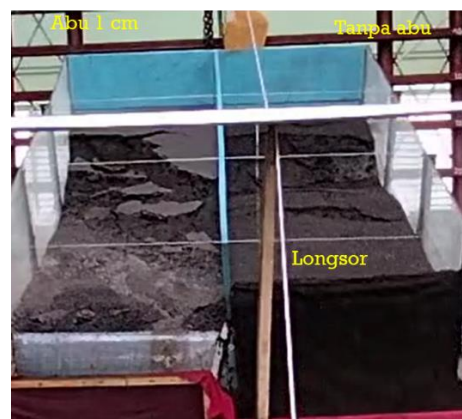
t = 0:54:56

Pada lereng kiri mulai terjadi aliran permukaan.



t = 0:59:15

Pada lereng kiri terjadi longsor rotasional dimulai dari kaki lereng.



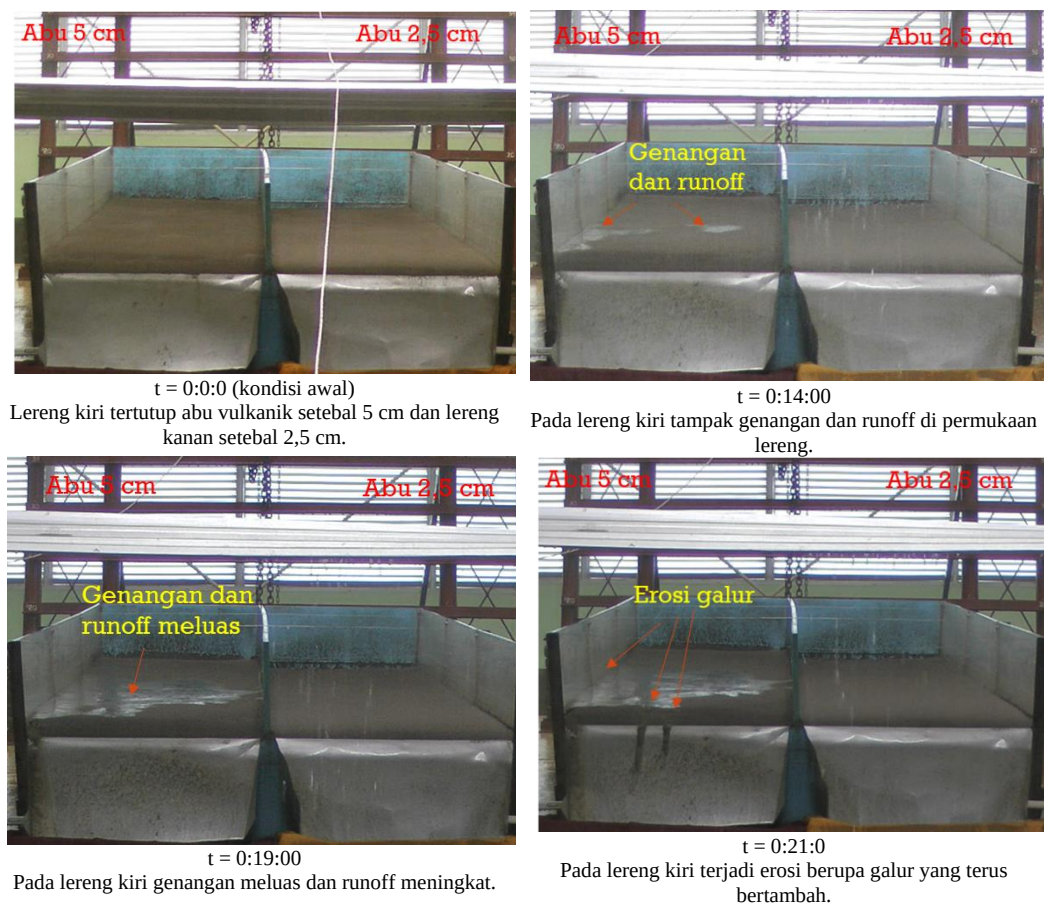
t = 1:10:40

Pada lereng kanan terjadi longsor rotasional dimulai dari puncak lereng.

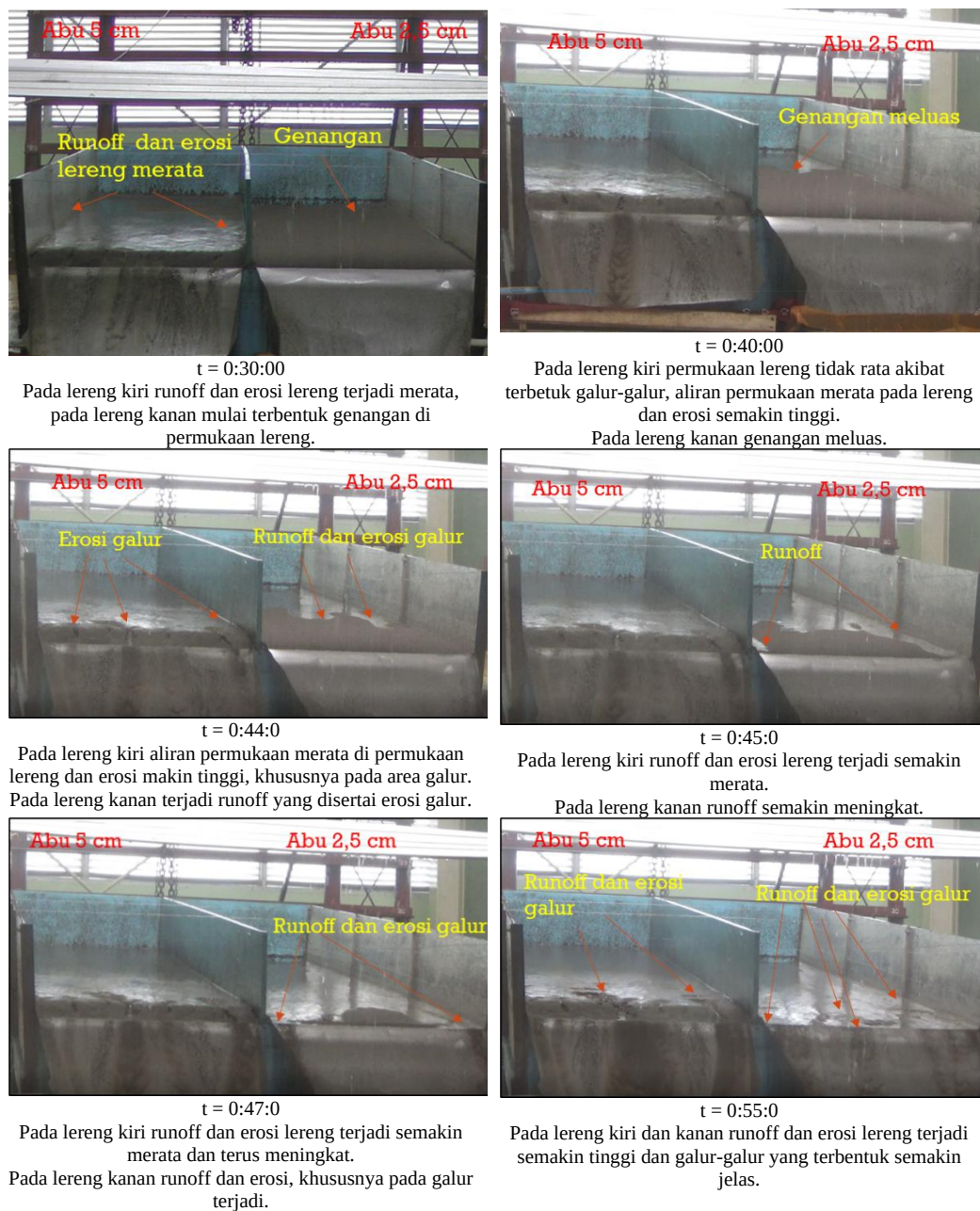
Gambar 4. Mekanisme longsor pada lereng demplot

Longsor yang tanpa didahului oleh aliran permukaan terjadi akibat infiltrasi air hujan ke dalam lapisan tanah sehingga bobot tanah dan tekanan air pori meningkat yang pada akhirnya menyebabkan stabilitas lereng terganggu. Pada longsor ini proses keruntuhannya dari bagian puncak lereng (lihat Gambar 4, demplot kanan). Longsor dengan tipikal ini hanya terjadi pada skenario lereng demplot yang tidak tertutup abu vulkanik.

Pergerakan lapisan abu vulkanik melalui mekanisme erosi diawali dengan penjuhan pada permukaan lereng (lapisan abu vulkanik) yang terlihat dari munculnya genangan yang kemudian menjadi aliran permukaan. Aliran permukaan tersebut membawa material vulkanik sehingga pada jalur aliran mulai terbentuk galur-galur kecil (*gully*), seiring waktu aliran permukaan dan erosi meningkat sehingga galur semakin besar dan bertambah banyak dan menyatu membentuk jaringan galur (*gully network*). Apabila aliran permukaan semakin meluas dan merata di sepanjang lereng, maka tidak hanya didominasi erosi galur, namun erosi lembaran (*sheet erosion*) juga mulai terjadi. Gambar 5 menyajikan kronologis proses erosi material vulkanik di lereng demplot.



Gambar 5. Mekanisme longsor pada lereng demplot



Gambar 5. Mekanisme longsor pada lereng demplot (lanjutan)

Eksperimen pergerakan material vulkanik di lereng ini, mendemonstrasikan bahwa adanya abu vulkanik di lereng meningkatkan potensi terbentuknya aliran permukaan akibat terhambatnya laju infiltrasi ke dalam lapisan tanah, sebagaimana juga ditemukan dalam beberapa penelitian terdahulu (Major & Mark, 2006; Gran dkk., 2011). Terbentuknya aliran permukaan ini berperan penting dalam fase pelepasan material vulkanik (*soil detachment*) dari lereng, semakin besar aliran permukaan maka kapasitas angkutnya semakin besar. Pembentukan aliran permukaan tidak terjadi secara merata di lereng, pada spot-spot dimana terbentuk aliran permukaan mulai terbentuk galur sehingga permukaan lereng tidak lagi rata

dan aliran semakin terakumulasi pada galur-galur yang terbentuk. Proses pembentukan aliran lahar melalui mekanisme galur ini sejalan dengan penelitian erosi tephra di lereng utara Gunung St. Helens (Amerika Serikat) yang dilakukan antara tahun 1980 dan 1983 (Collins & Dunne, 1986). Penelitian tersebut menyebutkan bahwa *riil erosion* awalnya lebih besar dari *sheet erosion*, dimana keduanya menurun satu hingga dua kali lipat dalam periode tiga tahun karena jaringan galur (*riil*) tersebut menjadi stabil dan lebih permeabel. Mekanisme ini sejalan dengan beberapa kajian yang dilakukan di wilayah Gunung Merapi, menyatakan bahwa pembentukan aliran lahar di wilayah tersebut didominasi oleh mekanisme erosi galur, dimana proses erosi ini sangat masif pada tahun pertama pasca erupsi (de Bélizal dkk., 2013; Hairani & Rahardjo, 2021).

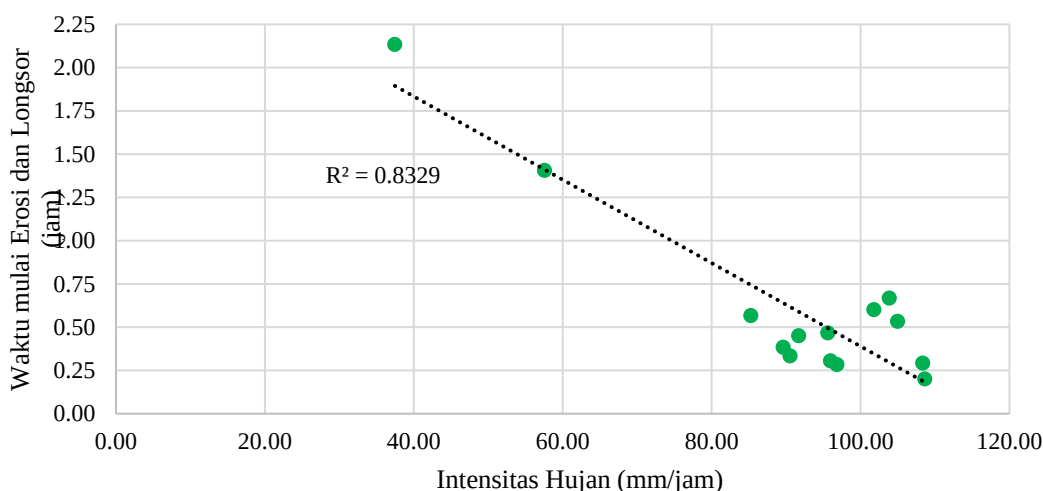
Dari hasil eksperimen ini terindikasi bahwa mekanisme pergerakan material pada lereng yang tertutup abu vulkanik ditentukan oleh faktor laju infiltrasi, dimana pada lereng tersebut lapisan abu vulkanik cenderung kurang *permeable* dibandingkan lapisan tanah asli sehingga mempengaruhi laju infiltrasi. Diduga pada kondisi intensitas hujan lebih rendah daripada laju infiltrasi maka akan cenderung terjadi mekanisme longsor, karena seluruh air hujan yang jatuh akan terserap ke dalam lapisan tanah hingga ke lapisan bawah abu vulkanik dan meningkatkan tegangan air pori. Sebaliknya, apabila intensitas hujan lebih tinggi dari laju infiltrasi maka yang terjadi adalah mekanisme erosi, dimana permukaan lapisan abu vulkanik menjadi jenuh, sehingga aliran permukaan dapat terbentuk meskipun tanah di bawah lapisan abu vulkanik belum mengalami penjumlahan. Hal ini didukung oleh hasil penelitian tentang erosi dan longsor lapisan abu vulkanik di Sakurajima (Jepang), dimana permeabilitas yang tinggi pada lapisan bawah lereng berkontribusi besar terhadap stabilitas dan kegagalan lereng biasanya terjadi ketika tekanan air pori mencapai nilai konstan atau batas maksimum (Murata & Okabayashi, 1983). Selain itu, penelitian Murata dan Okabayashi ini juga menemukan bahwa keruntuhan tidak terjadi meskipun intensitas curah hujan melebihi kapasitas infiltrasi dan menyebabkan aliran permukaan.

Intensitas dan Durasi Hujan Pemicu

Longsor terjadi pada intensitas hujan antara 56 – 80 mm/jam dengan waktu mulai terjadinya longsor berkisar antara 1,00 – 1,25 jam. Sementara untuk erosi lereng umumnya terjadi pada intensitas hujan lebih dari 80 mm/jam dengan waktu mulai terjadi erosi bervariasi antara 0,20 – 0,67 jam. Namun demikian, erosi juga terjadi pada intensitas hujan yang rendah atau kurang dari 60 mm/jam, namun dengan waktu mulai erosi lebih dari 1,00 jam. Dari pengamatan waktu mulai terjadinya erosi ini, tampak bahwa erosi lebih mudah terjadi pada skenario dimana intensitas hujan dihasilkan dari katup 6, di mana memiliki diameter butir hujan lebih besar dibandingkan katup 5. Hal ini mengindikasikan bahwa dalam proses erosi, diameter butiran hujan memiliki dampak signifikan, khususnya pada proses awal (inisiasi) erosi. Dalam hal ini, energi impak yang ditimbulkan percikan hujan membantu proses pelepasan ikatan partikel tanah/pasir sehingga memudahkan partikel tanah untuk terangkut saat sudah terbentuk aliran permukaan. Saat tumbukan antara butir hujan dan lapisan material vulkanik baru terjadi, gaya impak air menekan lapisan

tanah sehingga terdeformasi dan melontarkan partikel materil vulkanik di sekitar tumbukan. Lapisan material yang belum terkonsolidasi memiliki kekuatan tanah yang lebih rendah sehingga efek tumbukan tersebut menghasilkan rongga yang lebih besar, pelepasan tanah yang lebih besar, dan sudut percikan yang lebih besar relatif terhadap permukaan tanah (Al-Durrah & Bradford, 1982).

Pola hubungan antara intensitas hujan terhadap waktu mulai terjadinya longsor tidak ditinjau dalam hal ini karena jumlah data dan variasi intensitas hujan tidak cukup banyak untuk menyusun formula. Pola hubungan intensitas dan durasi hujan pemicu erosi disajikan dalam Gambar 6. Dari Gambar 6 tersebut terlihat adanya hubungan linier antara parameter intensitas hujan dan waktu mulai terjadinya erosi, dengan nilai korelasi (R^2) sebesar 0,83. Semakin rendah intensitas hujan maka dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk terjadinya pergerakan material vulkanik di lereng, demikian pula sebaliknya.



Gambar 6. Hubungan intensitas dan durasi hujan pemicu erosi

Apabila merujuk pada konsep pergerakan partikel tanah akibat aliran fluida, kondisi batas saat partikel tanah mulai bergerak adalah ketika tegangan geser kritis terlampaui. Parameter tegangan geser kritis tak berdimensi dinyatakan sebagai parameter Shields:

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d_s} = \frac{\rho \cdot u_*^2}{(\gamma_s - \gamma)d_s} \quad (3)$$

dengan keterangan:

τ_0 : tegangan geser kritis dari fluida;

u_* : kecepatan geser fluida;

γ_s : berat spesifik dari partikel sedimen;

γ : berat spesifik dari fluida;

d_s : adalah diameter partikel.

Dari Persamaan (3), kedalaman aliran kritis yang mengakibatkan Bergeraknya partikel abu vulkanik di lereng dapat diperoleh dengan penurunan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}\rho \cdot u_*^2 &= \tau_* (\gamma_s - \gamma) d_s \\ u_*^2 &= \frac{\tau_* (\gamma_s - \gamma) d_s}{\rho}\end{aligned}\quad (4)$$

karena $u_* = \sqrt{ghS}$ maka persamaan (4) menjadi:

$$\begin{aligned}ghS &= \frac{\tau_* (\gamma_s - \gamma) d_s}{\rho} \\ h &= \frac{\tau_* (\gamma_s - \gamma) d_s}{\rho \cdot g \cdot S} \\ h &= \frac{\tau_* (\gamma_s - \gamma) d_s}{\gamma \cdot S}\end{aligned}\quad (5)$$

dengan keterangan:

h : kedalaman aliran kritis yang mengakibatkan partikel abu vulkanik bergerak; dan

S : adalah kemiringan lereng.

Dalam Persamaan (5) terlihat parameter kemiringan lereng berbanding terbalik terhadap ketebalan aliran kritis.

Untuk menentukan nilai τ_* untuk material abu vulkanik, digunakan diagram Shields modifikasi dimana absisnya adalah diameter partikel tak berdimensi berikut:

$$d_* = d_s \left(\frac{(\gamma_s/\gamma - 1)g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (6)$$

Sedangkan persamaan untuk tegangan geser kritis adalah:

$$\tau_* = 0,3e^{-\frac{d_*}{3}} + 0,06 \cdot \tan \phi \cdot \left(1 - e^{-\frac{d_*}{20}} \right) \quad (7)$$

dengan keterangan:

ν : viskositas kinematik dari fluida;

ϕ : sudut geser dalam partikel sedimen.

Dengan memasukkan nilai properti dari abu vulkanik $d_s=0,10$ mm, $\phi=40^\circ$ dan $\gamma_s=25,72$ kN/m³, maka diperoleh nilai $d_*=2,80$ dan $\tau_*=0,125$. Berdasarkan nilai-nilai parameter abu vulkanik tersebut maka Persamaan (5) dapat dimodifikasi menjadi persamaan kedalaman aliran kritis untuk abu vulkanik sebagai berikut:

$$h = 2,03 \times 10^{-5} S^{-1} \quad (8)$$

Dalam Persamaan (8) terlihat parameter kemiringan lereng berbanding terbalik terhadap ketebalan aliran kritis.

Apabila rasio kedalaman aliran kritis terhadap total hujan dalam durasi tertentu direpresentasikan dengan koefisien kedalaman aliran kritis (K_{cr}) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}K_{cr} &= \frac{h}{I \cdot \Delta t} \\ h &= K_{cr} \cdot I \cdot \Delta t\end{aligned}\quad (9)$$

dengan keterangan:

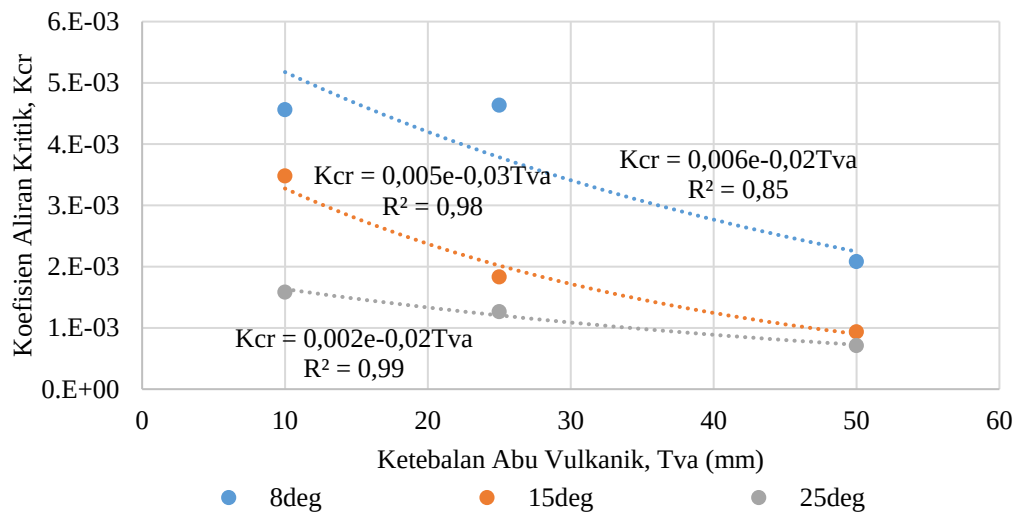
I : intensitas hujan;

Δt : durasi hujan.

Dengan mensubstitusikan Persamaan (9) ke Persamaan (8) maka diperoleh persamaan waktu kritik terjadinya erosi sebagai fungsi dari parameter intensitas hujan dan kemiringan lereng:

$$\begin{aligned} K_{cr} \cdot I \cdot \Delta t &= 2,03 \times 10^{-5} S^{-1} \\ \Delta t &= 2,03 \times 10^{-5} \cdot K_{cr} \cdot S^{-1} \cdot I^{-1} \end{aligned} \quad (10)$$

Fungsi persamaan waktu kritik terjadinya erosi pada lereng yang tertutup abu vulkanik dapat dibentuk dengan mencari nilai koefisien K_{cr} . Dengan memasukan nilai hasil pengukuran uji model fisik ke dalam Persamaan (10). Berdasarkan perhitungan tersebut diperoleh nilai K_{cr} sebagai fungsi eksponensial dari ketebalan abu vulkanik (T_{va}) sebagaimana terlihat pada Gambar 7. Dari Gambar 7 diperoleh tiga persamaan nilai K_{cr} untuk kemiringan lereng 8° , 15° dan 25° , dengan nilai korelasi (R^2) masing-masing 0,85; 0,98; dan 0,99.



Gambar 7. Hubungan koefisien K_{cr} terhadap ketebalan abu vulkanik

Berdasarkan Persamaan (10), waktu kritik terjadinya erosi merupakan fungsi dari kemiringan lereng dan intensitas hujan, dimana kedua parameter tersebut berbanding terbalik terhadap waktu kritik tersebut. Persamaan ini dapat menjadi indikator dalam memprediksi potensi pembentukan aliran lahar di lereng. Dengan persamaan waktu kritik erosi ini, potensi pembentukan aliran lahar dalam skala DAS dapat diprediksi. Dengan intensitas dan durasi hujan tertentu dapat disimulasikan secara spasial pada lereng mana material vulkanik baru mulai tererosi membentuk aliran lahar. Namun demikian, formula ini masih perlu dikalibrasi pada kondisi di lapangan dengan variasi kelembaban material vulkanik yang lebih bervariasi.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Pergerakan material vulkanik di lereng demplot terjadi dalam 2 mekanisme, yaitu melalui mekanisme longsor (*shallow landslide*) dan erosi. Longsor dapat terjadi baik pada kondisi terbentuknya aliran permukaan maupun tanpa aliran permukaan. Sedangkan mekanisme erosi terjadi akibat terlepasnya partikel material vulkanik dan terbawa oleh aliran permukaan. Longsor tidak terjadi pada skenario dimana kemiringan lereng 8^0 , sedangkan erosi terjadi pada semua skenario variasi kemiringan lereng.

Mekanisme pergerakan material vulkanik di lereng ditentukan oleh faktor laju infiltrasi air hujan pada lapisan abu vulkanik, dimana apabila intensitas hujan yang turun lebih lambat daripada laju infiltrasi maka cenderung terjadi mekanisme longsor. Sebaliknya, jika intensitas hujan lebih tinggi dari laju infiltrasi maka yang terjadi adalah mekanisme erosi. Selain itu, parameter diameter butir hujan juga berperan penting dalam proses inisiasi erosi, dimana energi dampak percikan hujan membantu proses pelepasan partikel tanah/ pasir sehingga lebih mudah terbawa oleh aliran permukaan.

Berdasarkan pendekatan tegangan geser kritis, dirumuskan bahwa waktu mulai terjadinya erosi abu vulkanik di lereng ditentukan oleh parameter kemiringan lereng, intensitas hujan dan ketebalan abu vulkanik. Kemiringan lereng dan intensitas hujan berbanding terbalik terhadap waktu mulai terjadinya erosi sehingga meningkatnya nilai parameter tersebut akan mempercepat waktu terjadinya erosi. Sedangkan bertambahnya ketebalan abu vulkanik menurunkan laju infiltrasi yang berdampak pada meningkatnya aliran permukaan dan mempercepat waktu kritik terjadinya erosi.

Saran

Eksperimen skala laboratorium mekanisme pergerakan material vulkanik di lereng yang dipicu oleh hujan ini menunjukkan pola yang konsisten, baik secara teoritis maupun terhadap penelitian lain yang serupa. Namun demikian, eksperimen ini tentunya masih memiliki beberapa kekurangan karena keterbatasan instrumen pendukung. Oleh karena itu, masih perlu dilakukan studi lebih lanjut, khususnya terkait nilai parameter penentu pergerakan material vulkanik baru di lereng pada kondisi lapangan sebagai pembandingan hasil penelitian ini.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dapat terlaksana atas dukungan berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) selaku Lembaga yang mendanai penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Balai Teknik Sabo Yogyakarta atas dukungan akses fasilitas Laboratorium Lahar dalam pelaksanaan uji model fisik.

Daftar Referensi

- Al-Durrah M.M. & Bradford J.M. 1982. The Mechanism of Raindrop Splash on Soil Surfaces. *Soil Science Society of America Journal* 46 (5): 1086–1090. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050040x>
- Alexander J., Barclay J., Sušnik J., Loughlin S.C., Herd R.A., Darnell A. & Crosweller S. 2010. Sediment-charged flash floods on Montserrat: The influence of synchronous tephra fall and varying extent of vegetation damage. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 194 (4): 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.05.002>
- Anon. 2019. Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product (RECP) Performance in Protecting Hillslopes from Rainfall-Induced Erosion. In: 10. *Standard for Test Method: American Society for Testing and Materials*.
- de Bélizal E., Lavigne F., Hadmoko D.S., Degeai J.-P., Dipayana G.A., Mutaqin B.W., Marfai M.A., Coquet M., Mauff B.L., Robin A.-K., Vidal C., Cholik N. & Aisyah N. 2013. Rain-triggered lahars following the 2010 eruption of Merapi volcano, Indonesia: A major risk. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 261: 330–347. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.01.010>
- Collins B.D. & Dunne T. 1986. Erosion of tephra from the 1980 eruption of Mount St. Helens. *Geological Society of America Bulletin* 5 (97): 896–905.
- van Dijk A.I.J.M., Meesters A.G.C.A. & Bruijnzeel L.A. 2002. Exponential Distribution Theory and the Interpretation of Splash Detachment and Transport Experiments. *Soil Science Society of America Journal* 66 (5): 1466–1474. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1466>
- Duhita A.D.P., Rahardjo A.P. & Hairani A. 2021. Effect of Slope on Infiltration Capacity and Erosion of Mount Merapi Slope Materials. *Journal of the Civil Engineering Forum* 7 (1): 71–84. <https://doi.org/10.22146/jcef.58350>
- Gran K.B., Montgomery D.R. & Halbur J.C. 2011. Long-term elevated post-eruption sedimentation at Mount Pinatubo, Philippines. *Geology* 39 (4): 367–370. <https://doi.org/10.1130/G31682.1>
- Hairani A. & Rahardjo A.P. 2021. A Theoretical Model for Debris Flow Initiation by Considering Effect of Hydrodynamic Force: *4th International Conference on Sustainable Innovation 2020–Technology, Engineering and Agriculture (ICoSITEA 2020)* Yogyakarta, Indonesia.
- Horne M. 2017. *Design and Construction of a Rainfall Simulator for Large-Scale Testing of Erosion Control Practices and Products*. Auburn University.
- Hudson N. 1963. Raindrop size distribution in high intensity storms. *Rhodesian Journal of Agricultural Research* 1 (1): 6–11.
- Hulme M. & Sheard N. 1999. Climate change scenarios for Indonesia. In: 1–13. Climatic Research Unit, WWF, Norwich, UK.

- Jones R., Thomas R.E., Peakall J. & Manville V. 2017. Rainfall-runoff properties of tephra: Simulated effects of grain-size and antecedent rainfall. *Geomorphology* 282: 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.023>
- Kara T., Ekmekci E. & Apan M. 2008. Determining the Uniformity Coefficient and Water Distribution Characteristics of Some Sprinklers. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 11 (2): 214–219. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.214.219>
- Kelkar V.N. 2021. Size distribution of Raindrops -Part I. *MAUSAM* 10 (2): 125–136. <https://doi.org/10.54302/mausam.v10i2.4040>
- Kusumosubroto H. 2013. *Aliran Debris dan Lahar*. First Edition. Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Lasco R.D. & Boer R. 2006. An integrated assessment of climate change impacts, adaptation and vulnerability in watershed areas and communities in Southeast Asia. In: 124–125. *The International START Secretariat*, Washington, D.C., USA.
- Laws J.O. & Parsons D.A. 1943. The relation of raindrop-size to intensity. *Transactions, American Geophysical Union* 24 (2): 452. <https://doi.org/10.1029/TR024i002p00452>
- Major J.J., Janda R.J. & Daag A.S. 1996. Watershed disturbance and lahars on the east side of Mount Pinatubo during the mid-June 1991 eruptions. In: C. G. Newhall & R.S. Punongbayan (eds) *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo*: 895–919. University of Washington Press.
- Major J.J. & Mark L.E. 2006. Peak flow responses to landscape disturbances caused by the cataclysmic 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington. *Geological Society of America Bulletin* 118 (7–8): 938–958. <https://doi.org/10.1130/B25914.1>
- Manton M.J., Della-Marta P.M., Haylock M.R., Hennessy K.J., Nicholls N., Chambers L.E., Collins D.A., Daw G., Finet A., Gunawan D., Inape K., Isobe H., Kestin T.S., Lefale P., Leyu C.H., Lwin T., Maitrepierre L., Ouprasitwong N., Page C.M., Pahalad J., Plummer N., Salinger M.J., Suppiah R., Tran V.L., Trewin B., Tibig I. & Yee D. 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. *International Journal of Climatology* 21 (3): 269–284. <https://doi.org/10.1002/joc.610>
- Maroufpoor E., Faryabi A., Ghamarnia H. & Moshrefi G.Y. 2010. Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler irrigation systems under different field conditions in Kurdistan Province (Northwest of Iran). *Soil and Water Research* 5 (No. 4): 139–145. <https://doi.org/10.17221/42/2009-SWR>
- Miyata S., Ahemad H., Fujita M., Tsujimoto H. & Teratani T. 2016. Temporal change of infiltration characteristics of volcanic ash layer and its effect on rainfallrunoff processess. In: *Integrated Study on Mitigation of Multimodal*

Disasters Caused by Ejection of Volcanic Product. SATREPS Workshop Kyoto, Japan.

- Murata H. & Okabayashi T. 1983. The erosion and failure of the volcanic ash slopes of sakurajima. *Technology reports of the Yamaguchi University* 3 (2): 141–150.
- Sousa Júnior S.F. de, Mendes T.A. & Siqueira E.Q. de 2017. Development and calibration of a rainfall simulator for hydrological studies. *RBRH* 22 (0). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0217170015>
- Tagata S., Yamakoshi T., Doi Y., Kurihara J., Terada H. & Sakai N. 2005. Post-Eruption Characteristics of Rainfall Runoff and Sediment Discharge at the Miyakejima Volcano, Japan. In: (*Proceedings of symposium Sediment Budget 1*: 291–301. *The 7th IAHS Scientific Assembly Foz do Iguaçu, Brazil* (IAHS Publ.).
- Teramoto Y., Shimokawa E. & Jitousono T. 2006. Effects of volcanic ash on the runoff process in Sakurajima Volcano. In: *Proceedings of the INTERPRAEVENT International Symposium "Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides"*: 303–310. *the INTERPRAEVENT International Symposium*.
- Williams G.T., Jenkins S.F., Lee D.W.J. & Wee S.J. 2021. How rainfall influences tephra fall loading — an experimental approach. *Bulletin of Volcanology* 83 (6): 42. <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01465-0>
- Yakubu M.L., Yusop Z. & Yusof F. 2014. The Modelled Raindrop Size Distribution of Skudai, Peninsular Malaysia, Using Exponential and Lognormal Distributions. *The Scientific World Journal* 2014: 1–7. <https://doi.org/10.1155/2014/361703>

OPTIMASI PENGATURAN *RELEASE* WADUK WONOGIRI BERBASIS NERACA AIR SIMULTAN PADA DUA TAMPUNGAN WADUK TERPADU

Jennifer Dharmawangsa, Rachmad Jayadi*, dan Kurniawan Putra Santoso

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada

*rjayadi@ugm.ac.id

Pemasukan: 12 Desember 2022 Perbaikan: 24 Januari 2023 Diterima: 24 Januari 2023

Intisari

Laju sedimentasi yang cukup tinggi di Waduk Wonogiri menyebabkan berkurangnya kapasitas tampungan efektif waduk dan gangguan operasional di pintu *intake* sehingga mempengaruhi kinerja waduk dalam memenuhi kebutuhan air. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, telah dibangun *closure dike* yang memisahkan tampungan waduk untuk penyimpan sedimen (*sediment storage reservoir*) dan tampungan utama (*main reservoir*), serta pintu *spillway* baru untuk penggelontoran sedimen. Oleh karena itu diperlukan kajian ilmiah dalam rangka penyesuaian pedoman operasi waduk. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan simulasi neraca air berdasarkan aturan operasi waduk yang direkomendasikan oleh Nippon Koei Co. Ltd. (2016) dengan dua opsi *control water level* (CWL), dua opsi periode *recovery*, dan tiga skenario kebutuhan air. Optimasi terhadap pengaturan *release* air waduk menggunakan fitur Solver pada Microsoft Excel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas Waduk Wonogiri dalam memenuhi kebutuhan air untuk kondisi *inflow* aliran tahun kering, normal dan basah cukup baik, dengan capaian lebih dari 93%. Secara umum, *recovery* muka air waduk untuk opsi CWL +136,30 m lebih baik dibandingkan dengan CWL +135,80 m. Hasil kajian ini dapat digunakan untuk pemutakhiran pedoman operasi Waduk Wonogiri yang lebih optimal sesuai dengan kondisi terkini dari tampungan waduk dan tujuan pengendalian sedimentasi agar umur manfaat waduk dapat dimaksimalkan.

Kata Kunci: sedimentasi waduk, operasi waduk, neraca air simultan, *control water level*, pemenuhan kebutuhan air.

Latar Belakang

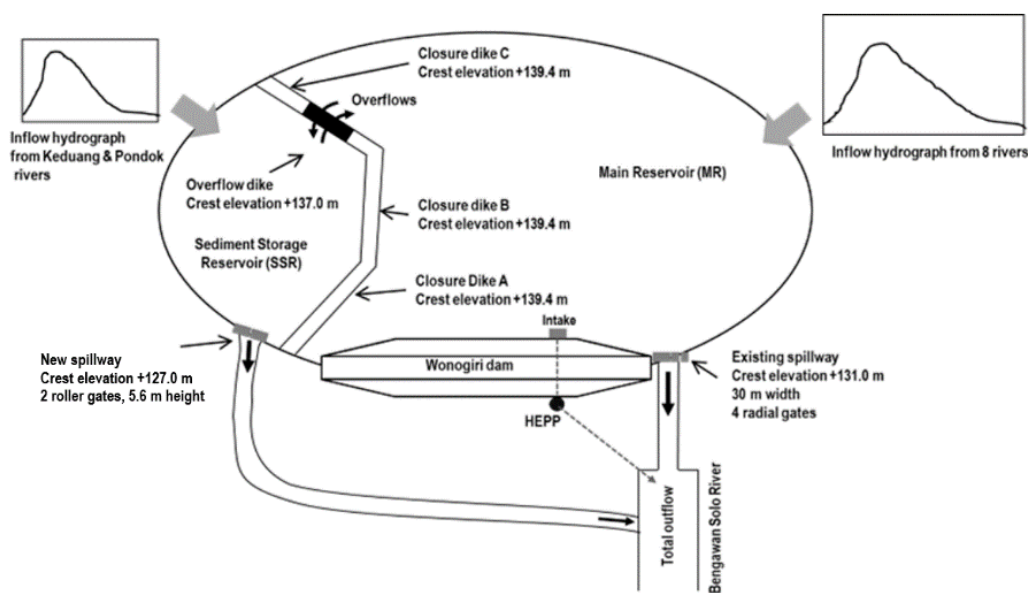
Waduk Wonogiri merupakan waduk serbaguna yang terletak di aliran utama Sungai Bengawan Solo hulu. Waduk Wonogiri mulai beroperasi secara penuh dalam memenuhi kebutuhan air irigasi di wilayah hilir serta pengendalian banjir setelah penyelesaian Proyek Irigasi Wonogiri pada tahun 1986. Aturan pengoperasian waduk dituangkan ke dalam Keputusan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 229/KPTS/1986 tentang Pedoman Eksploitasi dan Pemeliharaan Bendungan Serbaguna Wonogiri.

Waduk Wonogiri memiliki Daerah Tangkapan Air (DTA) seluas 1.343 km² yang terdiri dari sepuluh Daerah Aliran Sungai (DAS), yakni DAS Pondok, Keduang,

Kepuh, Wiroko, Temon, Solo Hulu, Alang Ngunggahan, Kedungguling, Wuryantoro, dan DAS Durensewu. Salah satu di antaranya, yakni DAS Keduang, merupakan pemasok *inflow* sedimen terbesar yang menyebabkan permasalahan sedimentasi di tampungan Waduk Wonogiri. Aliran sedimen dari DAS Keduang disebabkan oleh perubahan tata guna lahan di hulu Sungai Keduang (Samosir dkk., 2015). Endapan sedimen menyebabkan berkurangnya kapasitas tampungan waduk (USBR, 1987). Pengurangan kapasitas tampungan efektif waduk mempengaruhi kinerja waduk dalam memenuhi kebutuhan air. Tanpa adanya tindakan lanjut, Waduk Wonogiri diperkirakan akan kehilangan 62% dari total volume tampungan efektifnya pada tahun 2105 (Nippon Koei Co. Ltd., 2007).

Wulandari dkk. (2014) melakukan penelitian tentang model optimasi aturan operasi untuk meminimalkan sedimen yang mengendap di tampungan Waduk Wonogiri. Model optimasi yang digunakan adalah Colorado State University Dynamic Programming (CSUDP). Pada penelitian ini, perhitungan *reservoir routing* untuk mencapai aturan operasi waduk yang optimal belum mempertimbangkan kemungkinan terjadinya *overflow* dari MR ke SSR, karena kedua tampungan waduk tersebut diasumsikan sebagai sistem dua tampungan seri.

Berdasarkan rekomendasi dari hasil studi kelayakan yang dilakukan oleh Direktorat Jenderal Sumber Daya Air Republik Indonesia bersama Japan International Cooperation Agency (JICA) pada tahun 2007, maka dibangun *closure dike* yang memisahkan *sediment storage reservoir* (SSR) dari *main reservoir* (MR). Dengan demikian, endapan sedimen yang berasal dari DAS Keduang dan DAS Pondok dapat dilokalisasi pada SSR dan dapat digelontorkan secara terpisah melalui pintu *spillway* baru. *Inflow* dari delapan DAS yang lain akan ditampung pada MR untuk pemenuhan kebutuhan air dan PLTA. Sketsa kondisi Waduk Wonogiri terkini setelah pembangunan *closure dike* dan *spillway* baru pada SSR dapat dilihat pada Gambar 1 (Jayadi dkk., 2021).



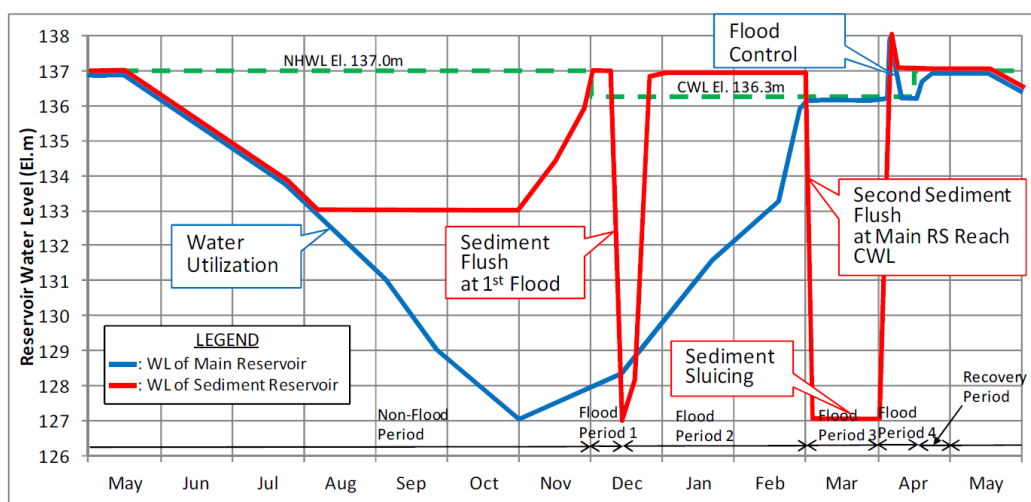
(Sumber: Jayadi dkk., 2021)

Gambar 1. Sketsa *pengelolaan* Waduk Wonogiri terkini

Seiring dengan perubahan pada kondisi tampungan waduk, maka perlu dilakukan pembaharuan terhadap ketentuan operasi waduk mengenai aturan *release* dari Waduk Wonogiri. Pembaharuan ketentuan operasi waduk melalui kajian ilmiah diharapkan mampu menghasilkan kinerja operasi waduk yang optimal dalam memenuhi kebutuhan air baku dan irigasi di wilayah hilir waduk.

Metodologi Studi

Pemodelan neraca air waduk simultan didasarkan kondisi tampungan Waduk Wonogiri setelah pembangunan *closure dike*. Data karakteristik tampungan diperoleh melalui survei batimetri yang dilakukan oleh Perum Jasa Tirta I (PJT I) pada tahun 2020. Pengaturan operasi kedua tampungan menggunakan aturan operasi waduk selama satu tahun yang disajikan pada Gambar 2 (Nippon Koei Co. Ltd., 2016).



(Sumber: Nippon Koei Co. Ltd., 2016)

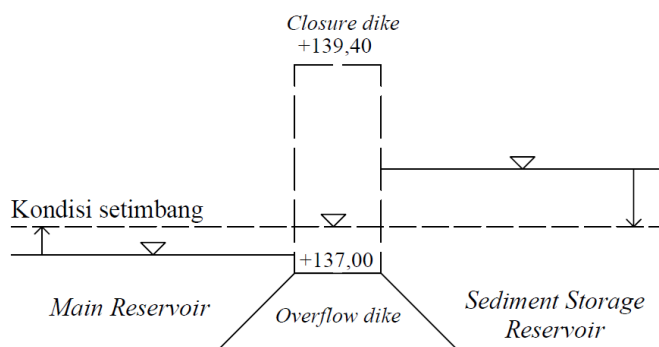
Gambar 2. Aturan operasi SSR dan MR Waduk Wonogiri selama satu tahun

Berdasarkan aturan operasi waduk di atas, satu tahun operasi waduk dibagi menjadi enam periode, meliputi periode non-banjir (1 Mei–30 November), periode banjir 1 s.d. 4 (1 Desember–15 April), dan periode *recovery* (16–30 April). Penggelontoran sedimen (*sediment flushing*) pertama pada SSR dilaksanakan pada tengah bulan Desember pertama (Des-1). Penggelontoran sedimen kedua dilaksanakan apabila elevasi muka air MR mampu mencapai CWL +136,30 m dan dilanjutkan dengan *sluicing* hingga akhir bulan Maret. Selanjutnya, PJT I bekerja sama dengan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada mengkaji dampak perubahan CWL di Waduk Wonogiri pada tahun 2020. Kajian ini meliputi simulasi neraca air serta penelusuran banjir pada dua opsi CWL, yakni +135,80 m dan +136,30 m, dengan dua variasi periode *recovery* (16–30 April dan 1–30 April). Penelitian ini selanjutnya dikembangkan berdasarkan rekomendasi dari kedua kajian tersebut.

Dalam proses pemodelan neraca air simultan pada kedua tampungan, yaitu SSR dan MR, perlu dilakukan analisis terhadap ketersediaan air dan kebutuhan air. Ketersediaan air Waduk Wonogiri dipengaruhi oleh besaran hujan yang jatuh di

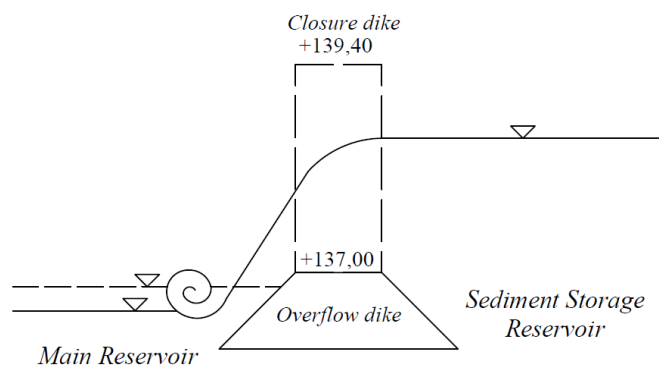
permukaan waduk, laju evaporasi, serta *inflow* dari sepuluh sub-DAS di DTA Waduk Wonogiri. Data hujan, laju evaporasi, dan debit *inflow* tengah bulanan untuk kondisi *inflow* tahun basah, normal, dan kering diperoleh dari PJT I (2020). Kebutuhan air waduk merupakan jumlah air yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan air baku dan irigasi. Data kebutuhan air Waduk Wonogiri diperoleh dari olahan data debit *release* aktual waduk dari tahun 2000 hingga tahun 2020. Peningkatan kebutuhan air baku diadaptasi dengan tiga skenario kebutuhan air, dengan peningkatan pada skenario 2 dan 3 berturut-turut sebesar $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $1,45 \text{ m}^3/\text{s}$. Besaran peningkatan kebutuhan air tersebut diperoleh dari hasil analisis data operasional waduk selama lima tahun terakhir (PJT I, 2020).

Pembangunan *closure dike* menyebabkan tampungan Waduk Wonogiri terbagi menjadi dua. Struktur lain yang dibangun meliputi *overflow dike*, *connecting gated conduit*, dan *spillway* baru. Keberadaan *overflow dike* memungkinkan perpindahan air antara SSR dan MR. Apabila terjadi *inflow* yang menyebabkan jumlah volume air kedua tampungan melebihi volume tampungan gabungan MR dan SSR pada elevasi +137,00 m, maka kondisi muka air pada kedua tampungan akan mencapai kesetimbangan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi kondisi muka air setimbang pada kedua tampungan

Di sisi lain, apabila jumlah volume air kedua tampungan tidak melebihi volume tampungan gabungan pada elevasi +137,00 m, namun elevasi muka air salah satu tampungan melebihi elevasi puncak *overflow dike*, maka terjadi aliran limpasan satu arah dari SSR menuju MR atau sebaliknya seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Ilustrasi kondisi aliran limpasan dari SSR menuju MR

Pintu *connecting gated conduit* yang dibuka selama periode non-banjir memungkinkan aliran dari SSR menuju MR. Volume air yang mengalir dari SSR merupakan volume tampungan SSR dari elevasi dasar saluran penghubung (+133,00 m) hingga elevasi puncak *overflow dike*. Pada kondisi muka air setimbang, tidak ada aliran air dari SSR menuju MR. Debit aliran maksimum yang mengalir melalui *connecting gated conduit* dihitung menggunakan rumus debit aliran pada *outlet* persegi panjang yang terendam (*submerged rectangular orifice*) sebagai berikut (USBR, 1997).

$$Q_{CC_{max}} = C_d A \sqrt{2g\Delta h} \quad (1)$$

dengan keterangan:

$Q_{CC_{max}}$: debit aliran maksimum (m^3/s),

C_d : koefisien debit,

A : luas penampang saluran (m^2),

g : percepatan gravitasi bumi (m/s^2),

Δh : selisih elevasi muka air antara SSR dan MR (m).

Pendekatan terhadap perubahan tampungan air pada SSR dan MR didasarkan pada perubahan volumetrik tampungan. Dengan demikian, sesuai dengan kondisi tampungan saat ini, neraca air pada tampungan MR dapat dinyatakan dengan Persamaan (2).

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = Q_{in} + \frac{(P-E)10^3 A}{\Delta t} \pm Q_{overflow} + Q_{CC} - Q_{out} \quad (2)$$

dengan keterangan:

ΔS : perubahan volume tampungan air waduk pada interval waktu Δt (m^3),

Δt : interval waktu hitungan (s),

Q_{in} : debit *inflow* dari sub-DAS (m^3/s),

P : hujan yang jatuh di atas genangan tampungan (mm),

E : evaporasi pada permukaan genangan tampungan (mm),

A : luas genangan tampungan (km^2),

$Q_{overflow}$: debit limpasan melalui *overflow dike* (m^3/s),

Q_{CC} : debit aliran melalui *connecting gated conduit* (m^3/s),

Q_{out} : debit *outflow* dari tampungan (m^3/s).

Jumlah *release* dari Waduk Wonogiri meliputi air yang dilepaskan dari MR untuk pemenuhan kebutuhan air (*actual release/AR*), dari SSR untuk tujuan penggelontoran sedimen serta kelebihan air yang dilepaskan melalui pengaturan pintu *spillway* lama dan *spillway* baru. Aturan operasi untuk *release* waduk ini mengikuti ketentuan seperti pada Gambar 2.

Optimasi yang dilakukan terhadap pengaturan *release* air waduk merupakan pemutakhiran hasil studi terdahulu oleh PJT I (2020) dan Haryanto (2021). Persentase layanan waduk merupakan representasi kemampuan waduk dalam memenuhi kebutuhan air. Dalam upaya memperoleh persentase layanan waduk yang paling optimal, maka dilakukan optimasi terhadap jumlah air yang dilepaskan melalui *intake* MR (AR) menggunakan fitur *add-in Solver* pada Microsoft Excel.

Rumusan model optimasi pengaturan *release* dari MR ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Rumusan optimasi release Waduk Wonogiri

Parameter	Keterangan
Objective function	$\text{Max} \left[\frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \frac{V_{out}(t)}{TR(t)} \right] = \text{Max} \left[\frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \frac{AR(t) + SP_{MR}(t) + R_{outSSR}(t)}{TR(t)} \right]$
Variables	AR(t)
Constraints	$AR(t) \leq PR(t)$ $AR(t) \leq TR(t)$ $AR(t) \geq 0,7TR(t)$ $El_{MR}(t) \geq El_{MOL}$ $El_{MR}(24) \approx El_{NHWL}$

dengan keterangan:

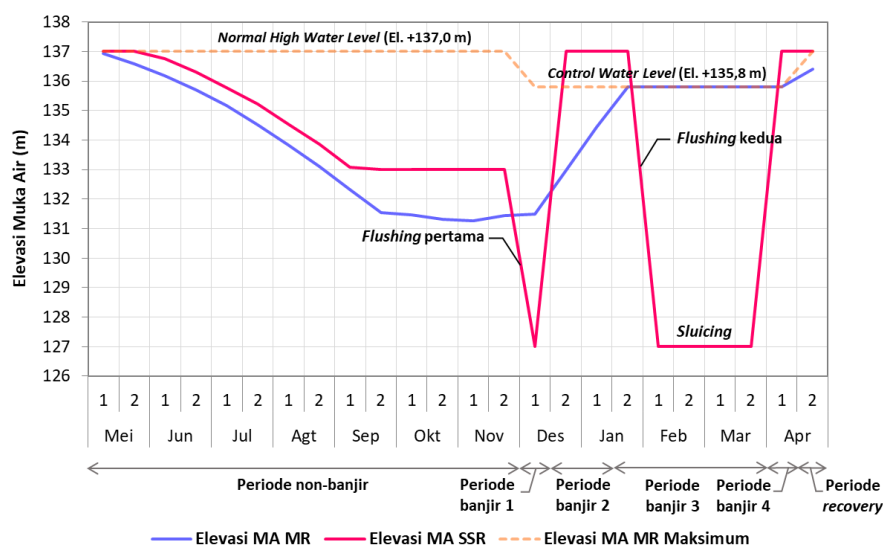
- AR(t) : debit *release* melalui *intake* di MR pada periode tengah bulan ke-t (m^3/s),
- SP_{MR}(t) : debit *release* melalui *spillway* lama pada periode tengah bulan ke-t (m^3/s),
- R_{outSSR}(t) : debit *release* melalui *spillway* baru pada periode tengah bulan ke-t (m^3/s),
- PR(t) : potensi *release* dari MR pada periode tengah bulan ke-t (m^3/s),
- TR(t) : target *release* untuk pemenuhan kebutuhan air pada periode tengah bulan ke-t (m^3/s),
- 0,7TR(t) : target *release* minimum untuk pemenuhan kebutuhan air pada periode tengah bulan ke-t (m^3/s),
- El_{MR}(t) : elevasi muka air MR pada periode tengah bulan ke-t (m),
- El_{MOL} : elevasi muka air batas operasi minimum pada MR (m),
- El_{NHWL} : elevasi muka air pada batas operasi NHWL (m).

Metode penyelesaian GRG *Nonlinear* digunakan untuk menyelesaikan masalah non-linier yang halus (*smooth nonlinear*). Metode tersebut didasarkan pada metode Karush-Kuhn-Tucker (KKT), yakni pengujian terhadap turunan pertama dari fungsi tujuan. Apabila fungsi tujuan atau *constraints* berupa non-konveks, seringkali hasil optimasi yang dihasilkan masih berupa solusi optimum lokal. Dengan demikian, metode optimasi GRG *Nonlinear* menggunakan *multistart* digunakan untuk memperoleh solusi optimum global melalui proses iterasi terhadap sejumlah nilai awal yang menghasilkan himpunan solusi optimum lokal. Solusi terbaik dari himpunan tersebut kemudian dipilih sebagai solusi optimum global (Frontline Systems Inc., 2022).

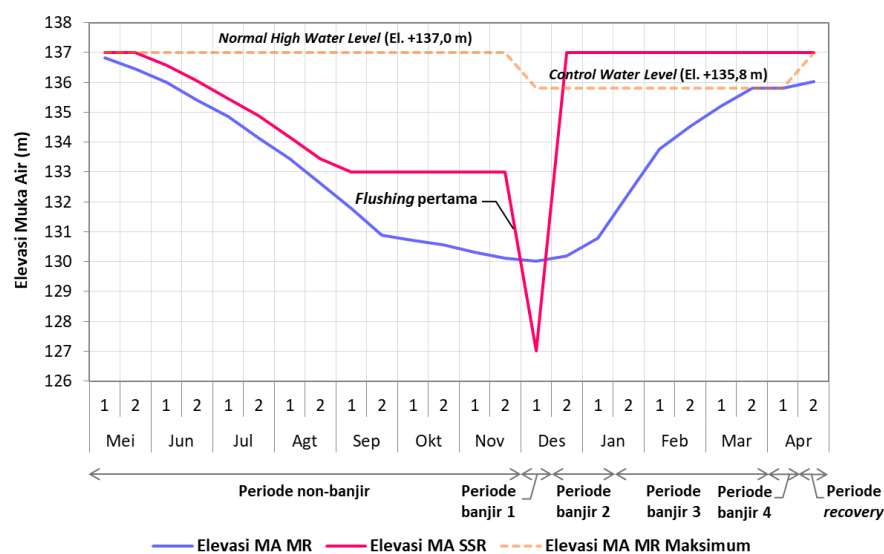
Hasil Studi dan Pembahasan

Pelaksanaan simulasi neraca air simultan dan optimasi pengaturan *release* waduk dilakukan dengan dua opsi CWL dan tiga skenario kebutuhan air pada kondisi *inflow* tahun basah, normal, dan kering. Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan fluktuasi elevasi muka air SSR dan MR untuk *inflow* tahun normal dan tahun kering

pada opsi CWL +135,80 m dengan periode *recovery* 16–30 April untuk kebutuhan air skenario 1.



Gambar 5. Fluktuasi elevasi muka air tampungan untuk *inflow* tahun normal dengan kebutuhan air skenario 1 pada CWL +135,80 m



Gambar 6. Fluktuasi elevasi muka air tampungan untuk *inflow* tahun kering dengan kebutuhan air skenario 1 pada CWL +135,80 m

Berdasarkan hasil simulasi dan optimasi pengaturan *release* waduk, *sediment flushing* dapat dilakukan dua kali pada kondisi *inflow* tahun basah dan normal. Pada kondisi *inflow* tahun kering, *sediment flushing* hanya dapat dilakukan sekali pada tengah bulan Desember pertama akibat elevasi muka air MR tidak mampu mencapai CWL selama periode banjir kedua. Tabel 2 dan Tabel 3 menyajikan perbandingan hasil penelitian ini dengan dengan penelitian terdahulu oleh PJT I (2020).

Tabel 2. Perbandingan hasil optimasi dengan hasil kajian oleh PJT I untuk CWL +135,80 m dengan periode *recovery* 16–30 April

Target Release	Periode	Persentase Layanan			El. Muka Air MR Akhir			
		(%)			(m)			
		PJT I (2020)	Optimasi	%Δ	PJT I (2020)	Δ _{NHWL}	Optimasi	Δ _{NHWL}
Skenario 1	Basah	97,50	98,86	1,36	136,72	-0,28	136,70	-0,30
	Normal	97,50	98,75	1,25	136,40	-0,60	136,40	-0,60
	Kering	91,33	98,75	7,42	136,00	-1,00	136,03	-0,97
Skenario 2	Basah	97,50	98,82	1,32	136,71	-0,29	136,70	-0,31
	Normal	97,50	98,76	1,26	136,38	-0,62	136,38	-0,62
	Kering	95,26	97,24	1,98	136,00	-1,00	136,02	-0,98
Skenario 3	Basah	97,50	98,82	1,32	136,70	-0,30	136,69	-0,31
	Normal	97,50	98,77	1,27	136,37	-0,63	136,37	-0,63
	Kering	93,37	95,61	2,24	136,00	-1,00	136,00	-1,00

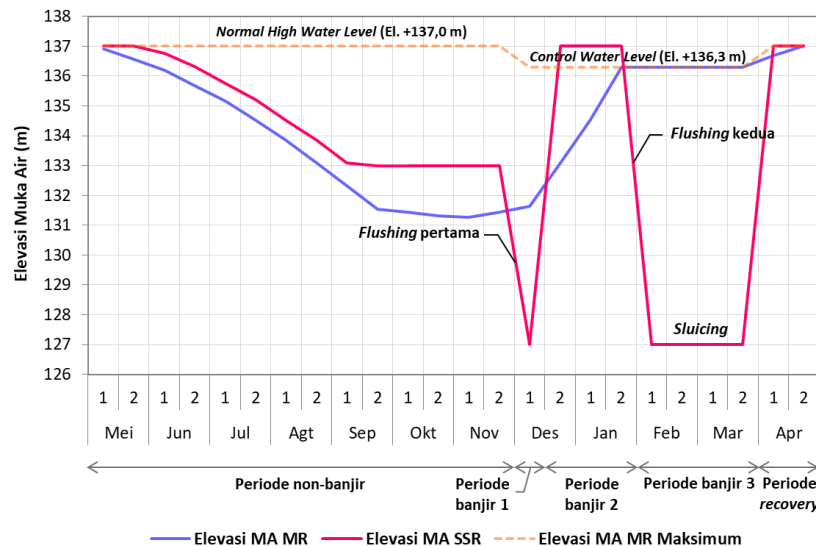
Optimasi terhadap pengaturan *release* waduk dengan periode *recovery* 16 April–30 April menunjukkan peningkatan terhadap persentase layanan pemenuhan kebutuhan air sebesar 1,25–7,42%. Selanjutnya, optimasi terhadap pengaturan *release* waduk dengan periode *recovery* 1 April–30 April memberikan peningkatan terhadap persentase layanan pemenuhan kebutuhan air sebesar 0,12–2,50%.

Tabel 3. Perbandingan hasil optimasi dengan hasil kajian oleh PJT I untuk CWL +135,80 m dengan periode *recovery* 1–30 April

Target Release	Periode	Persentase Layanan			El. Muka Air MR Akhir			
		(%)			(m)			
		PJT I (2020)	Optimasi	%Δ	PJT I (2020)	Δ _{NHWL}	Optimasi	Δ _{NHWL}
Skenario 1	Basah	97,50	100	2,50	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	97,73	0,23	137,00	0,00	137,00	0,00
	Kering	97,50	97,62	0,12	136,21	-0,79	136,32	-0,68
Skenario 2	Basah	97,50	100	2,50	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	97,64	0,14	137,00	0,00	136,99	-0,01
	Kering	95,52	95,91	0,40	136,25	-0,75	136,30	-0,70
Skenario 3	Basah	97,50	99,93	2,43	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	97,66	0,16	137,00	0,00	136,97	-0,03
	Kering	93,62	94,15	0,54	136,25	-0,75	136,29	-0,71

Berdasarkan hasil seperti pada Tabel 3, dapat dilihat bahwa kajian yang dilakukan oleh PJT I (2020) memberikan hasil yang lebih baik dari segi *recovery* muka air waduk, dengan capaian *full recovery* pada kondisi *inflow* tahun basah dan normal. Di sisi lain, optimasi pada penelitian ini memberikan perbaikan terhadap *recovery* muka air tampungan MR pada kondisi *inflow* tahun kering, dengan peningkatan elevasi muka air sebesar 0,04–0,11 m. Berdasarkan kedua hasil simulasi dan optimasi di atas, dapat dilihat bahwa *recovery* muka air waduk pada simulasi neraca air dengan periode *recovery* 1–30 April menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan dengan simulasi dengan periode *recovery* 16–30 April, yakni sebesar 0,28–0,61 m. Contoh grafik fluktuasi elevasi muka air tampungan waduk untuk kondisi *inflow* tahun normal dengan CWL +136,30 m untuk

kebutuhan air skenario 1 dengan periode *recovery* 1–30 April dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Fluktuasi elevasi muka air tampungan untuk *inflow* tahun normal dengan kebutuhan air skenario 1 pada CWL +136,30 m

Sama halnya dengan hasil simulasi dan optimasi pada opsi CWL +135,80 m, *sediment flushing* hanya dapat dilakukan sebanyak satu kali pada kondisi *inflow* tahun kering. Rekapitulasi perbandingan hasil optimasi pemenuhan kebutuhan air pada studi ini terhadap kajian terdahulu oleh PJT I (2020) untuk semua kondisi *inflow* disajikan pada Tabel 4.

Tabel 5 menunjukkan peningkatan terhadap persentase layanan waduk pada kondisi *inflow* tahun normal dan kering. Selain itu, terjadi peningkatan yang cukup signifikan terhadap *recovery* muka air waduk pada kondisi *inflow* tahun kering, dengan kisaran peningkatan sebesar 0,14–0,32 m.

Tabel 4. Perbandingan hasil optimasi dengan hasil kajian oleh PJT I untuk CWL +136,30 m dengan periode *recovery* 16–30 April

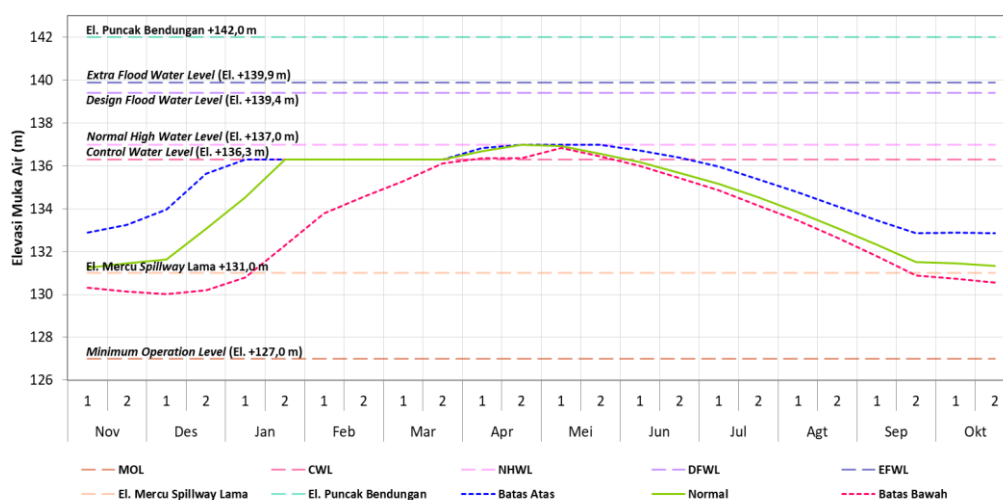
Target Release	Periode	Persentase Layanan			El. Muka Air MR Akhir			
		(%)			(m)			
		PJT I (2020)	Optimasi	%Δ	PJT I (2020)	Δ _{NHWL}	Optimasi	Δ _{NHWL}
Skenario 1	Basah	99,85	99,83	-0,02	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	98,85	1,35	136,87	-0,13	136,85	-0,15
	Kering	97,50	97,62	0,12	136,21	-0,79	136,35	-0,65
Skenario 2	Basah	99,77	99,75	-0,02	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	98,85	1,35	136,86	-0,14	136,84	-0,16
	Kering	95,30	95,76	0,46	136,00	-1,00	136,35	-0,65
Skenario 3	Basah	99,69	99,67	-0,02	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	98,84	1,34	136,85	-0,15	136,83	-0,17
	Kering	93,37	93,99	0,62	136,00	-1,00	136,32	-0,68

Tabel 5. Perbandingan hasil optimasi dengan hasil kajian oleh PJT I untuk CWL +136,30 m dengan periode *recovery* 1–30 April

Target Release	Periode	Persentase Layanan			El. Muka Air MR Akhir			
		(%)			(m)			
		PJT I (2020)	Optimasi	%Δ	PJT I (2020)	Δ _{NHWL}	Optimasi	Δ _{NHWL}
Skenario 1	Basah	99,85	100	0,15	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	100	2,50	137,00	0,00	137,00	0,00
	Kering	97,50	97,61	0,11	136,21	-0,79	136,36	-0,64
Skenario 2	Basah	99,77	100	0,23	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	100	2,50	137,00	0,00	137,00	0,03
	Kering	84,48	95,76	11,28	136,46	-0,54	136,35	-0,65
Skenario 3	Basah	99,69	100	0,31	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	99,95	2,45	137,00	0,00	137,00	0,00
	Kering	92,80	93,86	1,06	136,40	-0,60	136,35	-0,65

Hasil penelitian ini memberikan peningkatan yang cukup signifikan terhadap persentase layanan pemenuhan kebutuhan air terhadap semua skenario kebutuhan air, dengan kisaran sebesar 0,15–11,28%. Pada kondisi *inflow* tahun basah, Waduk Wonogiri mampu melayani 100% dari kebutuhan air untuk semua skenario kebutuhan air. Capaian *recovery* muka air waduk hasil kajian PJT I (2020) memberikan hasil yang lebih baik untuk kebutuhan air skenario 2 dan 3 pada kondisi *inflow* tahun kering. Hasil penelitian ini memberikan peningkatan *recovery* muka air waduk sebesar 0,15 m untuk kebutuhan air skenario 1 pada kondisi *inflow* tahun kering. Perpanjangan periode *recovery* menghasilkan peningkatan capaian *recovery* muka air waduk, dengan elevasi muka air MR yang mampu mencapai *full recovery* untuk kondisi *inflow* tahun basah dan normal.

Selanjutnya dapat disusun Pola Operasi Waduk (POW) untuk tiga skenario kebutuhan air dengan periode *recovery* muka air waduk 1–30 April. Gambar 8 menampilkan contoh *rule curve* MR untuk kebutuhan air skenario 1 dengan CWL +136,30 m.

Gambar 8. *Rule curve* MR selama satu tahun untuk skenario kebutuhan air 1 dengan CWL +136,30 m

Rule curve sebagai bagian dari POW menyajikan kurva batas operasi elevasi muka air waduk atas, normal, dan bawah yang masing-masing diperoleh dari hasil simulasi dan optimasi pada kondisi *inflow* tahun basah, normal, dan kering. Peninjauan POW dilakukan setiap lima tahun sekali atau menyesuaikan dengan perubahan fungsi atau perkembangan kondisi tampungan waduk (Kementerian PUPR, 2017).

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Hasil simulasi neraca air simultan dan pemutakhiran algoritma optimasi pengaturan *release* Waduk Wonogiri memberikan peningkatan terhadap hasil kajian terdahulu yang dilakukan oleh PJT I (2020). Persentase layanan pemenuhan kebutuhan air pada semua skenario kebutuhan air pada opsi CWL +135,80 m dan 136,30 m mengalami peningkatan sebesar 0,11–11,28%, dengan kisaran capaian pemenuhan kebutuhan air sebesar 93,86–100%. Peningkatan terhadap *recovery* muka air waduk berkisar antara 0,04 m hingga 0,32 m. Pada opsi CWL +136,30 m, tampungan MR dapat mencapai *full recovery* pada kondisi *inflow* tahun basah dan normal, sedangkan pada opsi CWL +135,80 m capaian tersebut hanya dapat diperoleh pada kondisi *inflow* tahun basah. Selain itu, perpanjangan periode *recovery* dari 16–30 April menjadi 1–30 April memberikan peningkatan terhadap capaian *recovery* muka air waduk.

Saran

Penelitian yang dilakukan belum mencakup pengaruh perubahan batas CWL terhadap fungsi waduk sebagai pengendali banjir, yang dihitung dengan simulasi *reservoir routing* secara hidraulik dengan interval waktu yang pendek setidaknya jam-jaman. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian lebih lanjut menggunakan model penelusuran banjir di waduk secara hidraulika untuk keperluan pemutakhiran aturan operasi Waduk Wonogiri pada periode banjir.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik UGM dan Perum Jasa Tirta I atas seluruh dukungan dan bantuan yang diberikan, sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan lancar sesuai dengan target capaian yang ditetapkan.

Daftar Referensi

- Frontline Systems Inc., 2022. *Frontline Solvers*. <https://www.solver.com/> [diakses pada tanggal 28 Juli 2022]
- Haryanto, Y. A., Jayadi, R., Istiarto, 2022. Pengembangan Model Optimasi Pemanfaatan Air Waduk Serbaguna Wonogiri Paska Pembangunan Closure Dike. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, Vol II(1): 1-12. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v2i1.25> [diakses pada tanggal 7 Oktober 2022]

- Jayadi, R., Istiarto, Pratiwi, E. P. A., dan Windianita, K., 2021. *Development of A Two-storage Reservoir Operation Rules for Flood Control, Case Study of Wonogiri Multipurpose Reservoir, Central Java, Indonesia*, disajikan pada *The 9th AUN/SEED-Net Regional Conference on Natural Disaster*, 15-16 Desember 2021, Johor Bahru, Malaysia. <https://doi.org/10.26226/m.61a82ed54a84e7b4701d8bb6>
- Kementerian PUPR, 2017. *Modul Operasi Waduk*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, Bandung.
- Nippon Koei Co. Ltd., 2007. *Studi Penanganan Sedimentasi Waduk Serbaguna Wonogiri Republik Indonesia*, Japan International Cooperation Agency, Tokyo.
- Nippon Koei Co. Ltd., 2016. *Study Report on Operation and Maintenance of Wonogiri Multipurpose Dam and Related Structure*, Ministry of Public Works and Housing, The Republic of Indonesia, Jakarta.
- PJT I, 2020. *Kajian Perubahan Control Water Level (CWL) Bendungan Wonogiri*, Perum Jasa Tirta I, Surakarta.
- Pradipta, A. G., 2014. *Studi Pengaruh Pembangunan Closure Dike Waduk Wonogiri terhadap Pola Operasi Waduk Periode Banjir*, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Samosir, C. S., Soetopo, W., Yuliani, E., 2015. Optimasi Pola Operasi Waduk Untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri). *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, Vol VI: 108-115.
- USBR, 1987. *Design of Small Dams*, Water Resources Technical Publication, Washington.
- USBR, 1997. *Water Measurement Manual. 3rd Edition*. <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/> [diakses pada tanggal 10 September 2022].
- Wulandari, D. A., Legono, D., Suseno, D., 2014. *Reservoir Operation to Minimize Sedimentation. International Journal of Science and Engineering*, Vol V(2): 61-65. <https://doi.org/10.12777/ijse.6.1.16-23> [diakses pada tanggal 8 Oktober 2022]

PERBANDINGAN POLA DISTRIBUSI HUJAN TERUKUR DAN METODE EMPIRIS DALAM PERHITUNGAN DEBIT BANJIR RENCANA DAS JURUG

Destiana Wahyu Pratiwi^{1*} dan Arlendenovega Satria Negara²

¹ BBWS Bengawan Solo, Direktorat Jenderal SDA, Kementerian PUPR

² BWS Sumatera V Padang, Direktorat Jenderal SDA, Kementerian PUPR

*dwp1@pu.go.id

Pemasukan: 9 Desember 2022 Perbaikan: 20 Februari 2023 Diterima: 19 Mei 2023

Intisari

Setiap perencanaan infrastruktur sumber daya air terutama bangunan sungai membutuhkan debit banjir rencana. Debit banjir rencana diperoleh dari transformasi data hujan rencana yang didistribusikan menjadi hujan jam-jaman menggunakan pola distribusi hujan berdasarkan data pencatatan hujan jam-jaman dari stasiun hujan otomatis/*Automatic Rainfall Recorder* (ARR). Permasalahannya, beberapa stasiun hujan hanya menyediakan data hujan harian dan tidak tersedia data hujan jam-jaman. Metode empiris seperti *Alternating Block Method* (ABM) dan Mononobe mampu mengatasi permasalahan ketersediaan data tersebut. Tujuan penelitian ini untuk melakukan evaluasi apakah debit rencana dengan pola distribusi hujan metode empiris dapat menggambarkan debit banjir rencana dengan pola distribusi hujan terukur. Analisis diawali dengan mencari distribusi hujan dominan dan pola distribusi hujan terukur untuk kejadian hujan lebat berdasarkan data ARR Jurug tahun 2018-2021. Hujan rencana hasil analisis frekuensi tahun 1997-2021 didistribusikan menjadi hujan jam-jaman dengan pola distribusi hujan terukur, metode ABM dan metode Mononobe selanjutnya ditransformasikan dengan hidrograf satuan terukur rata-rata untuk mendapatkan besaran banjir rencana. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan antara debit rencana dengan metode distribusi hujan terukur dan dengan metode distribusi hujan metode empiris. Penelitian menunjukkan bahwa metode distribusi hujan empiris dapat digunakan dalam analisa debit banjir rencana apabila tidak tersedia data hujan jam-jaman dengan dengan nilai korelasi, RMSE, NSE dan BIAS sebesar 1,000; 22,30; 1,000; 1,00 % untuk metode ABM dan 1,000; 7,85; 1,000; -0,37 % untuk metode Mononobe. Berdasarkan nilai statistik dan pola distribusi hujan jam-jaman menunjukkan metode Mononobe menunjukkan kesesuaian yang lebih baik dibandingkan dengan metode ABM.

Kata Kunci: debit banjir rencana, hidrograf satuan, distribusi hujan terukur, ABM, Mononobe.

Latar Belakang

Banjir merupakan permasalahan rutin yang sering terjadi di Sungai Bengawan Solo. Upaya mengurangi resiko dan dampak banjir sejak awal salah satunya dengan

membuat infrastruktur pengendalian banjir seperti tanggul, perkuatan tebing sungai, tampungan air baik berupa embung, danau maupun bendungan. Dalam perencanaan infrastruktur diperlukan data debit banjir rencana yang tepat dengan tujuan infrastruktur yang dibuat dapat efisien namun mampu mengendalikan banjir secara efektif. Berdasarkan SNI 2451: 2016 tentang Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana, debit banjir rencana dapat dianalisis menggunakan data pencatatan debit banjir sesaat maksimum tahunan atau menggunakan data hujan yang ditransformasikan dengan hidrograf satuan baik hidrograf satuan terukur maupun hidrograf santuan sintetis seperti *Soil Conservation Service* (SCS), Snyder, Gama I, ITB dan Limantara.

Data hujan yang terukur merupakan data hujan titik sehingga perlu dianalisis data hujan wilayah kemudian dilakukan analisis frekuensi untuk mendapatkan hujan rencana. Hujan rencana tersebut perlu didistribusikan menjadi hujan jam-jaman menggunakan pola distribusi hujan berdasarkan data pencatatan hujan jam-jaman dari stasiun hujan otomatis. Permasalahan yang terjadi adalah beberapa stasiun hujan hanya menyediakan data hujan harian dan tidak tersedia data hujan jam-jaman, sehingga membutuhkan alternatif metode perhitungan lain yang diantaranya adalah metode ABM dan Mononobe.

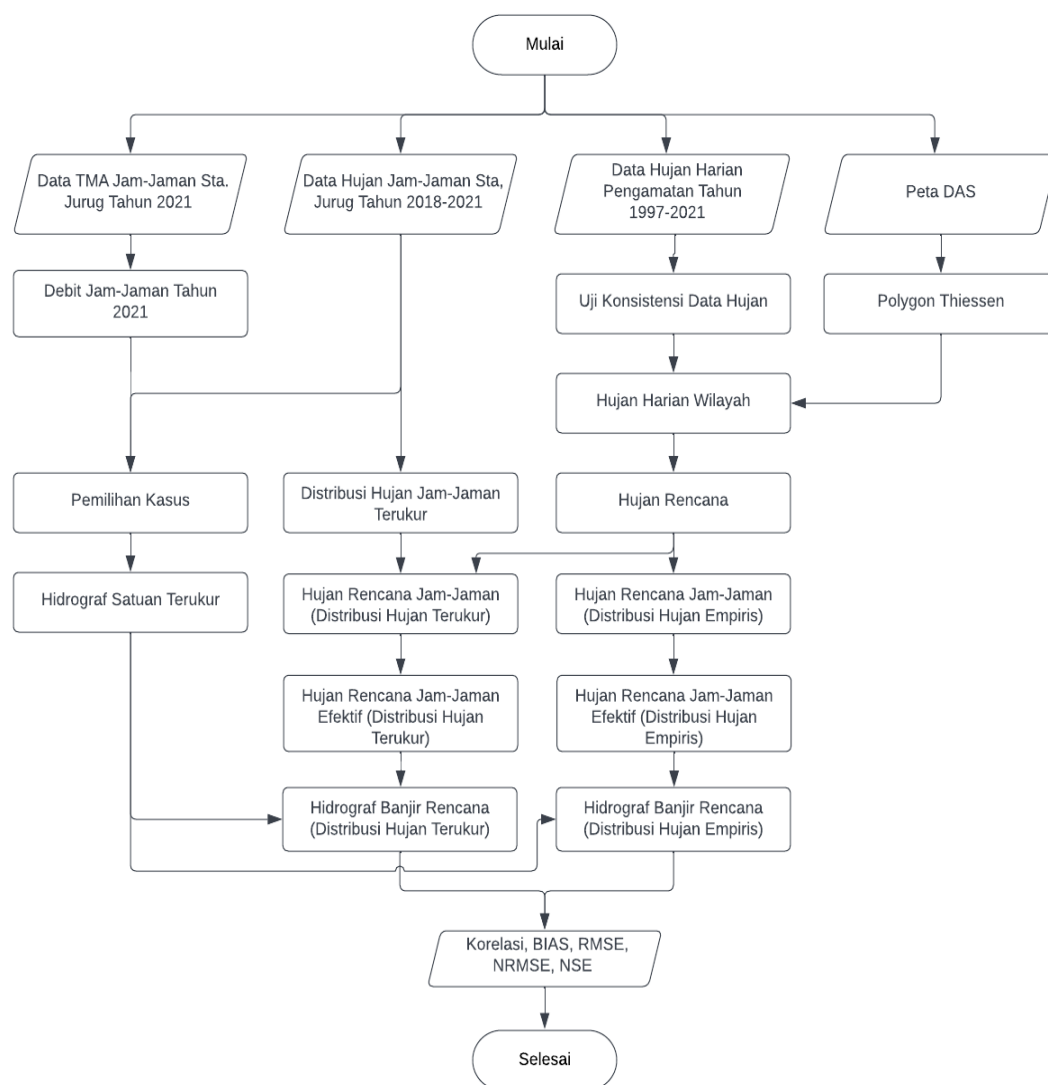
Distribusi hujan jam-jaman dipengaruhi dari durasi hujan yang terjadi. Menurut Gustoro (2022), durasi hujan dominan untuk kejadian hujan lebih dari 50 mm yang terukur di DAS Progo selama 5 jam dan 7 jam. Menurut Sofia (2016), durasi hujan dominan untuk kejadian hujan lebih dari 50 mm yang terukur di 20 stasiun hujan Wilayah Merapi bervariasi selama 2 jam, 3 jam, 4 jam dan 7 jam. Menurut Pratama (2021) durasi hujan dominan untuk kejadian hujan lebih dari 50 mm yang terukur di DAS Ciliwung bervariasi selama 4 jam – 6 jam.

Selain durasi, pemilihan metode distribusi hujan juga sangat mempengaruhi kesesuaian hasil analisis. Menurut Annaji (2021), pola distribusi hujan pada DAS Opak Yogyakarta dengan durasi hujan 2 jam metode ABM memiliki kesesuaian yang lebih baik, durasi hujan 3 jam dan 4 jam metode Mononobe memiliki kesesuaian yang lebih baik sedangkan durasi lama hujan 5,6,7 dan 8 jam tidak dapat didekati dengan metode empiris karena penyimpangan terlalu besar. Menurut Hardianti (2021), pola distribusi hujan pada DAS Reak Lombok Utara dengan durasi hujan 2 dan 3 jam metode ABM memiliki kesesuaian yang lebih baik dan durasi hujan 5, 6, 7, dan 8 jam tidak dapat menggunakan metode empiris karena penyimpangan yang besar. Menurut Rahmani (2016) metode distribusi hujan Mononobe tidak bisa diterima untuk mengubah hujan jam-jaman di DAS Tirtomoyo karena selisih hujan tiap jam, volume, debit puncak dan waktu puncak hidrograf pada satu kejadian banjir melebihi 20%.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi apakah debit rencana dengan pola distribusi hujan metode empiris dapat menggambarkan debit banjir rencana dengan pola distribusi hujan terukur dan metode empiris yang lebih memadai apabila tidak ada data hujan jam-jaman.

Metodologi Studi

Metode yang digunakan dalam penelitian ini diawali dengan pengumpulan data, analisis data dan diakhiri dengan penarikan kesimpulan. Data yang dikumpulkan berupa data sekunder yaitu data peta DAS, data hujan dan data tinggi muka air pengamatan yang diperoleh dari BBWS Bengawan Solo. Data hujan pengamatan yang diperoleh berupa data hujan harian dari Stasiun Hujan Colo, Pabelan, Tritis, Manyaran, Waduk Delingan, Baturetno, Nepen dan Tawangmangu tahun 1997 s.d 2021 serta data hujan jam-jaman *ARR* Jurug pada tahun 2018 s/d 2021. Sedangkan data tinggi muka air yang diperoleh berupa data tinggi muka air *AWLR* Jurug pada tahun 2021. Berdasarkan data *AWLR* dan data *ARR* jam-jaman dilakukan pemilihan kasus, dalam penelitian ini dipilih tiga kasus kejadian hujan-debit untuk selanjutnya dianalisis hidrograf satuan terukur. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



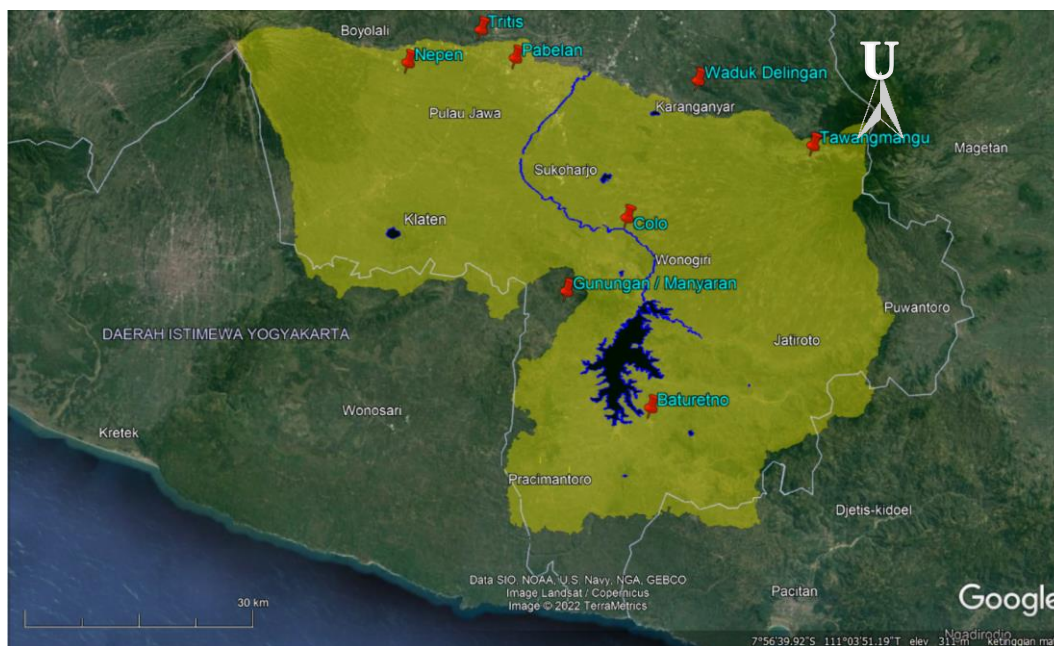
Gambar 1. Diagram alir penelitian

Uji Konsistensi Data Hujan

Analisis diawali dengan melakukan uji konsistensi data hujan. Menurut Sri Harto (2009), kepenggahan data hujan dapat diuji dengan metode kurva massa ganda (*double mass curve*) atau dengan *Rescaled Adjusted Partial Sums* (RAPS). Metode RAPS (Buishand, 1982) lebih dipercaya karena cara ini menguji kepenggahan data hujan stasiun dari data stasiun itu sendiri.

Hujan Harian Wilayah

DAS Jurug memiliki luas sebesar 2029,95 km² dengan hujan wilayah ditentukan dengan metode *Polygon Thiessen* sesuai dengan ketersediaan data hujan pada 8 pos hujan sebagaimana ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi stasiun hujan pada DAS Jurug

Hujan Rencana

Hujan rencana dianalisis menggunakan analisis frekuensi. Menurut Triatmodjo (2015), jenis distribusi statistik yang sering dipakai dalam analisis frekuensi untuk hidrologi adalah: distribusi normal, Log Normal, Log Pearson III dan Gumbel. Pengujian *Chi Kuadrat* dan *Smirnov Kolmogorov* perlu dilakukan untuk menguji apakah jenis distribusi yang dipilih sesuai dengan data yang ada.

Distribusi Hujan Jam-jaman

Menurut Triatmodjo (2015), distribusi hujan dapat diturunkan dari pengamatan data hujan jam-jaman dari kejadian-kejadian hujan lebat. Pola distribusi rerata yang diperoleh dengan mereratakan pola distribusi hujan hasil pengamatan dianggap mewakili kondisi hujan dan dipakai untuk mendistribusikan hujan rancangan menjadi besaran hujan jam-jaman. Untuk metode distribusi hujan Mononobe, intensitas hujan dapat dicari dengan rumus berikut:

$$I = \frac{R_{24}}{24} \left[\frac{24}{t_c} \right]^{2/3} \quad (1)$$

dengan keterangan:

I : intensitas curah hujan (mm/jam)

R_{24} : Curah hujan maksimum harian (selama 24 jam) (mm)

t_c : waktu konsentrasi (jam)

Metode distribusi hujan ABM memiliki sedikit perbedaan dengan Mononobe yaitu mencari selisih ketebalan hujan yang kemudian diurutkan kembali dengan intensitas maksimum berada pada tengah-tengah total durasi hujan (T_d) dan blok-blok sisanya disusun dalam urutan menurun secara bolak-balik pada kanan dan kiri dari blok tengah.

Hujan Jam-jaman Efektif

Menurut Triatmodjo (2015), hujan efektif/*excess rainfall* adalah bagian dari hujan yang menjadi aliran langsung di sungai. Hujan efektif ini adalah sama dengan hujan total yang jatuh ke permukaan tanah dikurangi dengan kehilangan air. kehilangan air yang juga sering disebut sebagai abstraksi (*abstraction*) meliputi air yang hilang karena terinfiltrasi, tertahan dicekungan-cekungan di permukaan tanah (tampungan permukaan, *depression storage*) dan karena penguapan. Untuk hujan deras yang terjadi dalam waktu singkat, penguapan dapat diabaikan.

The Soil Conservation Service (SCS, 1972, dalam Chow 1988) telah mengembangkan metode untuk menghitung hujan efektif dari hujan deras, dalam bentuk persamaan berikut:

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \times 25.4 \quad (2)$$

$$I_a = 0.2 S \quad (3)$$

$$\sum Pe = \frac{(\sum P - I_a)^2}{(\sum P - I_a + S)} \quad (4)$$

dengan keterangan:

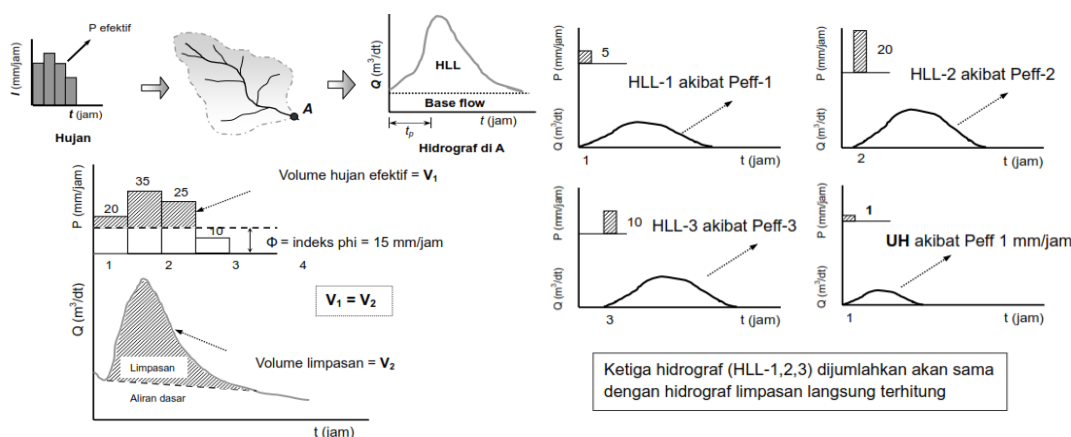
S : *potential maximum storage* (mm),

I_a : *Initial Abstraction* (mm) dan

Pe : *Rainfall Excess* (mm).

Debit Banjir Rencana

Menurut Sujono dan Jayadi (2007), debit banjir rancangan dihitung dengan mentransformasikan hujan rancangan dengan hidrograf satuan terukur di DAS yang ditinjau. Menurut Jayadi dan Sujono (2008), prosedur analisis hidrologi untuk masalah banjir rancangan dapat dikelompokkan berdasarkan kasus yang dijumpai. Untuk mendapatkan hidrograf banjir bila tersedia data hujan jam-jaman dan hidrograf banjir, maka tahapan analisis yang dipakai adalah analisis frekuensi data hujan dan pengalihragaman hujan-aliran (*Unit hydrograph*). Hidrograf satuan dapat ditentukan dengan cara analitis yang memiliki skema seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.



(Sumber: Jayadi dan Sujono, 2008)

Gambar 3. Skema hitungan hidrograf satuan cara analitis

Keakuratan Metode Empiris

Annaji (2021), Hardianti (2021) dan Anggraheni (2019) melakukan analisis kesesuaian pola distribusi hujan metode empiris dengan metode terukur berdasarkan penyimpangan yang terlihat pada grafik perbandingan pola distribusi hujan. Sedangkan Rahmani (2016) dan Christian (2017) menganalisis kesesuaian pola distribusi hujan dengan membandingkan hasil hidrograf banjir menggunakan pola distribusi hujan terukur dan menggunakan pola distribusi hujan empiris.

Gustoro (2022) melakukan melakukan analisis hubungan metode empiris dengan metode terukur dengan nilai korelasi sebagai berikut:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n (E_i O_i) - \sum_{i=1}^n (E_i) \sum_{i=1}^n (O_i)}{\sqrt{\{n \sum_{i=1}^n (E_i^2) - (\sum_{i=1}^n E_i)^2\} \{n \sum_{i=1}^n (O_i^2) - (\sum_{i=1}^n O_i)^2\}}} \quad (5)$$

dengan keterangan:

$\bar{E}_i$: nilai rerata deret E_i ,

$\bar{O}_i$: nilai rerata deret O_i ,

E_i : data debit dengan distribusi hujan metode empiris,

O_i : data debit dengan distribusi hujan terukur.

Selain menggunakan nilai korelasi, Na dan Yoo (2018) menguji metode empiris dengan metode terukur dengan nilai RMSE (*Root Mean Squared Error*) sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad (6)$$

Yani dkk. (2021) melakukan perbandingan pola distribusi hujan empiris dengan pola distribusi hujan terukur berdasarkan nilai RMSE dan nilai NSE (*Nash-Sutcliffe Efficiency*) sebagai berikut:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (7)$$

Pratama dkk. (2021) melakukan perbandingan hasil simulasi dengan observasi berdasarkan nilai RMSE, NSE dan BIAS.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100\% \quad (8)$$

Hasil Studi dan Pembahasan

Uji konsistensi data hujan menyatakan data hujan semua stasiun pangkah dan dapat dilanjutkan untuk perhitungan hujan wilayah menggunakan *Polygon Thiessen*. Variasi *Polygon Thiessen* didasarkan ketersediaan data hujan pada tahun terkait. Adapun salah satu variasi bobot polygon ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hujan rencana

No	Nama Stasiun	Luas (km ²)	Bobot Thiesen
1	Colo	420,81	0,21
2	Pabelan	261,28	0,13
3	Tritis	32,28	0,02
4	Manyaran/Gunungan	262,09	0,13
5	Waduk Delingan	145,54	0,07
6	Nepen	674,88	0,33
7	Tawangmangu	232,75	0,11
Total		2029,63	1,00

Distribusi hujan Log Pearson III dipilih berdasarkan hasil analisis uji frekuensi Chi Kuadrat dan Smirnov Kolmogorov. Hasil analisis hujan rencana dengan metode log person disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hujan rencana

Distribusi Log Pearson III		
T	Prob (%)	P _{rencana} (mm)
20	4	134,55
50	2	141,51

Durasi hujan dan pola distribusi hujan dominan dihitung berdasarkan data hujan jam-jaman ARR Jurug tahun 2018 s/d 2021. Jumlah total kejadian hujan yang terukur sebanyak 2078 kali kejadian dengan durasi hujan dan pola distribusi hujan dominan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Durasi hujan dominan

Keadaan Hujan	Intensitas Hujan (mm)		Durasi dominan	Jumlah Kejadian (Kali)
	1 jam	24 jam		
Hujan sangat ringan	<1	<5	1	521
Hujan ringan	1-5	5-20	2	205
Hujan normal	5-10	20-50	3	92
Hujan lebat	10-20	50-100	6	30
Hujan sangat lebat	>20	>100		

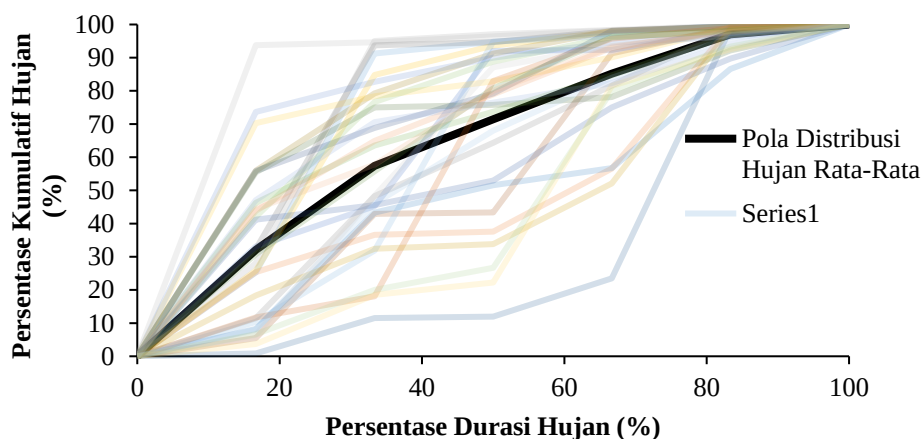
Durasi hujan dominan untuk hujan lebat selama 6 jam, hujan normal selama 3 jam dan hujan ringan selama 2 jam. Prosentase hujan tiap jam untuk masing-masing

durasi dominan dirata-rata untuk mendapatkan distribusi hujan jam-jaman terukur masing-masing keadaan hujan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Prosentase distribusi hujan jam-jaman masing-masing keadaan hujan

Keadaan Hujan	Hujan sangat ringan	Hujan ringan	Hujan normal	Hujan lebat
Intensitas Hujan (mm) 24 jam	<5	5-20	20-50	50-100
Jam Ke	% P untuk hujan dengan durasi			
	1 jam	2 jam	3 jam	6 jam
1	100,00%	60,34%	38,45%	32,06%
2		39,66%	43,64%	25,33%
3			17,91%	14,07%
4				13,72%
5				11,86%
6				2,97%

Berdasarkan data pengamatan, untuk keadaan hujan lebat cenderung tinggi pada jam pertama dan akan menurun pada jam berikutnya. Adapun pola distribusi hujan rerata jam-jaman untuk hujan lebat (durasi dominan 6 jam) ditunjukkan pada Gambar 4



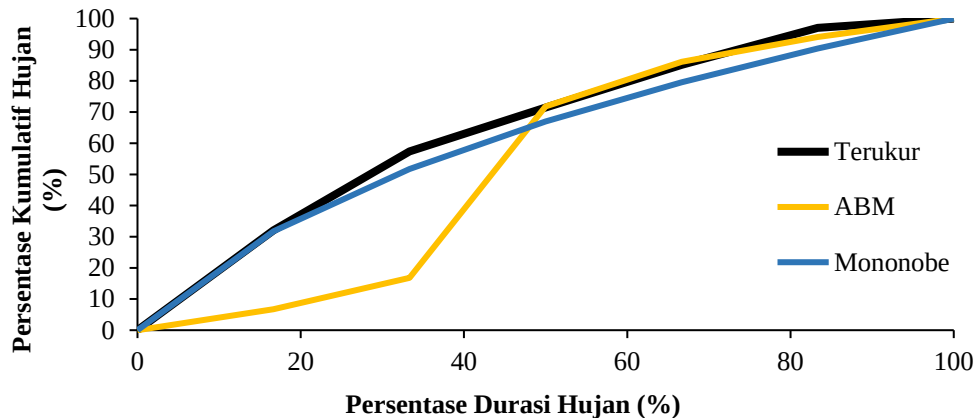
Gambar 4. Pola distribusi hujan rerata durasi 6 jam

Durasi hujan dominan untuk kejadian hujan lebat 6 jam sehingga untuk analisis distribusi hujan ABM dan Mononobe menggunakan asumsi durasi hujan 6 jam sehingga diperoleh Persentase Distribusi Hujan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 5. Persentase distribusi hujan jam-jaman metode empiris

Jam ke-		0	1	2	3	4	5	6
P (%)	ABM	0,00	6,75	10,03	55,03	14,30	7,99	5,90
	Mononobe	0,00	31,72	19,98	15,25	12,59	10,85	9,61

Adapun perbandingan pola distribusi hujan terukur dan metode empiris ditunjukkan pada Gambar 5.

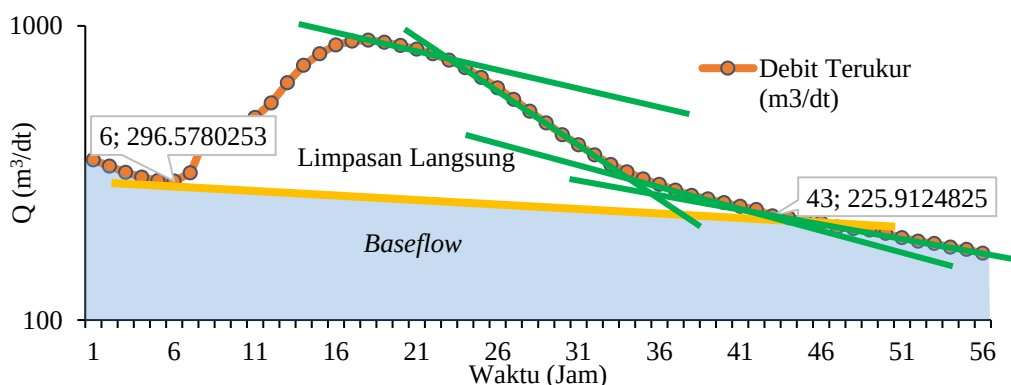


Gambar 5. Perbandingan pola distribusi hujan rerata durasi 6 jam

Gambar 5 menunjukkan hasil penelitian sesuai dengan penelitian Annaji (2021) dan Anggraheni (2019) yang menyatakan distribusi Mononobe memiliki kesesuaian yang lebih baik dari metode ABM. Namun berbeda dengan Hardianti (2011) yang menyatakan untuk durasi hujan 6 jam, metode ABM memiliki kesesuaian yang lebih baik dari metode Mononobe. Persentase distribusi hujan masing-masing metode selanjutnya digunakan untuk transformasi hujan harian rencana menjadi hujan jam-jaman. Hujan jam-jaman dicari besaran hujan efektif yang menyebabkan limpasan dengan metode *Curve Number* (CN). Berdasarkan analisis data tata guna lahan, DAS Jurug memiliki nilai CN sebesar 69,77.

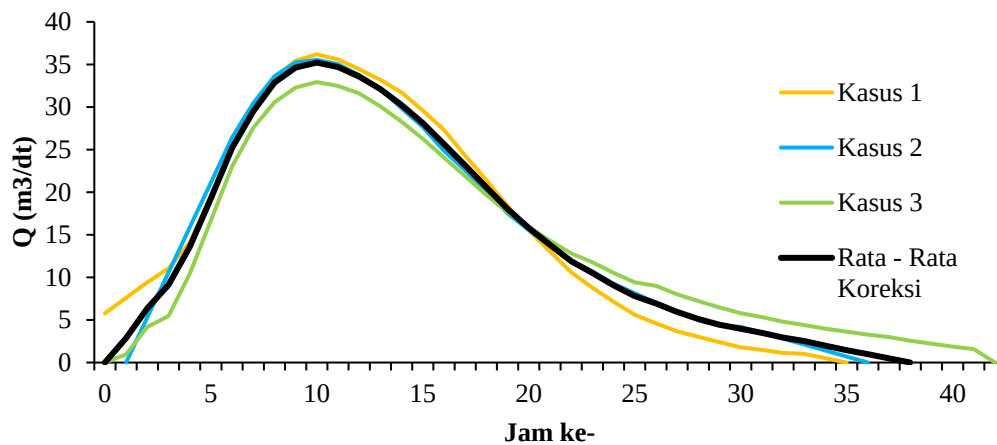
Transformasi hujan-aliran menggunakan metode hidrograf satuan terukur rata-rata dari tiga pasangan hujan-debit yang terjadi pada 15-17 April 2021 (kasus 1), 16-18 Juni 2021 (kasus 2) dan 23-25 Desember 2021 (kasus 3).

Untuk menghitung hidrograf satuan, hidrograf limpasan langsung dan *baseflow* harus dipisahkan. Cara pemisahan *baseflow* yang dipakai adalah metode *Straight Line Method* dengan cara menarik garis lurus dari awal naiknya hidrograf terukur sampai titik awal *baseflow* di kertas semi logaritmik dengan sumbu debit (Q) dalam skala logaritmik seperti contoh yang ditunjukkan pada Gambar 6.



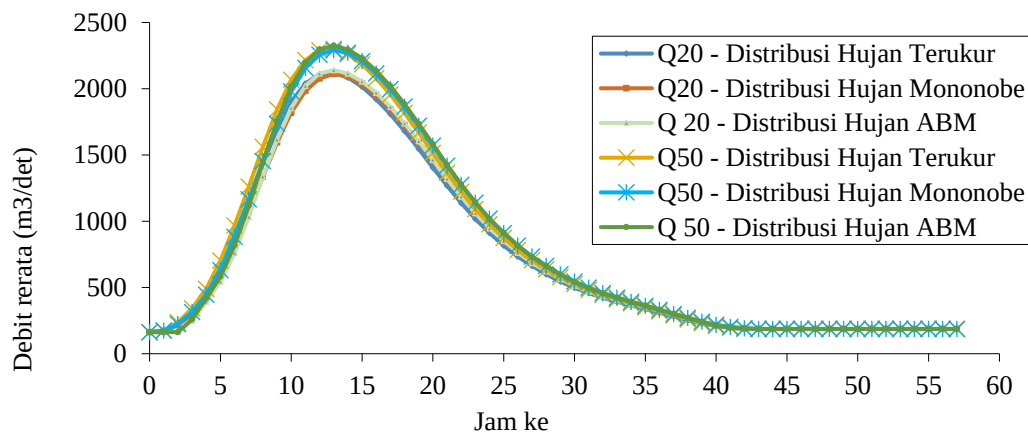
Gambar 6. Contoh pemisahan hidrograf limpasan langsung dan *baseflow* pada Kasus 1

Ordinat hidrograf satuan rata-rata diperoleh dari ordinat hidrograf satuan terukur dari 3 kasus sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan hidrograf masing-masing kasus dengan hidrograf satuan rata-rata

Selanjutnya Hidrograf Satuan Terukur (HST) digunakan untuk melakukan transformasi hujan rencana jam-jaman pola distribusi hujan terukur dan metode empiris menjadi hidrograf banjir rencana. Adapun perbandingan hidrograf banjir pada masing-masing metode distribusi hujan ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Perbandingan hidrograf banjir pada masing-masing metode distribusi hujan

Sedangkan perbandingan banjir rencana pada masing-masing metode distribusi hujan ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan debit banjir rencana masing-masing metode pola distribusi hujan

Periode Kala Ulang	Hujan Rencana (mm)	Debit Banjir Rencana (m ³ /dt)		
		Mononobe	ABM	Terukur
2	106,55	1.426	1.441	1.431
5	120,88	1.768	1.790	1.775
10	128,37	1.954	1.980	1.962
20	134,55	2.111	2.140	2.119
50	141,51	2.292	2.324	2.300
100	146,16	2.414	2.449	2.422
1000	159,16	2.763	2.805	2.772

Gambar 8 dan Tabel 6 menunjukkan hasil perhitungan hidrograf banjir metode distribusi hujan ABM dan Mononobe memiliki kesesuaian yang baik dengan hidrograf banjir distribusi hujan terukur. Hal ini berbeda dengan hasil penelitian Rahmani (2016) yang menyatakan metode Mononobe untuk mengubah hujan jam-jaman tidak bisa diterima karena perbedaan selisih melebihi 20%.

Untuk menguji kesesuaian metode pola distribusi hujan empiris dengan metode pola distribusi hujan terukur dalam perhitungan debit banjir, hasil debit banjir rencana pada masing-masing periode kala ulang dianalisis menggunakan parameter statistik dan didapatkan hasil pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai statistik debit rencana metode pola distribusi hujan metode empiris dan metode terukur

Parameter Statistik	Korelasi	RMSE	NSE	BIAS
ABM	1,000	22,30	1,000	1,00 %
Mononobe	1,000	7,85	1,000	-0,37 %

Tabel 7 menunjukkan metode distribusi hujan ABM dan Mononobe memiliki hasil debit banjir rencana dengan korelasi 1 atau hubungan yang sangat kuat terhadap hasil debit banjir rencana metode distribusi hujan terukur. Selain itu debit banjir rencana kedua metode distribusi hujan empiris juga memiliki nilai NSE 1 terhadap debit banjir rencana metode distribusi hujan terukur sehingga penyimpangan perhitungan relatif kecil. Sehingga dapat disimpulkan metode distribusi hujan empiris ABM dan Mononobe dapat digunakan untuk transformasi hujan harian menjadi jam-jaman apabila tidak ada data hujan terukur jam-jaman khususnya dalam perhitungan banjir rencana.

Menurut Pratama dkk. (2021), semakin kecil nilai RMSE dan nilai BIAS pada metode empiris menunjukkan nilai perhitungan yang mendekati dengan metode terukur. Tabel 6 menunjukkan metode Mononobe memiliki hasil yang lebih memadai dibandingkan dengan metode ABM.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan perbandingan pola distribusi hujan, Mononobe memiliki kesesuaian yang lebih baik dari metode ABM.
2. Perhitungan hidrograf banjir metode distribusi hujan ABM dan Mononobe memiliki kesesuaian yang baik dengan hidrograf banjir distribusi hujan terukur.
3. Metode distribusi hujan empiris dapat digunakan dalam analisis debit banjir rencana apabila tidak tersedia data hujan jam-jaman dengan nilai korelasi, RMSE, NSE dan BIAS sebesar 1,000; 22,30; 1,000; 1,00 % untuk metode ABM dan 1,000; 7,85; 1,000; -0,37 % untuk metode Mononobe.
4. Berdasarkan nilai statistik, metode Mononobe menunjukkan kesesuaian yang lebih baik dibandingkan dengan metode ABM.

Saran

1. Penelitian ini menggunakan data debit rencana untuk melihat kesesuaian metode distribusi hujan empiris, sehingga selanjutnya memungkinkan untuk dikembangkan dengan penggunaan data pembanding lain.
2. Penelitian tentang pola distribusi hujan akan mendapatkan hasil yang lebih tepat apabila memiliki data jam-jaman dengan periode yang lebih panjang dengan beberapa stasiun hujan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo, Direktorat Jenderal SDA, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat atas dukungan sehingga tulisan ilmiah ini dapat berhasil diselesaikan. Penulis juga berterima kasih pada Ali Rahmat, S.T., M.T., selaku Kepala Bidang Keterpaduan Pembangunan Infrastruktur Sumber Daya Air BBWS Bengawan Solo.

Daftar Referensi

- Annaji, F. F., 2021. Analisis Pola Distribusi Hujan Jam-Jaman di Daerah Aliran Sungai Serayu Opak. *Skripsi*, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Christian, K., Yudianto, D., Rusli, S.R., 2017. Analisis Pola Distribusi Hujan Terhadap Perhitungan Debit Banjir Das Cikapundung Hulu. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*: Vol. 3 No. 3 - Oktober 2017, 153 – 160
- Gustoro, D., Sujono, J., Karlina., 2022. Perbandingan Pola Distribusi Hujan Terukur dan Hujan Satelit PERSIANN di DAS Progo. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, 2022, 13(1) pp. 23-35.

- Hardianti, D., 2021. Analisis Pola Distribusi Hujan Jam-Jaman di Daerah Aliran Sungai (DAS) Reak di Kabupaten Lombok Utara. *Skripsi*, Universitas Mataram, Kota Mataram.
- Jayadi, R., dan Sujono, J. 2008. *Pelatihan Analisis Hidrologi: Design Flood*. Yogyakarta. Universitas Gadjah Mada.
- Na, W., Yoo, C., 2018. Evaluation of Rainfall Temporal Distribution Models with Annual Maximum Rainfall Events in Seoul, Korea. *Water* 2018, 10, 1468. <https://doi.org/10.3390/w10101468>
- Nasional, B. S., 2016. SNI-03-2415 tahun 2016 tentang Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Pratama, M.I., Rohmat, F.I.W., Farid, M., Adityawan, M.B., Kuntoro, A.A., Moc, I.R., 2021. Flood hydrograph simulation to estimate peak discharge in Ciliwung river basin. *2nd International Conference on Disaster and Management. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 708. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/708/1/012028>
- Rahmani, R. N., 2016. Transformasi Hujan Harian ke Hujan Jam-Jaman Menggunakan Metode Mononobe dan Pengalihragaman Hujan Aliran (Studi Kasus di DAS Tirtomoyo). *E-Jurnal Matriks Teknik Sipil*: Maret 2016/176.
- Sofia, D.A., 2016. Analisis Durasi Hujan Dominan dan Pola Distribusi Curah Hujan Jam-Jaman di Wilayah Gunung Merapi. *JTERA - Jurnal Teknologi Rekayasa*, Vol. 1, No. 1, Desember 2016, Hal. 7-14. <https://doi.org/10.31544/jtera.v1.i1.2016.7-14>
- Sri Harto Br., 2009. *Hidrologi: Teori, Masalah, Penyelesaian*. Nafiri Offset. Yogyakarta.
- Sujono, J., Jayadi, R., 2007. Hidrograf Satuan: Permasalahan dan Alternative Penyelesaian. *Forum Teknik Sipil* No. XVII/2-Mei 2007
- Triatmodjo, B., 2015. *Hidrologi Terapan*. Beta Offset. Yogyakarta.
- Yani, P. R. Y., Saidah, H., Wirahman, L., 2021. Pola Distribusi Hujan Jam-Jaman di Stasiun Hujan Jurang Sate dan Stasiun Hujan Lingklok Lime pada Wilayah Lombok Tengah. *Spektrum Sipil*: Vol. 8, No. 1 : 41 - 54, Maret 2021. <https://doi.org/10.29303/spektrum.v8i1.199>

[Halaman ini sengaja dibiarkan kosong/*This page is intentionally left blank*]

UJI MODEL FISIK 2 DIMENSI STABILITAS LAPIS PELINDUNG STRUKTUR JETTY MUARA SUNGAI TUKAD UNDA

Ma'ruf Hadi Sutanto*, Ida Ayu Irawati Diah Ratna Putra, Bayu Purnama,
M. Hendro Setiawan, Irham Adrie Hakiki, Adi Prasetyo

Balai Teknik Pantai, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PUPR

*maruf.hadi@pu.go.id

Pemasukan: 3 November 2022 Perbaikan: 23 Mei 2023 Diterima: 24 Mei 2023

Intisari

Tukad Unda yang bermuara di Pantai Jumpai, Kabupaten Klungkung telah mengalami perubahan arah alur akibat perubahan arah gelombang dan penutupan mulut muara sungai. Selain itu kawasan muara Tukad Unda juga akan jadi bagian dari Pusat Kebudayaan Bali (PKB). Bangunan jetty tegak lurus pantai yang diletakkan pada kedua sisi muara sungai, menggunakan tumpukan batu sebagai lapis pelindung mengalami kerusakan pada bagian kepala jetty. Sebagai pengamanan terhadap struktur jetty agar tidak bertambah rusak direncanakan menambah lapis pelindung pada bagian kepala dan badan jetty dengan menggunakan tambahan armor BPPT-lock. Sebagai unit lapis pelindung struktur jetty harus dilakukan pengujian model fisik dalam skala laboratorium. Pengujian model fisik dalam skala laboratorium ini dilakukan sebagai verifikasi terhadap kehandalan struktur armor BPPT-lock. Pada skenario pengujian Tipikal 1 (FF P8-P10), dengan skema pemasangan acak dari kaki sampai *slope* atas serta perubahan geometri struktur yaitu tanpa menggunakan *berm*, nilai prosentase kerusakan yang terbesar pada gelombang desain $N_d = 1,85\%$ (FF-P10), sehingga unit lapis pelindung relatif stabil untuk diterapkan ($N_d < 2\%$).

Kata Kunci: BPPT-lock, stabilitas, uji model fisik, jetty, gelombang

Latar Belakang

Tukad Unda yang bermuara di Pantai Jumpai, Kabupaten Klungkung telah mengalami perubahan arah alur akibat perubahan arah gelombang dan penutupan mulut muara sungai oleh pasang surut, debit sungai serta sedimentasi akibat lahar dingin yang berasal dari letusan gunung Agung. Selain itu kawasan muara Tukad Unda juga akan menjadi bagian dari Pusat Kebudayaan Bali (PKB). Sebagai upaya untuk menanggulangi perubahan arah alur akibat gelombang dan penutupan muara sungai oleh pasang surut, direncanakan bangunan pengaman muara sungai yaitu berupa jetty yang berfungsi untuk mengendalikan sedimentasi yang berada di muara Tukad Unda.

Beberapa bulan setelah pekerjaan selesai terjadi kerusakan pada bagian kepala struktur jetty sisi barat, kerusakan diperkirakan mulai terjadi pada tanggal 26 Mei

2021 yaitu ketika fenomena *super moon*, di mana tunggang pasang yang terjadi cukup tinggi. Sebagai pengamanan terhadap struktur jetty agar tidak bertambah luas kerusakan yang terjadi (Gambar 1), direncanakan akan menambah lapis pelindung pada bagian kepala dan badan jetty yang sebelumnya menggunakan lapis pelindung batu boulder, ditambahkan dengan menggunakan lapis pelindung BPPT-lock.

Selain pertimbangan keunggulan teknis, BPPT-lock mampu mereduksi biaya apabila dibandingkan dengan penggunaan struktur lain, yaitu dengan batu, tetrapod maupun jenis armor yang lain. Dari dasar pertimbangan tersebut, maka Balai Wilayah Sungai (BWS) Bali Penida memilih struktur armor BPPT-lock untuk digunakan sebagai tambahan lapis pelindung. Hasil pengujian dan penerapan BPPT-lock di PLTU Pacitan (Jauzi dkk., 2020) juga menjadi pertimbangan penggunaan lapis pelindung tersebut, beberapa penelitian lainnya di antaranya (Wurjanto dkk., 2022), (Istiyanto dkk., 2021) dan (Setyandito, Armono and Yuwono, 2021). Formula Hudson cukup populer di Indonesia dalam menentukan kebutuhan berat lapis pelindung (Hudson, 1961), di mana kriteria perencanaan ditentukan berdasarkan nilai koefisien stabilitas (KD). Van Der Meer dalam penelitiannya menambahkan formula Hudson dengan memperhatikan parameter gelombang pecah (Van der Meer, 1999) serta geometri struktur (Van der Meer dkk., 2014).

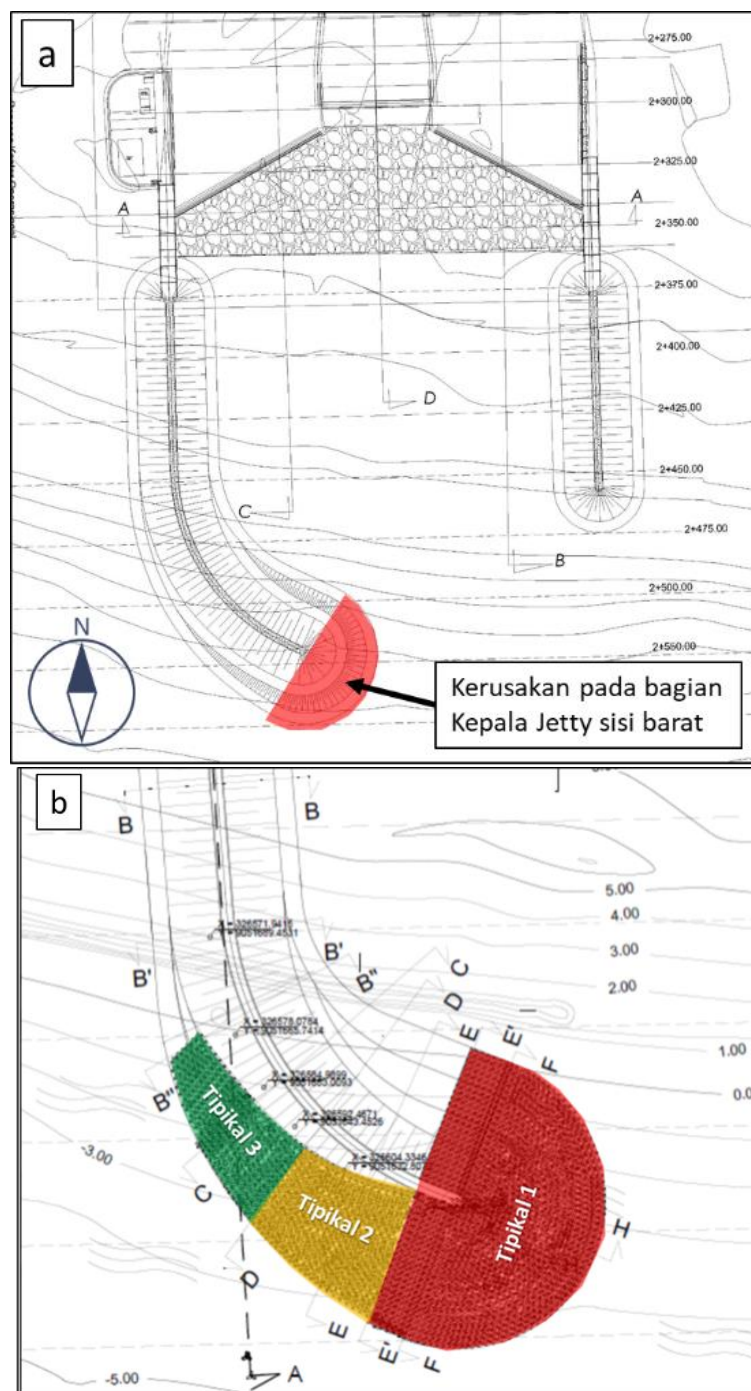
Penelitian terkait stabilitas lapis pelindung yang mirip BPPT-lock yaitu Xbloc diantaranya oleh Bruce dkk., 2009; De Rover dkk., 2014; Salauddin, 2015, sebagai unit lapis pelindung struktur jetty Muara Tukad Unda, maka BPPT-lock yang telah direncanakan dengan parameter desain dengan nilai stabilitas pada kondisi berbeda, harus diuji melalui pengujian model fisik dalam skala laboratorium. Pengujian ini diperlukan untuk mengetahui parameter stabilitas lapis pelindung, dan juga rayapan gelombang yang terjadi dengan beberapa skenario permodelan. Pengujian model fisik dalam skala laboratorium ini dilakukan sebagai verifikasi terhadap kehandalan struktur armor BPPT-lock yang akan dipasang di lapangan sebagai lapis lindung di jetty Muara Tukad Unda.



(Sumber: Balai Teknik Pantai, 2021)

Gambar 1 Struktur Jetty Tukad Unda yang mengalami kerusakan

Adapun layout struktur jetty dengan rencana penambahan armor BPPT-lock yang akan diberikan pada struktur jetty terlihat pada Gambar 2.



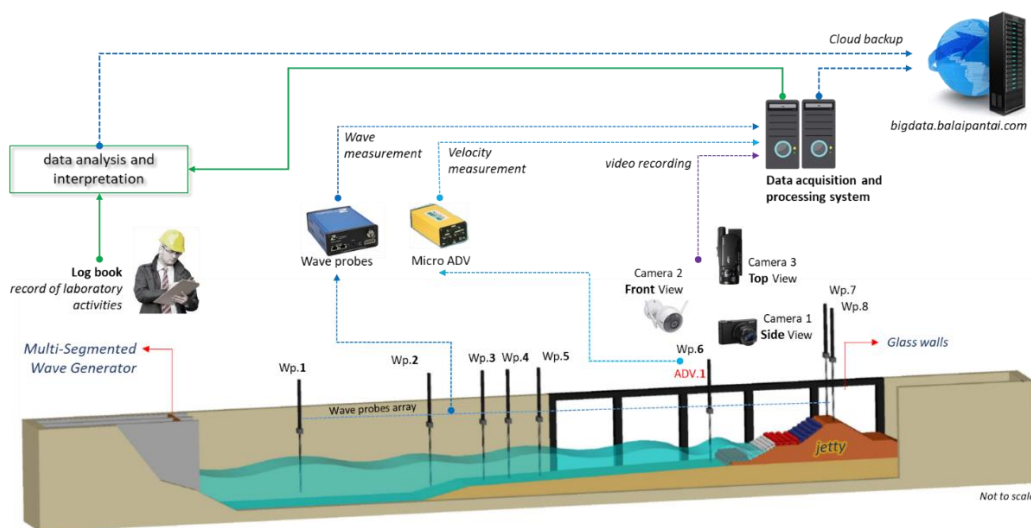
(Sumber: Balai Teknik Pantai, 2022)

Gambar 2 Layout struktur jetty (a) Kerusakan pada bagian kepala jetty, (b) Segmentasi tipikal penanganan dengan armor BPPT-lock

Metodologi Studi

Pengujian model fisik 2-dimensi dilakukan di saluran gelombang fasilitas yang dimiliki Laboratorium Balai Teknik Pantai, dengan dimensi panjang 45 m, lebar 1

m dan tinggi 1 m, serta digunakan skala pemodelan 1:38 sesuai skala benda uji yang diproduksi oleh BPPT. Uji model fisik ini mengamati gaya-gaya gelombang dan interaksi gelombang, refleksi gelombang, rayapan gelombang, gelombang pecah yang terbentuk akibat struktur, stabilitas lapisan pelindung, serta terjadinya limpasan air pada puncak tanggul jika ada. Tipikal 1 dipilih untuk skenario pengujian, bagian ini yang mengalami kerusakan dengan *setup* struktur yaitu penampang melintang F-F. Gambaran setup saluran gelombang secara keseluruhan dan skema proses akuisisi data dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Skema setup instrumen dan proses akuisisi data pengujian

Nilai tinggi dan periode gelombang, elevasi muka air, serta variabel-variabel lain yang menyusun skenario pengujian dihasilkan dari penentuan skala tinggi gelombang desain (H_d), ditentukan dari nilai tinggi gelombang (H_s) dan periode puncak (T_p). Pengujian menggunakan prinsip kesebangunan geometrik sempurna (tanpa distorsi/*undistorted*) yaitu skala panjang arah horizontal (n_L) dan skala panjang arah vertikal (n_h) adalah sama ($n_L = n_h$). Diperoleh nilai hasil penentuan skala dalam bentuk parameter gelombang desain, H_D dan T_D (Tabel 1).

Tabel 1 Penskalaan tinggi dan periode gelombang desain

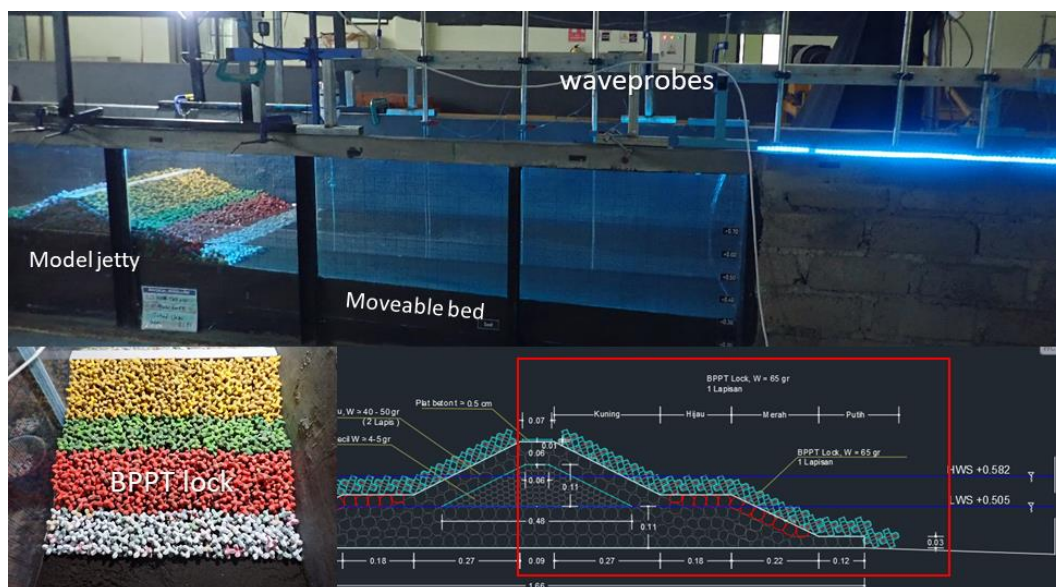
Parameter	Prototip	Model (1:38)
H_D ($n_L = n_h = 38$)	3,59 m	0,094 m
T_D ($n_T = n_L^{0.5} = 0.16$)	15,74 detik	2,55 detik

Nilai-nilai tersebut kemudian divariasikan dengan beberapa nilai yang lebih tinggi dan rendah untuk pengujian, agar diperoleh rentang data kajian yang lebih luas. Nilai gelombang yang dipakai dalam pengujian adalah menggunakan parameter nilai gelombang signifikan (H_s), gelombang desain (H_d) dan gelombang (H_1). Variasi parameter pengujian lainnya mengikuti ketentuan skala seperti Tabel 1 di atas sesuai dengan dimensi dari masing-masing parameter (Tabel 2).

Tabel 2 Parameter skenario pengujian

Parameter	Prototip	Model (1:38)	Keterangan
Muka Air (m)	0,00; 2,93	0,000; 0,077	LWS; HWS
Tinggi Gelombang (m)	2,62; 3,59; 4,38 (HWS) 0,96; 1,32; 1,60 (LWS)	0,069; 0,094; 0,115 (HWS) 0,025; 0,035; 0,042 (LWS)	$H_s; H_5; H_1$ ($H_{desain} = H_5 = 3,59$ m)
Periode Gelombang (detik)	14,79; 15,74; 16,34	2,40; 2,55; 2,65	Periode disesuaikan dengan $H_s; H_5; H_1$
Spektrum Gelombang	<i>Irregular</i> (Jonswap)	<i>Irregular</i> (Jonswap)	
Metode Pemasangan Armor BPPT-lock	Teratur/acak	Teratur/acak	
Skenario Tipikal	Tipikal 1	FF-Bagian Kepala Jetty	

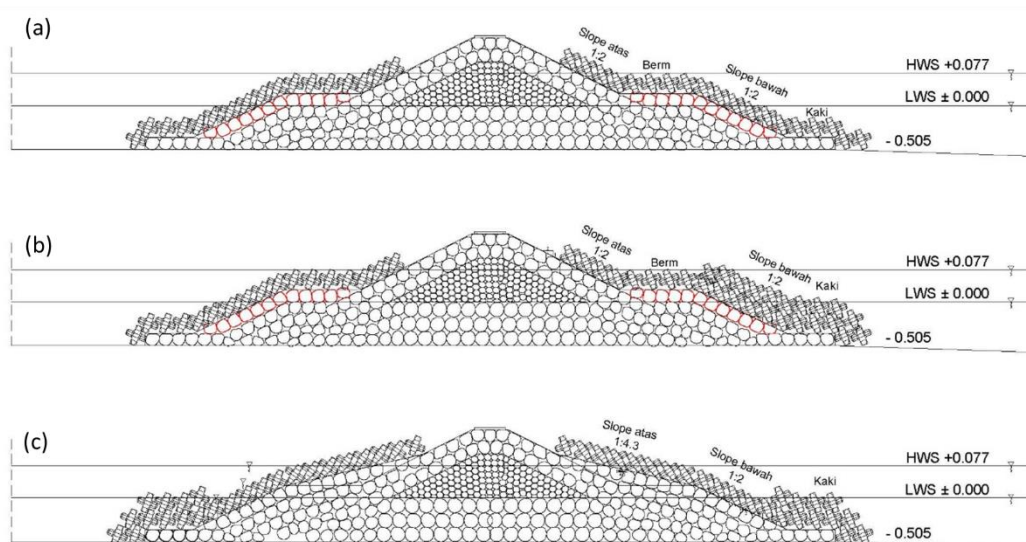
Kajian pada model fisik ini difokuskan pada gaya-gaya gelombang dan interaksi gelombang dengan struktur jetty, yaitu rayapan gelombang dan stabilitas lapis pelindung struktur. Selanjutnya, model diujikan di dalam saluran gelombang (Gambar 4) dengan pembangkitan gelombang menggunakan mesin pembangkit gelombang *irregular*.



Gambar 4 Gambaran setup struktur jetty di saluran gelombang 2 dimensi

Pengujian untuk skenario FF-P1 sampai dengan FF-P6 disimulasikan dengan struktur eksisting jetty Tukad Unda, yaitu dengan bagian struktur terdiri atas pelindung kaki, *slope* bawah, *berm* dan *slope* atas seperti pada Gambar 5a. Pengujian P5 merupakan uji coba di laboratrium pemasangan dalam kondisi dengan pembangkitan gelombang, serta pemasangan unit lapis pelindung kombinasi acak dan tersusun (Gambar 5b). Skenario FF-P5 dilakukan uji coba

metode pemasangan lapis pelindung pada skala laboratorium bersama dengan gelombang yang dibangkitkan dimulai dari bagian kaki struktur hingga ke bagian *slope* bagian atas, hal ini untuk mendapatkan metode yang tepat saat penerapan dilapangan, pada skenario FF-P5 ini tidak dilakukan perhitungan stabilitas.



Gambar 5 Perubahan struktur jetty pada Skenario Tipikal 1 (FF), (a) Tipikal 1 awal, (b) Alternatif 1, (c) Alternatif 2.

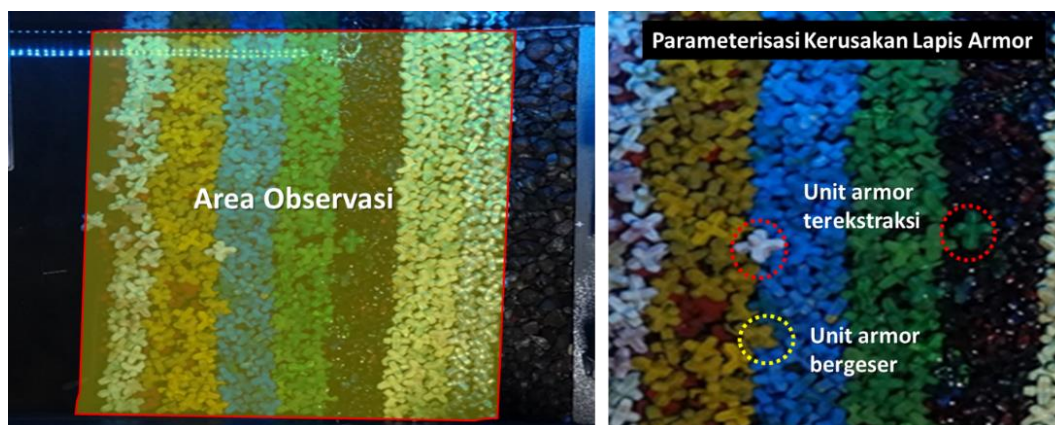
Perhitungan stabilitas lapis pelindung struktur dilakukan pada seluruh skenario pengujian kecuali skenario FF-P5, karena skenario ke-5 (P5) prosedur pengujian stabilitas lapis pelindung struktur tidak dipenuhi. Berdasarkan hasil diskusi dengan inventor (BPPT) dan kunjungan lapangan penerapan BPPT-lock di PLTU Pacitan, diperoleh alternatif metode pemasangan serta perubahan tipikal struktur dengan menghilangkan *berm* pada skenario FF-P7 sampai dengan FF-P10, struktur jetty hanya terdiri atas pelindung kaki, *slope* bawah dan *slope* atas seperti pada Gambar 5c. Metode pemasangan unit lapis pelindung dan jumlah lapisan pada tiap bagian struktur jetty diuraikan pada **Error! Not a valid bookmark self-reference..**

Tabel 3 Metode pemasangan lapis pelindung skenario Tipikal 1 (FF-P1 sd FF P10)

No	Tipikal	Susunan Bagian Struktur				Keterangan
		kaki	<i>slope</i> bawah	<i>berm</i>	<i>slope</i> atas	
1	FF-P1	acak 1 lapis (terkait)	acak 1 lapis (terkait)	acak 1 lapis (terkait)	acak 1 lapis (terkait)	
2	FF-P2	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 1 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 1 lapis (tidak dipastikan terkait)	
3	FF-P3	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 1 lapis (terkait)	acak 1 lapis (terkait)	

No	Tipikal	Susunan Bagian Struktur				Keterangan
		kaki	slope bawah	berm	slope atas	
4	FF-P4	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 1 lapis (terkait)	acak 1 lapis (terkait)	Merupakan skenario pengulangan dari FF-P3.
5	FF-P5	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	teratur berkait 1 lapis	teratur berkait 1 lapis	Trial metode pemasangan, tidak dilakukan perhitungan stabilitas
6	FF-P6	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 2 lapis dan kombinasi teratur berkait 2 lapis	teratur berkait 1 lapis	teratur berkait 1 lapis	Kondisi running FF-P6 sama dengan FF-P5.
7	FF-P7	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 1 lapis (tidak dipastikan terkait)	tidak ada berm	teratur berkait 1 lapis	Struktur jetty untuk running typical FF-P7 disesuaikan dengan kondisi tanpa berm
8	FF-P8 s/d FF-P10	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 1 lapis (tidak dipastikan terkait)	tidak ada berm	acak 1 lapis	Struktur jetty untuk running typical FF-P8 disesuaikan dengan kondisi tanpa berm

Metode yang digunakan untuk menghitung kerusakan lapis pelindung (armor) pada struktur prototip ataupun skala model adalah dengan menghitung jumlah armor yang berpindah dari posisi awal penempatan. Analisis stabilitas armor akan difokuskan terhadap prosentase kerusakan lapis armor menggunakan parameter N_d yaitu rasio antara jumlah unit armor yang mengalami perpindahan dari posisi awal dengan total unit terobservasi. Nilai N_d diperoleh dari perbandingan antara unit armor yang memenuhi kriteria pergesaran dan ekstraksi dengan jumlah unit lapis pelindung (armor) yang berada di dalam area observasi (Gambar 6). Pemilihan parameter ini didasari oleh sebagian besar pengujian dilaksanakan pada unit armor buatan serta didukung oleh referensi literatur-literatur terdahulu yang menggunakan N_d (O'Donoghue, 2014), sebagai parameter untuk mendefinisikan derajat kerusakan lapisan armor yang tersusun dari unit armor artifisial (armor beton). Klasifikasi kerusakan unit lapis pelindung dengan parameter unit yang berpindah (N_{od}) dan prosentase kerusakan (N_d), ditentukan dengan batas yang dapat diterima yaitu 2% (Tabel 4), maka hasil dari setiap pengujian nilai prosentase kerusakan dievaluasi berdasarkan kriteria tersebut.



Gambar 6 Area observasi beserta parameterisasi kerusakan lapis armor

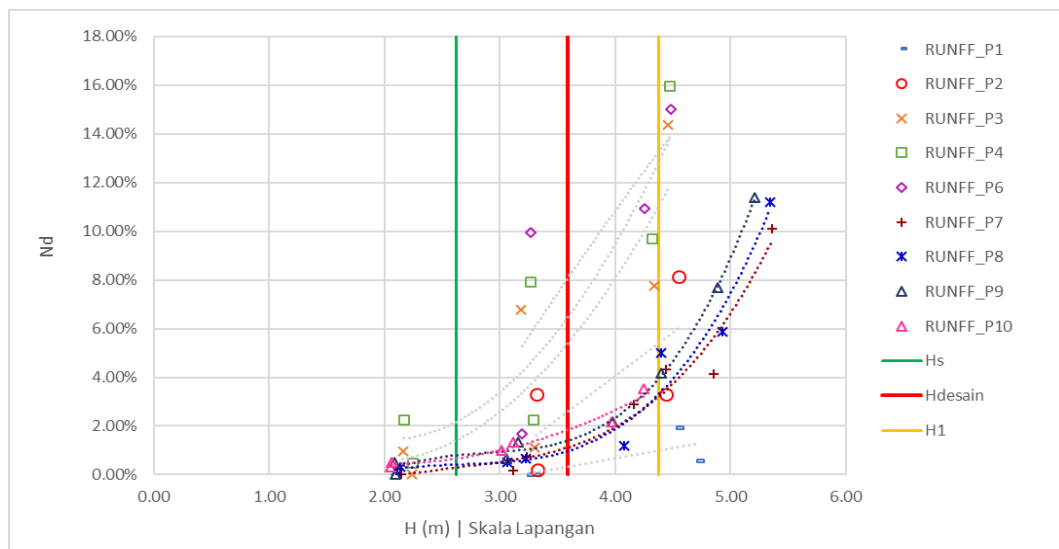
Tabel 4 Klasifikasi kerusakan struktur (Gerding, 1993)

N_{od}	Penjelasan
< 0,5	Hampir tidak ada kerusakan
0,5-2	Kerusakan dapat diterima, memenuhi kriteria desain
>4	Kerusakan tidak dapat diterima, struktur kaki kehilangan fungsinya

Hasil Studi dan Pembahasan

Serangkaian pengujian yang telah dilakukan pada skenario Tipikal 1 (F-F), dimulai dari skenario P1 sampai dengan P10, dengan hasil analisis prosentase kerusakan (N_d) dibandingkan dengan Tinggi Gelombang (H) pada skala lapangan disajikan pada Gambar 7. Prosentase kerusakan pada skenario P1 terlihat relatif sangat kecil yaitu 0,34% dengan kondisi tinggi gelombang desain (H_5), namun demikian pengujian skenario P1 metode pemasangan unit lapis pelindung BPPT-lock dengan memastikan seluruh unit lapis pelindung terkait, hal ini cukup mudah dilakukan pada skala laboratorium dengan menggunakan tangan, tetapi akan sangat sulit diterapkan di lapangan. Skenario pengujian P2 sampai dengan P6 terlihat hasil prosentase kerusakan melebihi kriteria yaitu di atas 2%, nilai prosentase kerusakan tertinggi pada pengujian P4 yaitu 6,55%.

Diperlihatkan secara jelas juga tren kerusakan pada skenario P7-P10, diperoleh dari hasil pengujian nilai prosentase kerusakan masih di bawah 2,00 %, prosentase kerusakan tertinggi pada skenario P10 untuk tinggi gelombang desain yaitu 1,83%. Secara lengkap hasil analisis nilai prosentase kerusakan (N_d) unit lapis pelindung untuk setiap skenario disajikan pada Tabel 5.

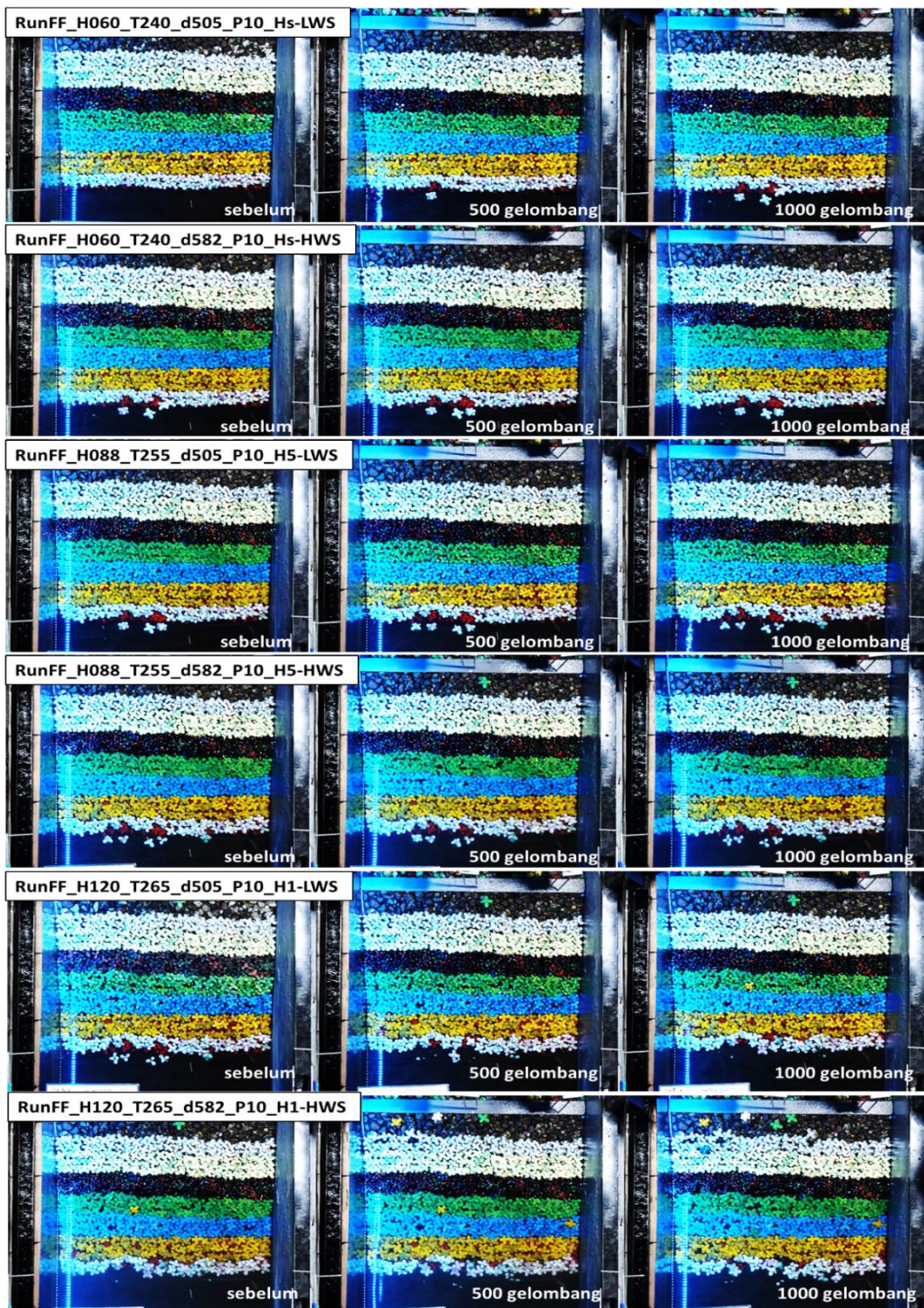


Gambar 7 Analisis stabilitas armor BPPT-lock (H vs N_d) untuk pengujian skenario Tipikal 1 (P1 sd P10)

Tabel 5 Nilai prosentase kerusakan skenario Tipikal 1 (FF P1-P10)

Pengujian	N_d (%)		
	H_s	H_5	H_1
P1	0,00	0,34	1,06
P2	0,00	2,60	5,41
P3	1,39	5,37	11,02
P4	2,21	6,55	12,98
P5	Tidak dilakukan pengukuran/skip		
P6	1,10	8,13	13,37
P7	0,28	1,09	3,15
P8	0,40	0,96	3,32
P9	0,80	1,37	3,89
P10	0,65	1,83	3,54

Gambaran proses pengujian yang dilakukan mulai dari skenario gelombang H_s hingga H_5 , dengan prosedur yang telah ditentukan disajikan pada Gambar 8, diperlihatkan untuk skenario tipikal 1 (FF-P10). Dimulai dari skenario tinggi gelombang signifikan (H_s) pada kondisi LWS, hingga skenario tinggi gelombang desain H_5 . Proses pembebanan gelombang dilakukan bertahap tiap 500 gelombang. Dapat dilihat juga kerusakan pada kaki struktur pada awal pengujian, bahkan telah terjadi pada skenario tinggi gelombang signifikan. Kontribusi kerusakan sangat terlihat pada bagian kaki struktur, dimana pada bagian *slope* bawah hingga *slope* atas relatif stabil. Kerusakan ini kemungkinan besar karena pada bagian kaki struktur metode pemasangannya secara acak dan memastikan tiap unit lapis lindung saling terkait akan sulit dilakukan. Metode pemasangan secara bertahap disarankan pada bagian kaki struktur, untuk memastikan bagian kaki struktur telah cukup stabil, sehingga dapat dilanjutkan pemasangan pada bagian di atasnya.



Gambar 8 *Snapshot* proses pengamatan kerusakan unit armor pada pengujian Tipikal 1 (FF P10)

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Hasil dari pengujian menunjukkan nilai prosentase kerusakan terendah pada gelombang desain (H_5) adalah hasil pengujian pertama (P1) yaitu sebesar 0,34%, namun pada skenario ini metode pemasangan akan sangat sulit diterapkan di lapangan, metode pemasangan dilakukan secara teratur dan dipastikan terkait di setiap bagian struktur jetty. Pada skenario pengujian Tipikal 1 (FF P8-P10), dengan skema pemasangan acak dari kaki sampai *slope* atas serta perubahan geometri struktur yaitu tanpa menggunakan *berm*, nilai prosentase kerusakan yang terbesar pada gelombang desain $N_d = 1,85\%$ (FF-P10), sehingga unit lapis pelindung relatif stabil untuk diterapkan ($N_d < 2\%$). Diperoleh jumlah unit lapis pelindung tiap luasan 100 m^2 di lapangan yaitu 46 – 48 unit untuk satu lapisan, dan 65 - 70 unit untuk dua lapisan.

Saran

Metode pemasangan di lapangan sangat perlu diperhatikan, jika memungkinkan disimulasikan dengan unit lapis pelindung pada skala lapangan (prototip). Optimasi desain masih dapat dilakukan untuk kebutuhan berat unit lapis pelindung maupun tipikal melintang struktur. Apabila dilakukan perubahan maka perlu dilakukan perhitungan secara benar, serta jika diperlukan diuji pada skala laboratorium.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu terutama kepada rekan-rekan teknisi Laboratorium Balai Teknik Pantai, rekan kerja di Satker Balai Wilayah Sungai Bali Penida, Kementerian PUPR serta rekan di BPPT.

Daftar Referensi

- Bruce, T. dkk., 2009. 'Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters', *Coastal Engineering*. Elsevier B.V., 56(2), pp. 166–179. doi: 10.1016/j.coastaleng.2008.03.015.
- Gerding, E., 1993. *Toe Structure Stability of Rubble Mound Breakwaters*, TU Delft. Delft University of Technology.
- Hudson, R. Y., 1961. 'Laboratory Investigation of Rubble-Mound Breakwaters', Transactions of the American Society of Civil Engineers. *American Society of Civil Engineers*, 126(4), pp. 492–520. doi: 10.1061/taceat.0008346.
- Istiyanto, D. C. dkk., 2021, 'Design of rubble mound slope protection for cellular cofferdam breakwater retrofitting', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 698(1). doi: 10.1088/1755-1315/698/1/012003.
- Jauzi, M. Z. dkk., 2020. 'BPPT-lock Armor Unit Implementation for Improving Breakwater Sustainability at the Pacitan Power Plant', *Journal of Physics: Conference Series*, 1625(1). doi: 10.1088/1742-6596/1625/1/012047.

- Van der Meer, J. and Sigurdarson, S., 2014. 'Geometrical Design of Berm Breakwaters', *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), p. 25. doi: 10.9753/icce.v34.structures.25.
- Van der Meer, J. W., 1999. 'Design of concrete armour layers', *Proceedings of the International Conference Coastal Structures '99*: Santander, Spain, 7-10 June 1999, Volume 1, pp. 213–221.
- O'Donoghue, T. 2014. *Users Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network*, Hydralab. doi: 10.1680/eacm.14.00013.
- De Rover, R., Reedijk, B. and Bakker, P., 2014. 'Xbloc Innovations At Swinoujscie Breakwater', *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), p. 62. doi: 10.9753/icce.v34.structures.62.
- Salaudin, M., 2015. 'Physical model tests on new armour block Crablock for breakwaters to come to preliminary design guidance', (April). Available at: uuid:0d4daf90-d8fc-460f-8b42-fc1e33861b1a.
- Setyandito, O., Armono, H. D. and Yuwono, N., 2021. 'Uji Model Fisik Stabilitas Unit Lapis Lindung Pemecah Gelombang Pelabuhan Sanur', *Jurnal Ilmiah Desain & Konstruksi*, 20(2), pp. 139–149. doi: 10.35760/dk.2021.v20i2.5073.
- Wurjanto, A. and Hardaya, A. P., 2022. 'Quantitative consideration in selection of breakwater concrete armor unit based on unit's internal tensile stress response', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1065(1), p. 012021. doi: 10.1088/1755-1315/1065/1/012021.

UJI TINGKAT EROSI TANAH DENGAN VARIASI INTENSITAS CURAH HUJAN MENGGUNAKAN ALAT RAINFALL SIMULATOR (STUDI KASUS DAERAH RAWAN EROSI DESA HARAPAN, TANETE RIAJA, BARRU)

Abd. Syawal A. Dali*, Ansyar Pendang, dan Ratna Musa

Program Studi Teknik Sipil, Fak. Teknik Universitas Muslim Indonesia, Makassar

syawaltcm@gmail.com

Pemasukan: 20 April 2022 Perbaikan: 2 Desember 2022 Diterima: 5 Desember 2022

Intisari

Tanah yang tererosi akan menyebabkan penurunan produktivitas serta kesuburan tanah. Dari dampak erosi, kadar air dan kandungan aneka ragam mineral serta nutrisi tanah akan berkurang. Dari persoalan tersebut, perlu dilakukan beberapa aktivitas untuk melestarikan lingkungan yang rusak yang disebabkan erosi tersebut. Metode yang paling efektif pada penanggulangan erosi yaitu perlu diadakan penelitian terhadap erosi itu sendiri. Salah satu penelitian pada angka erosi suatu tanah dapat dilakukan di laboratorium dengan menggunakan alat *rainfall simulator*. Pengukuran tingkat erosi tanah yang didapatkan di laboratorium akan dibandingkan dengan permodelan peramal erosi yaitu *Universal Soil Loss Equation* (USLE). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari intensitas hujan terhadap tingkat erosi yang terjadi dan mengetahui perbandingan antara pengukuran erosi di laboratorium dengan Peramalan USLE. Dari hasil pengujian dengan variasi intensitas hujan 140, 179 dan 202 mm/jam dengan kemiringan 5° nilai erosi yang didapatkan dari pengujian menggunakan *rainfall simulator* berturut-turut sebesar 27,59; 33,87 dan 46,16 gram/m². Sedangkan nilai erosi yang didapatkan dari metode USLE berturut – turut sebesar 24,42; 28,07 dan 31,81 gram/m². Hasil erosi dari uji laboratorium nilainya lebih besar 1,26 kali dari pada hasil perhitungan USLE karena pada pemodelan hujan di laboratorium percikan air tidak dapat merata yang disebabkan oleh keterbatasan kemampuan nozzle pada *rainfall simulator* untuk memercikan air.

Kata Kunci: erosi tanah, *rainfall simulator*, USLE, intensitas hujan, model laboratorium

Latar Belakang

Tanah merupakan sumber daya alam yang cukup banyak digunakan oleh manusia, dapat mengalami erosi yang diakibatkan oleh adanya tetes-tetes air hujan secara terus menerus mengenai permukaan tanah, tanah yang sebelumnya padat lama kelamaan menjadi gembur, yang kemudian terurai dan terlepas dari kesatuannya. Bila kondisi dari hujan dapat memungkinkan terjadinya aliran permukaan, partikel tanah yang telah terurai akan dengan mudah terbawa bersama aliran, selanjutnya

terendapkan di tempat-tempat lain yang lebih rendah. Banyak tidaknya partikel tanah terbawa bersama aliran permukaan dipengaruhi oleh banyak faktor.

Unsur iklim yang sangat berpengaruh adalah curah hujan. Ancaman erosi umumnya dimulai di sekitar bulan November, hal ini dikarenakan meningkatnya intensitas curah hujan bulan tersebut. Di sisi lain musim kering yang panjang juga akan menyebabkan terjadinya penguapan air di permukaan tanah dalam jumlah yang cukup besar. Hal tersebut mengakibatkan munculnya rongga tanah atau pori - pori hingga terjadi retakan dan merekahnya tanah permukaan.

Ketika hujan, air akan meresap ke bagian yang retak sehingga mengakibatkan tanah dengan cepat mengembang kembali. Pada awal musim penghujan, intensitas hujan yang tinggi umum sering terjadi, sehingga kandungan air pada tanah menjadi jenuh dalam kurun waktu yang singkat yang mengakibatkan erosi akan semakin mudah terjadi. Erosi merupakan peristiwa berpindahnya atau terangkutnya material tanah dari suatu tempat yaitu lereng atas oleh media alami dalam hal ini air, kemudian diendapkan pada daerah yang lebih rendah sebagai bahan sedimen atau deposit. (Osok dkk., 2018).

Menurut Schwab dkk. (1981) erosi terdiri dari dua tipe yaitu erosi geologi (*geological erosion*) dan erosi dipercepat (*accelerated erosion*). Erosi geologi adalah proses ketika tanah yang terbentuk dan tanah yang tererosi berada dalam keadaan seimbang, serta sangat sesuai untuk mendukung banyak pertumbuhan tanaman. Sedangkan erosi dipercepat adalah erosi yang terjadi oleh pengaruh manusia yaitu hancurnya agregat-agregat tanah dan mempercepat perpindahan bahan organik serta partikel-partikel mineral sebagai akibat dari pengolahan tanah yang tidak sesuai dan hilangnya vegetasi alami.

Intensitas hujan merupakan salah satu faktor Penyebab erosi tanah yang sangat menarik untuk dikaji. Maka dari itu kami ingin menguji tingkat erosi tanah dengan variasi intensitas hujan dimana sampel tanah diambil di Kecamatan Tanete Riaja Kabupaten Barru, dan mengkajinya dalam suatu tulisan ilmiah. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh intensitas hujan terhadap tingkat erosi yang terjadi serta membandingkan pengukuran erosi di laboratorium dan hasil potensi erosi lahan metode USLE.

Metodologi Studi

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental laboratorium yang dilaksanakan di Laboratorium Hidrolika dan Mekanika Tanah pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muslim Indonesia. Sedangkan sampel tanah diambil di Desa Harapan Kecamatan Tanete Riaja Kabupaten Barru.



Gambar 1. Lokasi pengambilan sampel uji (*Google Earth*)

Kegiatan lapangan berupa pengambilan sampel perlu dilakukan untuk mendapatkan sampel tanah yang akan diuji di laboratorium dengan prosedur sebagai berikut:

Melakukan pengambilan sampel tanah yang akan diuji karakteristik fisik dan mekanik di Laboratorium Mekanika Tanah untuk mengetahui analisa butiran, kadar air dan permeabilitas:

- Menyediakan perlengkapan pengambilan sampel tanah (tabung pengambil tanah, balok kayu, martil, karet dan plastik).
- Tabung kemudian dimasukkan kedalam tanah dengan kedalaman sepanjang tabung tersebut dengan cara dipukul dari atas dengan martil dan diberi tahanan balok kayu agar mulut tabung sampel tanah tidak rusak.
- Tabung selanjutnya dicabut dari tanah dan ditutup plastik kemudian diikat karet dengan tujuan agar tidak terjadi penguapan air pada tanah sampel.
- Pengambilan tanah kemudian dilakukan sebanyak lima kali pada titik yang berbeda, pada setiap tabung diberi kode ataupun nomor agar tidak tertukar.
- Langkah selanjutnya dilakukan pengambilan sampel tanah terpisah untuk pengujian analisa butiran tanah dan permeabilitas.

Melakukan pengambilan sampel tanah yang digunakan untuk dilakukan pengujian kehilangan tanah (erosi) menggunakan alat *rainfall simulator*:

- Menyiapkan peralatan yang dibutuhkan (skop, cangkul, karung dan tali).
- Memilih lokasi kosong yang tidak ditumbuhi tanaman, kemudian dibersihkan permukaannya dari sampah.
- Tanah diambil dengan cara mencangkul sedalam kurang lebih 20 cm di beberapa titik lokasi yang berbeda.
- Sampel tanah kemudian diuji di Laboratorium Hidrolika.

Kegiatan di laboratorium untuk pengujian dan pengambilan data yaitu menyiapkan alat dan peralatan, dan selanjutnya dilakukan pengujian karakteristik tanah di

Laboratorium Mekanika Tanah yang meliputi (Tim Laboratorium Mekanika Tanah UMI, 2017):

- a. Uji kadar air tanah;
- b. Uji berat isi tanah;
- c. Uji permeabilitas;
- d. Uji berat jenis butiran tanah;
- e. Analisa saringan;
- f. Analisa hidrometer;
- g. Uji bahan organik.

Kemudian dilakukan pengujian di Laboratorium Hidrolika yang meliputi:

- a. Pengukuran Intensitas Hujan
- b. Uji Laju Kehilangan Tanah (Amfield Team, 1998).

Uji laju kehilangan tanah menggunakan alat *rainfall simulator* dilakukan dengan tata cara sebagai berikut:

1. Alat *rainfall simulator* dibersihkan dan disiapkan sehingga dipastikan tidak ada masalah.
2. Siapkan kotak kayu dengan ukuran 50x50x15 cm yang akan dimasukkan ke dalam alat *rainfall simulator*, selanjutnya atur kemiringan sesuai dengan yang diinginkan.
3. Kotak kayu kemudian diisi sampel tanah dan dipadatkan.
4. *Rainfall simulator* dihidupkan dan diatur intensitasnya sesuai dengan intensitas yang ingin diuji.
5. Siapkan gelas ukur untuk menampung air dan tanah yang tererosi.
6. Hitung waktu dengan menggunakan stopwatch.
7. Saring air dari hasil erosi dengan kertas saring yang telah ditimbang sebelumnya (W1).
8. Tanah dan kertas saring (W2) selanjutnya dimasukkan ke dalam oven selama 24 jam dengan temperatur 110° C, sehingga didapatkan berat tanah yang tererosi ($A = W2 - W1$).

Hasil Penelitian dan Pembahasan

Hasil Pengujian Laboratorium Mekanika Tanah

Pengujian di laboratorium mekanika tanah yaitu pengujian karakteristik tanah sebagai parameter untuk perhitungan erosi dengan *Universal Soil Loss Equation* (USLE). Dengan hasil sebagai berikut:

a. Uji Kadar Air Tanah

Dari hasil uji di laboratorium didapatkan kadar air tanah sebesar 19,22%. Nilai tersebut adalah hasil rata-rata dari tiga pengujian sampel tanah pada tiga titik pengambilan yang berbeda, dimana selisih nilai pada setiap hasil pengujian tidak begitu besar.

b. Berat Isi Tanah

Dari hasil pengujian di laboratorium didapatkan berat volume tanah rata - rata sebesar $1,92 \text{ gr/cm}^3$. Nilai tersebut adalah hasil rata - rata dari tiga pengujian sampel tanah pada tiga titik pengambilan yang berbeda.

c. Uji Permeabilitas

Untuk menentukan harga keefisien rembesan (permeabilitas) di laboratorium dilakukan dengan menggunakan cara tinggi energi tetap (*constant head*). Dari hasil pengujian nilai K yang didapat sebesar $1,58 \times 10^{-5} \text{ cm/dtk}$ atau $5,7 \times 10^{-2} \text{ cm/jam}$ dapat dinyatakan bahwa kelas permeabilitasnya termasuk kelas sangat lambat (*Very slow*) dengan kode 6. (Damayanti, 2005)

d. Uji Berat Jenis Butiran Tanah

Dari hasil pengujian di laboratorium didapatkan berat jenis tanah rata-rata sebesar 2,50.

e. Pengujian Kadar Bahan Organik

Bahan organik tanah merupakan sisa jaringan tanaman atau hewan yang telah mengalami perombakan (dekomposisi) baik sebagian atau seluruhnya. Hasil dari pengujian di laboratorium didapat kadar C-organik sebanyak 3,1410 % sehingga didapat kadar BO (a) sebesar 5,4150 %.

f. Analisa Saringan

Analisa saringan (*sieve analysis*) untuk menentukan distribusi ukuran butir tanah yang memiliki diameter lebih besar dari 0,0075 mm (tertahan di atas saringan No. 200 ASTM) dengan cara penyaringan. Pengujian ini menggunakan standar ASTM D 422-63. (Parmawati, 2012)

Hasil pengujian menunjukkan persentase dominan terdapat pada tanah yang lolos saringan nomor 10 (diameter 2 mm) dan tertahan pada saringan nomor 20 (diameter 0,85 mm) yaitu sebesar 28% sehingga dapat disimpulkan bahwa kelas struktur sampel tanah adalah granuler halus dengan diameter butiran 1 – 2 mm dan termasuk dalam kode 2.

g. Analisa Hidrometer

Dari percobaan ini didapatkan persentase lanau/debu sebesar 9,610 %. Dari pengujian pengujian analisa saringan dan analisa hidrometer didapatkan data sebagai berikut:

- Persentase Kerikil : 13,024 %
- Persentase Pasir : 76,948 %
- Persentase Lanau : 9,610 %
- Persentase Lempung : 0,418 %

Sehingga sampel tanah dapat diklasifikasikan sebagai Pasir Berlempung (*Loamy Sand*), (Wischmeier dkk., 1978).

Hasil Pengujian Laboratorium Hidrolika

Pengujian di laboratorium hidrolika terbagi atas dua penelitian, yaitu pengukuran intensitas hujan rancangan dan pengujian erosi dengan *rainfall simulator* dengan hasil sebagai berikut:

a. Pengukuran Intensitas Hujan

Untuk mencari intensitas hujan yang diharapkan (140 mm/jam, 179 mm/jam dan 202 mm/jam) pada *rainfall simulator* dilakukan dengan cara coba-coba berulang kali, sehingga didapatkan intensitas curah hujan yang diinginkan (Tabel 1)

Tabel 1. Hasil pengukuran intensitas curah hujan

Waktu (menit)	Volume (ml)						Volume Rata-rata (ml)	Intensitas (mm/jam)	Keterangan
	V1	V2	V3	V4	V5	V6			
10	89	79	123	84	92	101	94,67	139,58	Motor Speed = 160 rev/min Liquid Flow = 23 L/min Disk = 20° Bar = 0,4 lb.f/in
10	108	103	143	126	115	133	121,33	178,89	Motor Speed = 160 rev/min Liquid Flow = 23,5 L/min Disk = 25° Bar = 0,42 lb.f/in
10	125	111	160	136	138	152	137,00	201,99	Motor Speed = 160 rev/min Liquid Flow = 29 L/min Disk = 25° Bar = 0,67 lb.f/in

Berdasarkan Tabel 1 didapatkan parameter-parameter pengaturan *rainfall simulator* sehingga dapat mencapai intensitas yang dicari dan dapat digunakan untuk pengujian erosi.

b. Uji Laju Kehilangan Tanah

Berdasarkan hasil pengujian di laboratorium dengan menggunakan alat *rainfall simulator* didapat hasil uji erosi sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil uji laju kehilangan tanah (erosi)

Intensitas (mm/jam)	Kemiringan (°)	Waktu (menit)	Hasil Erosi (gr/m ²)			
			Perc. 1	Per. 2	Perc. 3	Rata-rata
140	5	10	24,69	27,01	31,07	27,59
179	5	10	32,03	33,42	36,15	33,87
202	5	10	37,10	49,25	52,13	46,16

Berdasarkan Tabel 2 didapatkan nilai erosi tanah yang diuji menggunakan *rainfall simulator* untuk intensitas hujan 140, 179 dan 202 mm/jam masing-masing sebesar 22,59; 33,87 dan 58,23 gram/m².

Perhitungan Universal Soil Loss Equation (USLE)

Parameter perhitungan laju erosi pada *Universal Soil Loss Equation* (USLE), adalah erosivitas (R), erodibilitas (K), panjang dan kemiringan lereng (LS). Pada penelitian ini sampel tanah tidak diberi tanah dan tanpa pengolahan, sehingga nilai pengelolaan tanaman (C), dan nilai pengelolaan lahan (P) mempunyai nilai 1 (satu). Setelah parameter tersebut terpenuhi maka bisa dihitung besaran nilai laju kehilangan tanah (A), dengan persamaan sebagai berikut:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

dengan keterangan:

A : Besarnya erosi (ton/ha/tahun),

R : Indeks erosivitas hujan (kj/ha),

K : Indeks erodibilitas tanah (ton/kj),

L : Indeks panjang lereng (m),

S : Indeks kemiringan lereng (%),

C : Indeks peranan (pengelolaan) tanaman,

P : Indeks konservasi tanah.

(Wischmeier dkk., 1978)

a. Erosivitas (R)

Untuk mendapatkan nilai dari erosivitas perlu diketahui nilai energi kinetik hujan, intensitas hujan dan kedalaman hujan. Hasil dari perhitungan erosivitas dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil perhitungan nilai erosivitas (R)

Inten- sitas	Kemiringan	Waktu	Energi kinetik EK = 11.87 + 8.73 Log I	Kedalaman air (h _{total})	Erosivitas R=EK×h _{total}
(mm/ jam)	(°)	(me-nit)	(J/m ² /mm)	(mm)	(j/m ²)
140	5 ⁰	10	30,61	28,22	863,82
179	5 ⁰	10	31,54	31,48	992,80
202	5 ⁰	10	32,00	35,16	1124,97

Pada Tabel 3 menunjukkan adanya pertambahan nilai erosivitas yang diakibatkan oleh pertambahan nilai kedalaman hujan, dan didapat nilai erosivitas sebesar 863,82 j/m², 992,80 j/m² dan 1124,97 j/m² untuk masing-masing intensitas.

b. Erodibilitas (K)

Untuk menghitung nilai erodibilitas bisa digunakan persamaan erodibilitas atau menggunakan nomograf, dalam hal ini nilai-nilai seperti: debu, pasir sangat halus,

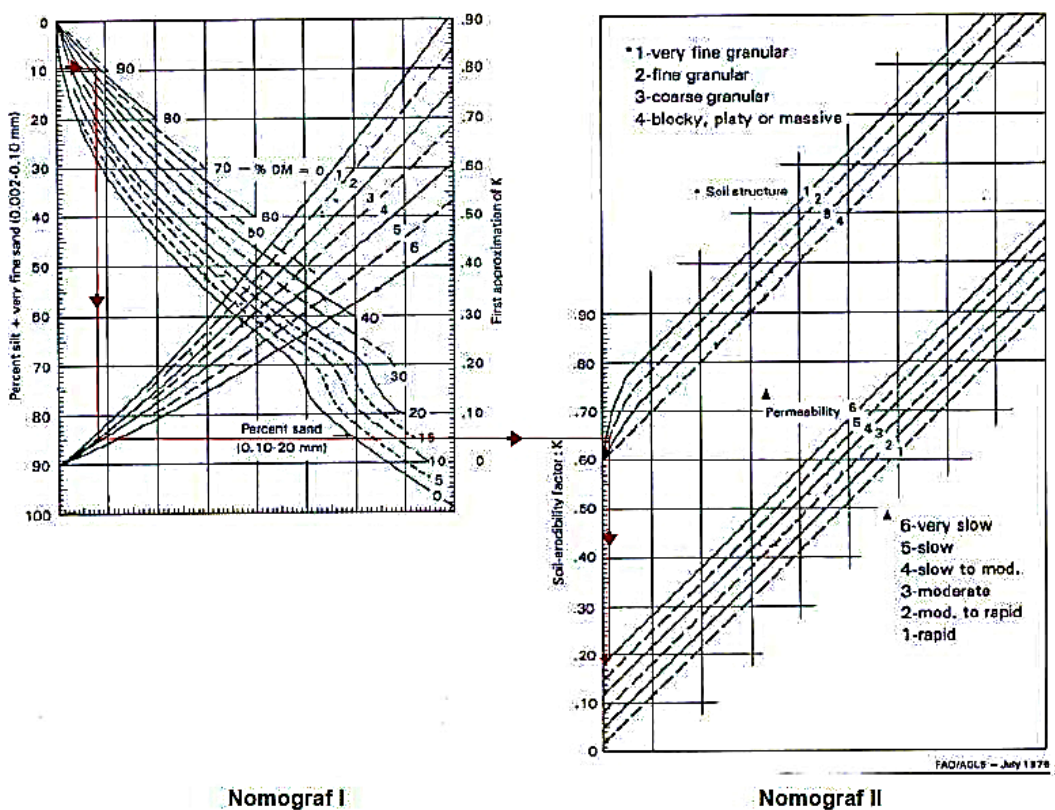
pasir, bahan organik, struktur tanah dan permeabilitas tanah sudah diketahui. (Martono, 2004).

Hasil dari perhitungan nilai erodibilitas dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. Hasil Perhitungan Nilai Erodibilitas (K)

Tekstur tanah	Unsur			Struktur tanah (b)	Permeabilitas tanah (c)	Erodibilitas (K)
(M)	Debu + Pasir Halus	Pasir	BO (a)	1 - 2 mm (kode 2)	$5,7 \times 10^{-2}$ cm/jam (kode.6)	0,195 gram/joule
957	9,610%	76,948%	5%			

Dari data Tabel 4 diplotkan ke dalam nomograf sehingga didapatkan nilai erodibilitas sebesar 0,195 gram/joule.



Gambar 2. Nomograf perhitungan erodibilitas (Wischmeier dkk., 1978)

c. Panjang (L) dan Kemiringan Lereng (S)

Dalam mendapatkan nilai LS perlu diketahui terlebih dahulu panjang lereng dan kemiringannya. Pada penelitian ini panjang lereng yang digunakan sesuai dengan panjang kotak sampel yaitu sebesar 0,5 m, sudut kemiringannya 5° jika dirubah menjadi dalam persen (%) maka kemiringannya sebesar 8,75%, Sehingga nilai LS untuk kemiringan 5° dan panjang lereng 0,5 m yaitu sebesar 0,145. Besaran nilai laju erosi menggunakan *Universal Soil Loss Equation* (USLE) dengan parameter yang telah dihitung, dapat dilihat pada Tabel 5.

Perbandingan Laju Kehilangan Tanah

Perbandingan laju kehilangan tanah antara pengujian di laboratorium dengan *Universal Soil Loss Equation* (USLE) dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan nilai erosi tanah uji laboratorium dengan metode *USLE* (gr/m²)

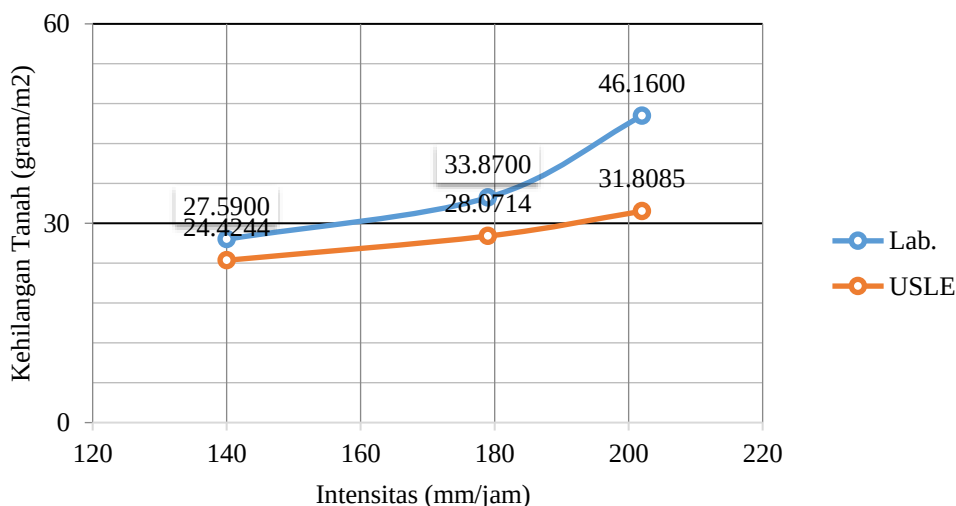
Kemiringan (°)	Nilai Erosi (gram/m ²)					
	140 mm/jam		179 mm/jam		202 mm/jam	
	<i>Rainfall</i>	USLE	<i>Rainfall</i>	USLE	<i>Rainfall</i>	USLE
5°	27,59	24,42	33,87	28,07	46,16	31,81
Deviasi	11,49%		17,12%		31,09%	

Dari Tabel 5 menunjukkan bahwa hasil erosi pengujian laboratorium dan metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE) keduanya menunjukkan kenaikan nilai erosi seiring dengan naiknya besar nilai kombinasi intensitas hujan.

Intensitas hujan merupakan faktor alami yang mempengaruhi erosi, semakin besar intensitas dan lama waktu hujan maka akan semakin besar pula energi kinetik serta erosivitas hujan. Perbandingan pengaruh intensitas hujan terhadap erosi hasil pengujian di laboratorium dan hasil *Universal Soil Loss Equation* (USLE) dapat dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 3.

Tabel 6. Hasil perhitungan *Universal Soil Loss Equation* (USLE)

Intensitas (mm/jam)	Kemiringan (derajat)	Lereng (%)	R (Joule/m ²)	K (gr/Joule)	LS	A (gr/m ²)
140	5°	8,75	863,82	0,195	0,145	24,42
179	5°	8,75	992,80	0,195	0,145	28,07
202	5°	8,75	1124,97	0,195	0,145	31,81



Gambar 3. Grafik perbandingan pengaruh intensitas hujan terhadap laju erosi tanah dari hasil uji laboratorium menggunakan alat *rainfall simulator* dan hasil perhitungan USLE

Dari grafik pengaruh intensitas hujan terhadap erosi di atas menunjukkan bahwa semakin besar intensitas hujan bertambah besar pula hasil erosi, dimana intensitas hujan berpengaruh terhadap kemampuan percikan air hujan dalam menghancurkan partikel-partikel tanah dan air limpasan yang akan membawa partikel tanah. Pada pengujian laboratorium dan hasil perhitungan metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE) menunjukkan bahwa lama waktu hujan berpengaruh terhadap nilai erosi. Hasil erosi dari uji laboratorium lebih besar nilainya dari pada nilai erosi hasil perhitungan *Universal Soil Loss Equation* (USLE) karena pada pemodelan hujan di laboratorium percikan air tidak dapat merata seperti keadaan di lapangan yang disebabkan oleh keterbatasan kemampuan nozzle pada *rainfall simulator* untuk memercikan air.

Hasil erosi pengujian laboratorium dan perhitungan metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE) dari intensitas 140 mm/jam, 179 mm/jam dan 202 mm/jam pada kemiringan yang sama 5° didapat nilai erosi untuk intensitas terkecil 110,36 gr/m² pada uji laboratorium dan 24,42 gr/m² dengan permodelan *Universal Soil Loss Equation* (USLE). Sedangkan hasil dari intensitas terbesar 184,64 gr/m² pada uji laboratorium dan 31,81 gr/m² dengan permodelan *Universal Soil Loss Equation* (USLE). Data di atas menunjukkan bahwa intensitas hujan berpengaruh terhadap erosi tanah dimana jika intensitas hujan kecil didapat nilai erosi yang kecil dan jika intensitas hujan besar didapat nilai erosi besar pula artinya semakin besar intensitas dari hujan maka akan bertambah besar pula nilai erosi tanahnya, dimana nilai erosi tersebut bertahap naik sebagaimana tahapan intensitasnya sendiri dan nilai erosi tersebut akan bertambah besar apabila lamanya intensitas hujan bertambah.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Hasil dari perhitungan laju kehilangan tanah dengan pengujian laboratorium dan metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE), didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin besar intensitas air hujan maka semakin bertambah besar pula kedalaman hujan dan nilai erosivitasnya, hal tersebut mengakibatkan hasil erosi tanah menjadi besar pula. Tingginya intensitas hujan akan mengakibatkan percikan air semakin kuat untuk menghancurkan butiran tanah dan menimbulkan air limpasan yang lebih besar sehingga dapat mengangkut butiran-butiran tanah.
2. Perbandingan antara laju erosi hasil pengujian laboratorium dan dengan metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE) terdapat sedikit perbedaan, hal tersebut disebabkan karena hujan buatan alat *rainfall simulator* yang keluar dari nozzle hanya mendekati keadaan hujan asli di mana percikan air tidak merata merata secara maksimal.

Saran

Dari hasil kajian laju erosi tanah di Desa Harapan, Kecamatan Tanete Riaja, Kabupaten Barru dengan pengujian laboratorium dan metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE):

1. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi saran dan pertimbangan untuk para pemilik tanah Desa Harapan, Kecamatan Tanete Riaja, Kabupaten Barru baik masyarakat maupun pemerintah, lahan yang dijadikan lahan pertanian ataupun yang dibiarkan kosong agar tidak dibiarkan gundul dalam waktu yang lama terutama pada musim hujan agar tidak mengakibatkan erosi dan memperparah sedimentasi pada sungai. Menurut Symeonakis dkk., (2004) penebangan hutan (deforestasi) menjadi penyebab meningkatnya laju aliran permukaan sejak vegetasinya dihilangkan Selain itu kesalahan dalam pengelolaan lahan akan memiliki banyak konsekuensi yang cepat dan berpotensi lebih merusak pada lereng yang curam, daripada yang akan terjadi lereng yang lebih landai. Ini merupakan salah satu alasan utama mengapa lahan curam umumnya dianggap rapuh secara ekologis. Konsekuensi dari lahan curam terhadap degradasi lahan dibandingkan dengan kebanyakan daerah yang berlereng landai adalah daya serap air hujan yang lebih rendah dibandingkan dengan daerah tersebut (FAO., 1999).
2. Diharapkan adanya penelitian lanjutan mengenai pengujian laju kehilangan tanah dengan berbagai variasi kemiringan, kepadatan, dan parameter-parameter lain yang berbeda serta permodelan erosi yang lebih beragam.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kami haturkan kepada Bapak Dr. Ir. H. Hanafi Ashad, MT. sebagai Dekan Fakultas Teknik UMI Makassar, Bapak Ir. Alimin Gecong, MT. sebagai Ketua Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil UMI Makassar, Bapak Andi Alifuddin, ST., MT. sebagai Sekretaris Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil UMI Makassar, seluruh Staf Pengajar, Karyawan dan Civitas Akademika di lingkungan Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik UMI Makassar, serta Tim Asisten Laboratorium Hidrolika dan Mekanika Tanah.

Daftar Referensi

- Amfield Team, 1998. *Instruction Manual Rainfall Simulator*. Amfield Ltd, Hampshire, England.
- Damayanti L. S., 2005. Kajian Laju Erosi Tanah Andosol, Latosol dan Gromosol Untuk Berbagai Tingkat Kemiringan dan Intensitas Hujan Di Kabupaten Semarang. *Thesis Pasca Sarjana*, Universitas Diponegoro Hal 59.
- FAO, 1999. New Concepts and Approaches to Land Management in The Tropics with Emphasis on Steeplands. *FAO Soil Bulletin 75*. Land and Water Publication Series. Land and Water Development Division.

- Martono, 2004. Pengaruh Intensitas Hujan dan Kemiringan Lereng Terhadap Laju Kehilangan Tanah Pada Tanah Regosol Kelabu. *Thesis* Pasca Sarjana Universitas Diponegoro, Januari 2004 hal 102-123.
- Osok R. M., Talakua S. M., Gaspersz E. J., 2018. Analisis Faktor - Faktor Erosi Tanah, Dan Tingkat Bahaya Erosi Dengan Metode Rusle Di DAS Wai Batu Merah Kota Ambon Provinsi Maluku. *Jurnal Budidaya Pertanian*, Vol. 14(2): 89-96. <https://doi.org/10.30598/jbdp.2018.14.2.89>
- Parmawati, R. B., 2012. Pengaruh Pola Hujan Seragam dan Pola Hujan Mononobe Terhadap Aliran Limpasan dan Laju Erosi Tanah. *Jurnal Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret*, Januari 2012 Hal. 33-35.
- Schwab. G.O., Richard. Frevert, Talcott. W. Edminster, Kenneth. K. Barnes, 1981. *Soil and Water Conservation Engineering*. Third Edition. John Willey and Sons New York. Chichester. Brisbane Toronto.
- Symeonakis. E, S. Koukoulas, A. Calvo-Cases, E. Arnau-Rosalen, and I. Makris, 2004. *A Landuse Change and Land Degradation Study In Spain and Greece Using Remote Sensing and GIS*. Departamento de Geografía, Universidad de Valencia, Av. Blasco Ibáñez 28, Valencia 46010, Spain - Dept. of Geography, University of the Aegean, Mytilene 81100, Greece.
- Tim Laboratorium Mekanika Tanah UMI, 2017. *Buku Panduan Laboratorium Mekanika Tanah UMI*, Makassar
- Wischmeier, W. H., dan Smith, 1978. *Predicting Rainfall Erosion losses*, USDA Agr, Serv, Handbook 537.

EVALUASI PENENTUAN KEBUTUHAN AIR PENGOLAHAN TANAH DENGAN PERSAMAAN VAN DE GOOR & ZIJLSTRA PADA BUDIDAYA PADI SAWAH

Chusnul Arif^{1*}, Moh Yanuar J. Purwanto¹, Satyanto Krido Saptomo¹, Sutoyo¹,
Arien Heryansyah², dan Hanhan A. Sofiyuddin³

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, IPB University

²Departemen Teknik Sipil, Universitas Ibnu Khaldun

³Balai Teknik Irigasi, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PUPR

*chusnul_arif@apps.ipb.ac.id

Pemasukan: 3 November 2022 Perbaikan: 28 November 2022 Diterima: 28 November 2022

Intisari

Dalam Kriteria Perencanaan (KP-01) tentang Perencanaan Jaringan Irigasi disebutkan bahwa penentuan kebutuhan air irigasi untuk penyiapan lahan ditentukan dengan persamaan *Van de Goor & Zijlstra* (VGZ). Perkembangan teknologi usahatani pada pengolahan tanah dengan mekanisasi mempercepat waktu pengolahan tanah serta penggenangan yang hemat air menjadi pertimbangan melakukan evaluasi kebutuhan air. Makalah ini bertujuan mengevaluasi penentuan kebutuhan air irigasi penyiapan lahan dengan model VGZ dan membandingkan dengan model neraca air (*water balance analysis* (WBA)) dengan menerapkan irigasi berselang. Dalam evaluasi, simulasi dan penelitian lapang dilakukan khususnya untuk melakukan validasi model WBA di lahan Balai Besar Peramalan Organisme Pengganggu Tanaman (BBPOPT), Karawang, Jawa Barat. Simulasi dilakukan pada tekstur tanah liat berat dengan dua kondisi perkolasi ($P = 1,5 \text{ mm}$ dan $P = 2,0 \text{ mm}$) dan evaporasi ($E = 3,5 \text{ mm}$ dan $E = 5,5 \text{ mm}$) dengan periode penyiapan lahan 20 dan 30 hari. Hasilnya menunjukkan kebutuhan air irigasi pada model VGZ berkisar antara 303–379 mm/hari atau setara 1,46–1,92 l/s. Sedangkan model WBA membutuhkan air irigasi yang lebih kecil berkisar antara 142–275 mm/hari, dengan debit sebesar 0,74 l/s dan 1,11 l/det. Model WBA dapat menghemat air irigasi sebesar 27–42%. Hasil simulasi ini didukung hasil observasi lapang dengan koefisien determinasi model (R^2) sebesar 0,97 sampai 0,99. Dari hasil ini, penentuan kebutuhan air irigasi pada penyiapan lahan di KP-01 perlu ditinjau ulang dengan memperhatikan periode lama penyiapan lahan yang lebih singkat dengan penggunaan traktor maupun kebutuhan tinggi penggenangan setiap proses penyiapan lahan.

Kata Kunci: irigasi berselang, model *Van de Goor & Zijlstra*, neraca air, padi sawah

Latar Belakang

Seiring dengan perubahan iklim yang memberikan dampak pada berbagai bidang termasuk pertanian, usaha adaptasi dan mitigasi perlu dilakukan untuk mengurangi dampak negatif yang terjadi. Perubahan iklim ini mengakibatkan perubahan pola

hujan di Kawasan Asia Tenggara (Loo dkk., 2015). Pola hujan yang berubah pada musim kemarau dan penghujan dapat menyebabkan ketersediaan sumberdaya air lebih terbatas. Terlebih kompetisi penggunaan air untuk memenuhi kebutuhan industri dan domestik terus meningkat. Hal ini menuntut perubahan dalam paradigma pengelolaan air khususnya di area dengan perubahan demografi dan iklim (Tzanakakis dkk., 2020). Dalam konteks pengelolaan air pertanian, penggunaan air irigasi perlu lebih efektif dan efisien.

Sampai saat ini, besarnya kebutuhan air irigasi untuk budidaya padi sawah ditentukan berdasarkan Kriteria Perencanaan (KP-01) tentang Perencanaan Jaringan Irigasi tahun 2013. Dalam KP-01 tersebut, kebutuhan air irigasi dibagi dalam dua periode, yaitu kebutuhan air penyiapan lahan dan selama budidaya. Pada periode pertama, kebutuhan air irigasi ditentukan berdasarkan persamaan *Van de Goor & Zijlstra* (VGZ). Dalam metode ini laju air diasumsikan konstan dengan satuan l/s dan skenario penyiapan lahan selama 30 dan 45 hari.

Metode ini sudah cukup lama digunakan dan belum pernah dilakukan evaluasi. Penelitian untuk mengevaluasi model tersebut masih minim. Anggraeni dan Kalsim (2013) membandingkan metode VGZ dan Cropwat 8.0, hasilnya menunjukkan bahwa metode VGZ lebih banyak membutuhkan air dibandingkan dengan metode Cropwat 8.0. Hal ini wajar mengingat kebutuhan air penyiapan lahan pada metode VGZ diberikan dengan laju air konstan tanpa memperhitungkan dinamika perubahan evapotranspirasi maupun parameter lainnya. Selain itu, perkembangan teknologi usahatani pada pengolahan tanah dengan mekanisasi mempercepat waktu pengolahan tanah serta penggenangan yang hemat air menjadi pertimbangan melakukan evaluasi kebutuhan air penyiapan lahan. Sayangnya dalam metode Cropwat 8.0, hal ini belum menjadi pertimbangan dalam KP-01 karena masih dalam bentuk software dan tidak mudah dimasukkan KP-01.

Oleh sebab itu, perlu adanya evaluasi metode VGZ dengan metode lain. Pendekatan neraca air (*Water Balance Analysis/WBA*) merupakan metode yang sederhana dan mudah dalam evaluasi karena mempertimbangkan seluruh aspek baik air masuk (*inflow*) maupun air keluar (*outflow*). Metode ini telah digunakan untuk estimasi irigasi sistem SRI tidak tergenang (Arif dkk., 2012) dan SRI organik (Arif dkk., 2019). Hasilnya menunjukkan bahwa metode ini menghasilkan performansi yang sangat baik dengan R^2 lebih besar 0,8 dengan kesalahan pendugaan yang rendah.

Adapun tujuan dari studi ini adalah mengevaluasi penentuan kebutuhan air irigasi penyiapan lahan dengan model VGZ dan membandingkan dengan model WBA dengan menerapkan irigasi berselang. Secara spesifik tujuan studi ini adalah: a) membandingkan kebutuhan air irigasi antara metode VGZ dan WBA; dan b) melakukan validasi model WBA dengan data observasi lapang.

Metodologi Studi

Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan dalam dua tahap, tahap simulasi dan observasi lapang. Penelitian lapangan dilakukan di lahan padi sawah Balai Besar Peramalan Organisme Pengganggu Tanaman (BBPOPT), Karawang, Jawa Barat pada bulan Juli

2022. Terdapat dua lahan yang digunakan yaitu untuk periode penyiapan lahan 20 dan 30 hari. Adapun luas lahan yang digunakan hampir sama berturut-turut 3200 m² dan 3300 m² untuk penyiapan lahan 20 dan 30 hari.

Tahapan Pengembangan Model

Untuk metode VGZ, kebutuhan air didasarkan pada laju air konstan dalam l/s selama periode penyiapan lahan dengan persamaan berikut ini:

$$IR = \frac{Me^K}{(e^K - 1)} \quad (1)$$

$$K = \frac{MT}{S} \quad (2)$$

dengan keterangan:

IR : Kebutuhan air irigasi di tingkat persawahan, mm/hari

M : Kebutuhan air untuk mengganti/mengkompensasi kehilangan air akibat evaporasi dan perkolasi di sawah yang sudah dijenuhkan $M = E_o + P$, mm/hari

E_o : Evaporasi air terbuka yang diambil $1,1 \cdot ETo$ selama penyiapan lahan, mm/hari, dan P adalah Perkolasi

ETo : Evapotranspirasi (mm/hari)

T : jangka waktu penyiapan lahan (hari)

S : Kebutuhan air, untuk penjenuhan ditambah dengan lapisan air 50 mm, yakni $200 + 50 = 250$ mm. Atau S bernilai 300 mm untuk lahan yang telah dibiarkan selama jangka waktu yang lama (2,5 bulan atau lebih)

Sedangkan untuk metode WBA, perhitungan kebutuhan air irigasi didasarkan pada prinsip Indikator Komado *Water Management* Petani (IKWMP) dengan irigasi berselang untuk mengkondisikan tinggi muka air tertentu pada hari tertentu. IKWMP ini didasarkan pada survei ke beberapa lokasi penyiapan lahan. Adapun skenario tinggi muka air disajikan pada Tabel 1. Skenario didapatkan dari survey beberapa lokasi berdasarkan yang umumnya dilakukan oleh petani.

Tabel 1. Skenario tinggi muka air skema IKWMP untuk periode 20 dan 30 hari

Periode 30 hari (Hari ke-)	Periode 20 hari (Hari ke-)	Kegiatan	Tinggi Genangan	Jenis Pengolah Tanah
1-5	1-2	Pemberian Air Awal: Genangan Awal	3 cm	-
6-7	3-4	Pembajakan	5 cm	Bajak Singkal
8-10	5-7	Genangan Pasca Bajakan	5 cm	-
11-14	8-9	Penggaruan	3 cm	Bajak rotari
15-20	10-12	Genangan pasca garu	3 cm	-
21-25	13-15	Perataan	3 cm	Bajak rotari/HOK
26-29	16-19	Genangan Pasca rataaan	3 cm	-
30	20	Tanam	3 cm	-

Dari skenario diatas, kebutuhan air dihitung dengan persamaan WBA berikut ini:

$$IR = \Delta WL + S - Re - (E_o + P) \quad (3)$$

dengan keterangan:

IR : Kebutuhan air irigasi di tingkat persawahan, mm/hari

E_o : Evaporasi air terbuka yang diambil 1,1, ET_o selama penyiapan lahan, mm/hari

P : Perkolasi (mm/hari)

Re : Hujan efektif (mm/hari)

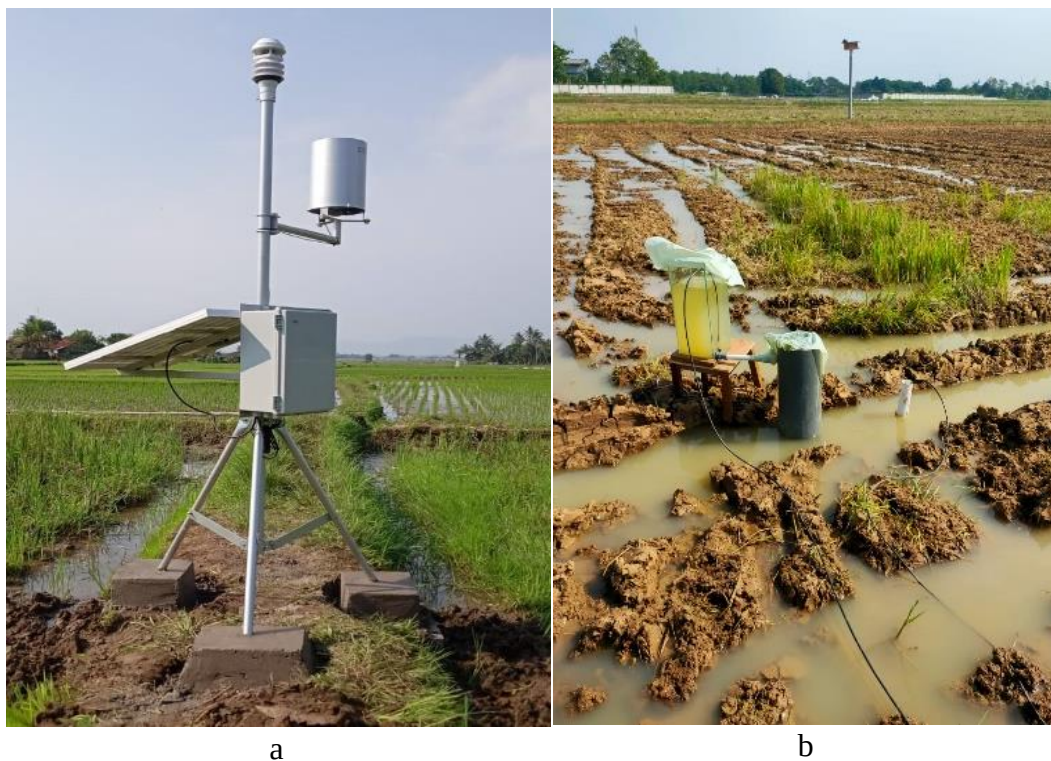
S : Kebutuhan air untuk penjemuran (didasarkan pada kondisi awal kelembaban tanah), mm/hari

ΔWL : Perubahan tinggi muka air (selisih tinggi muka air yang dikehendaki dengan tinggi muka air awal), mm/hari

Baik metode VGZ dan WBA, simulasi dilakukan pada tekstur tanah liat berat dengan dua kondisi perkolasi ($P = 1,5$ mm dan $P = 2,0$ mm) dan evaporasi ($E = 3,5$ mm dan $E = 5,5$ mm) dan hujan efektif sebesar 0.

Tahapan Observasi Lapangan dan Validasi Model

Pada observasi lapangan, *automatic weather station* (AWS) dan pengamatan tinggi muka air digunakan untuk menentukan parameter hujan, evaporasi, evapotranspirasi, perkolasi dan perubahan tinggi muka air di lahan (Gambar 1).



Gambar 1. a) Automatic Weather Station (AWS), b) Pengamatan tinggi muka air

Dari data pada AWS, evapotranspirasi potensial ditentukan dengan persamaan Penman-Monteith berikut ini (Allen dkk., 1998):

$$ETp = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \quad (4)$$

dengan keterangan:

- ETp : evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- Δ : kurva kemiringan tekanan uap (kPa/°C)
- G : flux panas tanah (MJ/m² hari),
- e_s : tekanan uap jenuh (kPa)
- u : kecepatan angin (m/s)
- R_n : radiasi netto ekuivalen evaporasi (mm/hari)
- T_{mean} : suhu rata-rata harian (°C)
- γ : konstanta psychometrik (mb/°C)

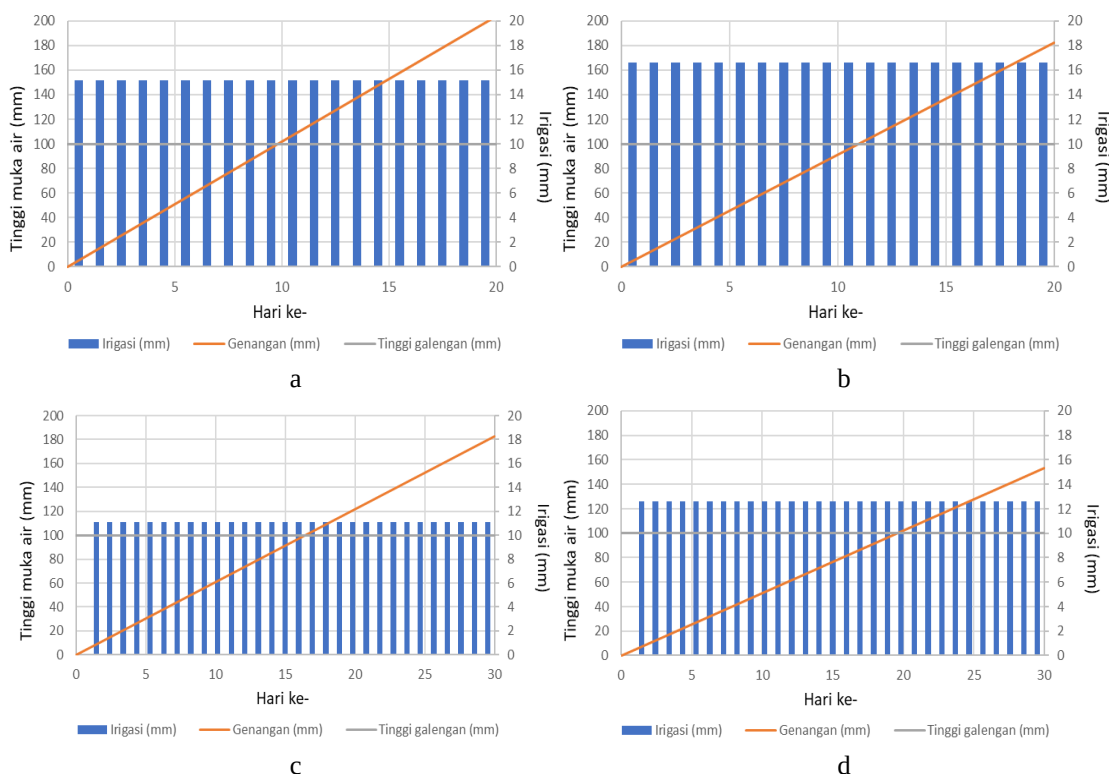
Berhubung kondisi tanah tergenang dan cenderung jenuh, maka nilai evaporasi (E) ditentukan sebesar 1,1 ETp . Adapun validasi dilakukan untuk menentukan performansi model dengan nilai R^2 (koefisien determinasi) antara nilai tinggi muka air observasi lapangan dan pendugaan model.

Hasil Studi dan Pembahasan

Perbandingan kebutuhan air irigasi VGZ dan WBA

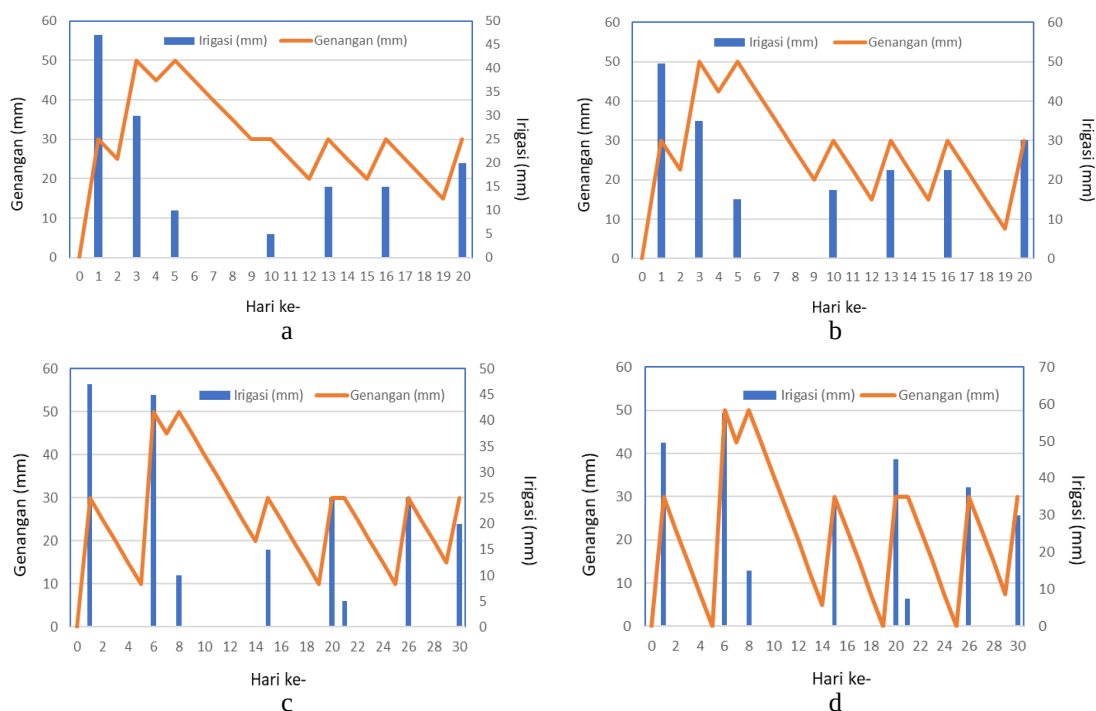
Pada periode 20 hari dengan M sebesar 5,0 mm (Gambar 2a) dibutuhkan debit irigasi konstan sebesar 1,76 l/s atau setara 15,2 mm/hari. Metode ini meningkatkan tinggi muka air secara kontinyu di lahan, dan menyebabkan limpasan setelah hari ke-10 (dengan asumsi tinggi galengan 10 cm). Hal yang sama juga terjadi ketika nilai M sebesar 7,5 mm (Gambar 2b), dengan laju irigasi konstan sebesar 1,92 l/s (setara 16,62 mm/hari) limpasan terjadi pada hari ke-12.

Periode penyiapan lahan yang lebih lama 30 hari juga menyebabkan hal yang sama, dengan irigasi sebesar 1,28 l/s (setara 11,1 mm/hari) dan 1,46 l/s (setara 12,6 mm/hari) menyebabkan limpasan terjadi pada hari ke-17 dan 20 untuk skenario M sebesar 5,0 mm dan 7,5 mm. Hal ini menunjukkan bahwa model VGZ cukup boros karena irigasi melebihi evaporasi dan perkolasi yang menyebabkan akumulasi kenaikan tinggi muka air. Secara umum, limpasan terjadi karena irigasi terlalu besar dan harus dikurangi supaya lebih efisien (Ebrahimian dkk., 2020).



Gambar 2. Tinggi muka air dan irigasi pada model VGZ dengan beberapa skenario: a) periode 20 hari dengan $M = 5,0$ mm, b) periode 20 hari dengan $M = 7,5$ mm, c) periode 30 hari dengan $M = 5,0$ mm dan d) periode 30 hari dengan $M = 7,5$ mm

Sedangkan tinggi muka air dan irigasi pada model WBA dengan skenario tinggi muka air sesuai dengan IKWMP (Tabel 1) disajikan pada Gambar 3. Tinggi muka air berfluktuatif sesuai dengan ketinggian yang diharapkan pada Tabel 1, dengan kebutuhan air yang cukup tinggi di awal persiapan lahan. Kebutuhan air irigasi pada hari pertama sebesar kurang lebih 50 mm, setelah itu dapat diberikan berselang dengan jumlah air irigasi lebih sedikit. Adapun debit rata-rata irigasi yang diperlukan pada periode 20 hari sebesar 0,82 l/s dan 1,11 l/s, sedangkan pada periode 30 hari sebesar 0,74 l/s dan 1,06 l/s. Dengan skenario model WBA ini tinggi genangan dapat dikendalikan sesuai dengan IKWMP dengan minimalisasi limpasan. Model WBA atau ada yang menyebut *Soil Water Balance (SWB)* merupakan metode yang digunakan oleh FAO dalam menentukan kebutuhan air dan penjadwalan irigasi (Pereira dkk., 2020), sehingga layak juga digunakan dalam KP Irigasi.



Gambar 3. Tinggi muka dan irigasi pada model WBA dengan beberapa skenario: a) periode 20 hari dengan $M = 5,0$ mm, b) periode 20 hari dengan $M = 7,5$ mm, c) periode 30 hari dengan $M = 5,0$ mm dan d) periode 30 hari dengan $M = 7,5$ mm

Tabel 2. Perbandingan irigasi total antara model VGZ dan WBA

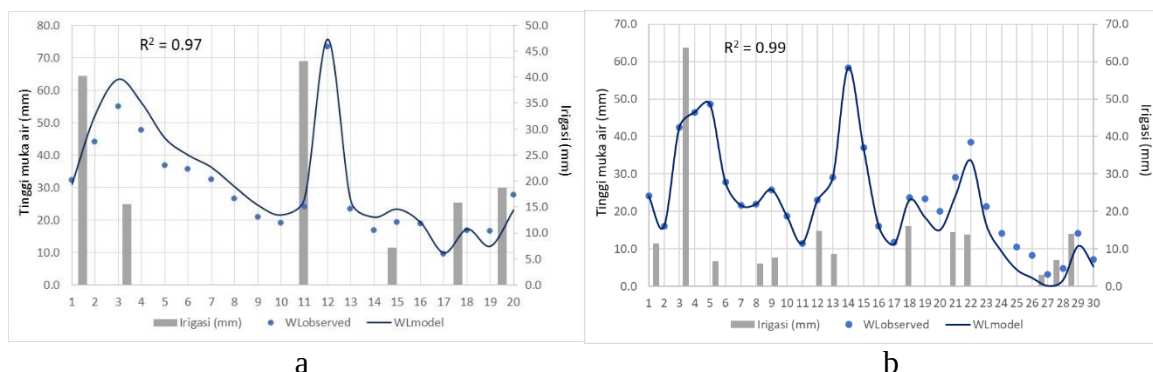
Nilai M (mm)	20 hari (mm)		30 hari (mm)	
	WBA	VGZ	WBA	VGZ
5,0	142	303	192	332
7,5	192	332	275	379

Hal tersebut juga didukung dari hasil simulasi yang menunjukkan bahwa model WBA lebih hemat air dibandingkan dengan model VGZ. Dengan nilai M dan periode penyiapan lahan yang berbeda, model WBA dapat menghemat air 27 - 42% dibandingkan model VGZ. Hal ini wajar mengingat model VGZ diturunkan secara analitik untuk mendapatkan debit irigasi konstan untuk mempertahankan lahan terus menerus tergenang. Seiring dengan berkembangnya teknologi hemat air, irigasi tergenang terus menerus ini tidak sejalan dengan konsep peningkatan efisiensi irigasi, karena cenderung boros air. Data empiris dari beberapa studi menunjukkan bahwa irigasi berselang sebagai irigasi alternatif yang lebih hemat air dengan penghematan air berkisar 16-43% (Nakhjiri dkk., 2021).

Validasi model WBA

Hasil observasi lapangan menunjukkan bahwa model WBA mampu diterapkan dengan baik dengan indikator tinggi muka air model (WL_{model}) yang mendekati dengan observasi lapangan ($WL_{observed}$) dengan nilai R^2 sebesar 0,97 dan 0,99 untuk periode 20 dan 30 hari (Gambar 4). Dalam bidang hidrologi, nilai tersebut

lebih dari 0,6 yang menunjukkan model sangat baik dan dapat diterima (Gaviria and Carvajal-Serna, 2022).



Gambar 4. Perbandingan tinggi muka air model dan observasi dan irigasi pada model WBA: a) periode 20 hari, b) periode 30 hari

Kebutuhan air irigasi pada model WBA terlihat bahwa kebutuhan terbanyak terjadi pada awal penyiapan lahan, sebesar 55-64 mm untuk periode 20 dan 30 hari (Gambar 4). Setelah itu, kebutuhan air irigasi cenderung menurun dan kecil. Hal tersebut sesuai dengan simulasi model WBA (Gambar 3).

Tabel 3. Komponen neraca air pada observasi lapangan

Parameter	Total (mm)	
	Periode 20 hari	Periode 30 hari
<i>Inflow:</i>		
Irigasi	140,5	194,9
Curah Hujan	192,2	216,6
<i>Outflow:</i>		
Evapotranspirasi	91,3	140,6
Perkolasi	96,7	68,0
Drainase	144,8	202,9

Nilai total irigasi pada observasi lapangan sebesar 140,5 mm dan 194,9 mm untuk periode 20 dan 30 hari (Tabel 3). Nilai tersebut mendekati nilai simulasi untuk nilai M sebesar 5,0 mm. Pada simulasi tercatat total irigasi sebesar 142 dan 192 mm untuk periode 20 dan 30 hari. Yang membedakan hasil simulasi dan observasi adalah curah hujan dan drainase. Tercatat curah hujan sebesar 192,2 mm dan 216,6 mm untuk periode 20 dan 30 hari dengan drainase sebesar 144,8 mm dan 202,9 mm. Sumber utama drainase adalah curah hujan yang terjadi setelah pemberian air irigasi. Hal ini menunjukkan bahwa curah hujan memiliki korelasi tinggi dengan limpasan (drainase). Dari penelitian sebelumnya korelasi curah hujan dan limpasan dapat mencapai R^2 sebesar 0,98 (Arif dkk., 2012). Hal ini akan berimbas pada turunnya curah hujan efektif. Secara umum, dari hasil observasi model WBA dapat diterapkan untuk penentuan KP irigasi yang lebih efektif dan efisien.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Model *Van de Goor & Zijlstra* (VGZ) yang digunakan dalam KP-01 Perencanaan Jaringan Irigasi tahun 2013 dievaluasi dan dibandingkan dengan model *Water Balance Analysis* (WBA) dengan konsep dan prinsip Indikator Komado *Water Management* Petani (IKWMP) dengan irigasi berselang. Hasilnya menunjukkan bahwa model WBA lebih hemat air sebesar 27 – 42 % dibandingkan model VGZ. Model WBA lebih hemat air karena irigasi diberikan secara berselang, sedangkan model VGZ diberikan secara kontinu dengan debit konstan yang menyebabkan terjadinya limpasan. Model WBA juga dapat diterapkan di lapangan dengan validasi model dengan R^2 sebesar 0,97 dan 0,99 untuk periode penyiapan lahan 20 dan 30 hari.

Saran

Penentuan kebutuhan air penyiapan lahan dengan model VGZ dalam KP-01 Perencanaan Jaringan Irigasi tahun 2013 perlu ditinjau ulang dengan dasar metode tersebut lebih boros dalam penentuan jumlah air irigasi. Selain itu, periode lama penyiapan lahan yang lebih singkat dengan penggunaan traktor maupun kebutuhan tinggi genangan setiap proses penyiapan lahan yang tidak menuntut irigasi tergenang terus menerus.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada *Asian Development Bank* (ADB) yang telah mendanai studi ini dalam rangkaian kegiatan “*NPIC Consulting Services for Guideline Improvement IPDMIP*” tahun 2021-2022.

Daftar Referensi

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome.
- Anggraeni, I.D.S., Kalsim, D.K., 2013. Perbandingan Perhitungan Kebutuhan Irigasi Padi Metoda KP-01 dengan Cropwat-8.0. *Jurnal Irigasi* 8, 15–23.
- Arif, C., Setiawan, B.I., Mizoguchi, M., Doi, R., 2012. Estimation of Water Balance Components in Paddy Fields under Non-Flooded Irrigation Regimes by using Excel Solver - SciAlert Responsive Version [WWW Document]. *Journal of Agronomy*, 11: 53-59. <https://doi.org/10.3923/ja.2012.53.59>
- Arif, C., Setiawan, B.I., Saputra, S.F.D., Mizoguchi, M., 2019. Analisis Neraca Air pada Pengelolaan Air dalam System of Rice Intensification-Organik (SRI-Organik) di Jawa Barat, Indonesia. *Jurnal Irigasi* 14, 17–24.
- Ebrahimian, H., Dialameh, B., Hosseini-Moghari, S.-M., Ebrahimian, A., 2020. Optimal conjunctive use of aqua-agriculture reservoir and irrigation canal for paddy fields (case study: Tajan irrigation network, Iran). *Paddy Water Environ* 18, 499–514. <https://doi.org/10.1007/s10333-020-00797-5>

- Eisapour Nakhjiri, S., Ashouri, M., Sadeghi, S.M., Mohammadian Roshan, N., Rezaei, M., 2021. The Effect of Irrigation Management and Nitrogen Fertilizer On Grain Yield and Water-use Efficiency of Rice Cultivars in Northern Iran. *Gesunde Pflanzen* 73, 359–366. <https://doi.org/10.1007/s10343-021-00562-6>
- Gaviria, C., Carvajal-Serna, F., 2022. Regionalization of flow duration curves in Colombia. *Hydrology Research* 53, 1075–1089. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.022>
- Loo, Y.Y., Billa, L., Singh, A., 2015. Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall, in Southeast Asia. *Geoscience Frontiers*, Special Issue: Geoinformation techniques in natural hazard modeling 6, 817–823. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.02.009>
- Pereira, L.S., Paredes, P., Jovanovic, N., 2020. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural Water Management* 241, 106357. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>
- Tzanakakis, V.A., Paranychianakis, N.V., Angelakis, A.N., 2020. Water Supply and Water Scarcity. *Water* 12, 2347. <https://doi.org/10.3390/w12092347>

ANALISIS INDEKS DAN PENYEBARAN DAERAH KEKERINGAN AKIBAT FENOMENA ENSO DI DAS NGROWO KABUPATEN TULUNGAGUNG

Chintya Ayu Permata Herdita*, Ari Murdhianti,
Donny Harisuseno, dan Ery Suhartanto

Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

*chintyaayupermataherdita2@gmail.com

Pemasukan: 14 Nopember 2022 Perbaikan: 23 Mei 2023 Diterima: 24 Mei 2023

Intisari

Kekeringan meteorologi merupakan suatu kejadian yang berlangsung secara alami dan dapat terjadi secara berulang akibat berkurangnya curah hujan dari kondisi normalnya. Kekeringan memberikan dampak yang kompleks pada berbagai sektor kehidupan. Perlu dilakukan usaha untuk memantau dan menganalisis karakteristik kekeringan sebagai langkah awal untuk melakukan upaya mitigasi bencana kekeringan. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung indeks kekeringan dan penggambaran peta sebaran kekeringan di wilayah DAS Ngrowo menggunakan metode *Standardized Preecipitation Index* (SPI) dan *Effecive Drought Index* (EDI). Dalam menghitung indeks kekeringan dibagi menjadi 5 periode defisit, yaitu 1, 3, 6, 12, dan 24 bulanan. Nilai indeks kekeringan yang diperoleh dibandingkan dengan fenomena *El Nino Southern Oscillation* (ENSO) menggunakan nilai Indeks Osilasi Selatan (SOI) untuk dapat mengetahui kesesuaian dengan keadaan di lokasi penelitian. Dengan menggunakan data sekunder dari 16 stasiun hujan dan panjang pencatatan data hujan harian selama 18 tahun, didapati hasil grafik perbandingan nilai indeks kekeringan metode SPI & EDI tiap periode defisit, pada periode yang sama kedua metode menghasilkan prediksi kekeringan dengan pola yang mirip. Selain itu didapati bahwa metode EDI memiliki hasil yang lebih menunjukkan kemiripan secara visual grafik surplus dan defisit terhadap nilai indeks osilasi selatan, artinya EDI secara visual lebih baik dalam pembacaan kejadian kekeringan akibat fenomena *EL Nino*. Secara kuantitatif nilai persen kesesuaian, korelasi, dan determinasi EDI juga memberikan nilai yang lebih besar terhadap kejadian ENSO dibandingkan metode SPI sehingga digambarkan peta sebaran kekeringan dari hasil indeks kekeringan dengan metode EDI berdasarkan trend tahun-tahun kejadian kekeringan terparah yaitu 2001, 2005, 2009, dan 2014. Hasil interpolasi pada peta juga menunjukkan kesesuaian hasil analisis dengan wilayah desa yang sering terdampak kekeringan di DAS Ngrowo.

Kata Kunci: kekeringan, SPI, EDI, ENSO, *el nino*

Latar Belakang

Perubahan iklim telah menjadi salah satu permasalahan global, hal ini nampak dari diterimanya secara universal hasil konvensi PBB tentang perubahan iklim (UN

Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) pada konferensi tingkat tinggi (KTT) bumi tentang lingkungan dan pembangunan (*UN Conference on Environment and Development, UNCED*) di Rio de Janeiro, Brasil Tahun 1992 (Murdiyarso, 2015).

Kekeringan meteorologi didefinisikan sebagai suatu kejadian yang berlangsung secara alami dan dapat terjadi secara berulang akibat berkurangnya curah hujan dari kondisi normalnya (Rafiuddin dkk., 2011). Bencana kekeringan adalah dampak dari perubahan iklim global, El Nino dan La Nina. Tahun kering di Indonesia akibat terjadinya El Nino dan tahun basah merupakan pengaruh terjadinya La Nina yang intensif (Brumbelow dkk., 2005).

Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Tulungagung menyatakan, sedikitnya ada 15 desa di 5 kecamatan di Kabupaten Tulungagung rutin terjadi kekeringan dan kekurangan pasokan air bersih. Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Trenggalek menyatakan, sedikitnya ada 4 desa yang rutin terdampak kekeringan di Kabupaten Trenggalek.

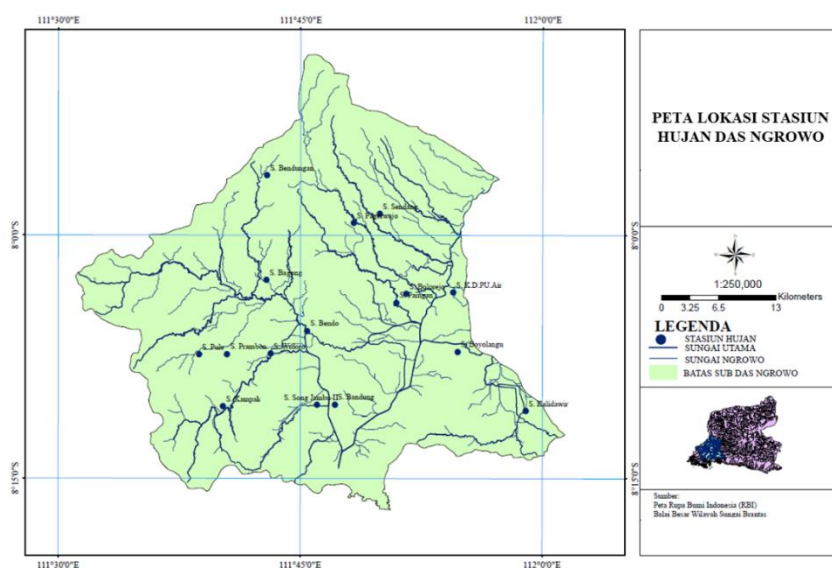
Beberapa studi sebelumnya telah dilakukan untuk mengetahui indeks kekeringan di berbagai daerah. Seperti Byun dkk., (2010) yang telah menganalisis kekeringan meteorologi dengan membandingkan metode *Effective Drought Index (EDI)* dan *Standardized Precipitation Index (SPI)* untuk pemantauan kekeringan di Seoul Korea, hasil penelitian mengatakan bahwa metode *EDI* lebih efisien dari *SPI* untuk mengasumsi kekeringan jangka pendek maupun jangka panjang. Selain itu terdapat studi mengenai perbandingan tujuh metode kekeringan meteorologi di Iran (Morid dkk., 2006), hasil penelitian mengatakan metode *SPI* dan *EDI* direkomendasikan karena dapat mendeteksi timbulnya kekeringan, variasi spasial dan temporal secara konsisten, namun *EDI* ternyata lebih responsif untuk kekeringan yang muncul dan tampil lebih baik.

Sejauh ini belum ada studi mengenai analisis kekeringan meteorologi metode *SPI* dan *EDI* di DAS Ngrowo, yang kemudian di bandingkan dengan fenomena *El Nino Southern Oscillation (ENSO)* menggunakan data Indeks Osilasi Selatan (*SOI*) yang dikeluarkan oleh *Bureau of Meteorology Australian Government*. Studi ini mencoba untuk mengetahui metode kekeringan meteorologi yang memiliki kesesuaian terhadap fenomena El Nino yang berdampak pada berkurangnya curah hujan di Indonesia. Kemudian akan digambarkan peta sebaran kekeringan menggunakan program berbasis spasial dengan interpolasi *Kriging*.

Metodologi Studi

Lokasi Studi

Lokasi studi berada di DAS Ngrowo yang terletak pada koordinat 111°31'31'' BT - 111°50'50'' BT dan 7°53'56'' LS - 8°15'16'' LS. DAS Ngrowo sendiri memiliki luas sebesar 1.470 km² dan juga memiliki 16 stasiun hujan, DAS Ngrowo terbagi menjadi 5 wilayah kabupaten yaitu, Tulungagung, Trenggalek, Ponorogo, Kediri, dan Nganjuk (Gambar 1).



Gambar 1. Peta lokasi stasiun hujan DAS Ngrowo

Data Penelitian

Data yang dibutuhkan pada studi ini antara lain data curah hujan harian (tahun 2000-2017), data Indeks Osilasi Selatan (*SOI*) bulanan (tahun 2000-2017), peta batas DAS, peta jaringan sungai, peta lokasi stasiun hujan dan peta batas administrasi di DAS Ngrowo.

Tahapan Analisis

Tahapan analisis yang dilakukan dalam studi ini sebagai berikut:

- 1) Melakukan studi pustaka mengenai teori-teori yang akan digunakan dalam pengerjaan
- 2) Pengumpulan data skunder
- 3) Analisis hidrologi
 - a. uji konsistensi data (Kurva Massa Ganda)
 - b. uji stationer (Uji F dan Uji T)
- 4) Analisis indeks kekeringan dengan metode
 - a. *Standardized Precipitation Index (SPI)*
 - b. *Effective Drought Index (EDI)*
- 5) Perbandingan hasil perhitungan indeks kekeringan metode *SPI* dan *EDI*
- 6) Perbandingan hasil indeks kekeringan metode *SPI* dan *EDI* dengan data indeks osilasi selatan (*SOI*).
- 7) Penggambaran peta sebaran kekeringan

Metode *Standardized Precipitation Index (SPI)*

Metode *SPI* merupakan metode yang dikembangkan oleh McKee (1993). Metode ini merupakan model untuk mengukur curah hujan pada berbagai periode berdasarkan kondisi normalnya. Kriteria nilai indeks kekeringan metode *SPI* diklasifikasikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. intensitas kekeringan metode SPI

Klasifikasi	Nilai SPI
Amat sangat basah (ASB)	>2,00
Sangat basah (SB)	1,50 - 1,99
Cukup basah (CB)	1,00 - 1,49
Mendekati normal (MN)	(-0,99) - 0,99
Cukup kering (CK)	(-1,00) - (-1,49)
Sangat kering (SK)	(-1,50) - (-1,99)
Amat sangat kering (ASK)	< (-2,00)

(Sumber: Mc Kee, 1993)

Perhitungan nilai *SPI* berdasarkan jumlah sebaran gamma yang didefinisikan sebagai fungsi frekuensi atau peluang kejadian, untuk $x > 0$ sebagai berikut:

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\beta^\alpha T(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (1)$$

Nilai α dan β diestimasi untuk setiap stasiun hujan sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (2)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (3)$$

$$\text{atau: } \alpha = \frac{\bar{x}^{-2}}{s^2} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (5)$$

Untuk $x = 0$ maka nilai $G(x)$ menjadi:

$$H(x) = q + (1-q).G(x) \quad (6)$$

dengan q = jumlah kejadian hujan = 0 (m) / jumlah data (n), Nilai *SPI* merupakan transformasi dari distribusi gamma ($G(x)$) menjadi standart normal dengan rata-rata 0 (nol) dan perbedaan 1, atau menggunakan rumusan berikut:

$$\text{Untuk } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad Z = SPI = + \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (7)$$

$$\text{Untuk } 0 < H(x) \leq 1,0 \quad Z = SPI = - \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (8)$$

$$\text{Untuk } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad t = \sqrt{\ln \frac{1}{(H(x))^2}} \quad (9)$$

$$\text{Untuk } 0 < H(x) \leq 1,0 \quad t = \sqrt{\ln \frac{1}{(1-H(x))^2}} \quad (10)$$

$$C_0 = 2,515 \quad d_1 = 1,433 \quad C_1 = 0,802 \quad d_2 = 0,189 \quad C_2 = 0,010 \quad d_3 = 0,001$$

Metode *Effective Drought Index* (EDI)

Metode *EDI* telah diuji oleh Morid dkk. (2006) untuk mendemonstrasikan kekeringan di Iran. Klasifikasi *EDI* yang digunakan dalam analisis ini menggunakan kelas kekeringan termodifikasi. Hal ini dilakukan untuk mempermudah melihat perbandingan tingkat klasifikasi berdasarkan kedua metode, Tabel 2 merupakan klasifikasi intensitas kekeringan metode *EDI* Modifikasi.

Tabel 2. Intensitas kekeringan metode EDI modifikasi

Klasifikasi	Nilai EDI
Amat sangat basah (ASB)	>2,00
Sangat basah (SB)	1,50 - 1,99
Cukup basah (CB)	1,00 - 1,49
Mendekati normal (MN)	(-0,99) - 0,99
Cukup kering (CK)	(-1,00) - (-1,49)
Sangat kering (SK)	(-1,50) - (-1,99)
Amat sangat kering (ASK)	< (-2,00)

(Sumber: Byun, 2010)

Perhitungan nilai indeks *EDI* dapat dihitung berdasarkan beberapa langkah berikut:

- 1) Menghitung nilai *EP* (*Effective Precipitation*)

$$Epi = \sum_{n=1}^i \left[(\sum_{m=1}^n Pm) / n \right] \quad (11)$$

dengan keterangan:

i : durasi penjumlahan

n : banyak data

Pm : curah hujan

- 2) Menghitung nilai rata-rata curah hujan efektif sepanjang tahun pengamatan data atau *Mean Effective Precipitation (MEP)*
- 3) Menghitung (*Deviation of EP from climatology*) *DEP* yang merupakan selisih dari *EP* dan *MEP*, kemudian hitung standar deviasinya

$$DEP = EP - MEP \quad (12)$$

- 4) Untuk mendapatkan nilai indeks *EDI* dengan cara membagi nilai *DEP* untuk setiap bulan dengan deviasi standar (*SD*) dari *DEP* selama panjang tahun data.

$$EDI = \frac{DEP}{SD(DEP)} \quad (13)$$

ENSO (El-Nino Southern Oscillation)

Fenomena yang sangat mempengaruhi iklim di Indonesia adalah *ENSO*, karena Indonesia terletak diantara Samudra Pasifik dan Hindia. *El Nino* merupakan fase ekstrim dalam siklus *ENSO*. *El Nino* menyebabkan terjadinya penurunan curah hujan di beberapa wilayah Indonesia. Indeks Osilasi Selatan (*SOI*) merupakan parameter yang biasa digunakan untuk mendeteksi terjadinya fenomena *El Nino*, dimana *SOI* adalah menyatakan perbedaan tekanan permukaan laut (*SLP*) antara Tahiti dan Darwin-Australia.

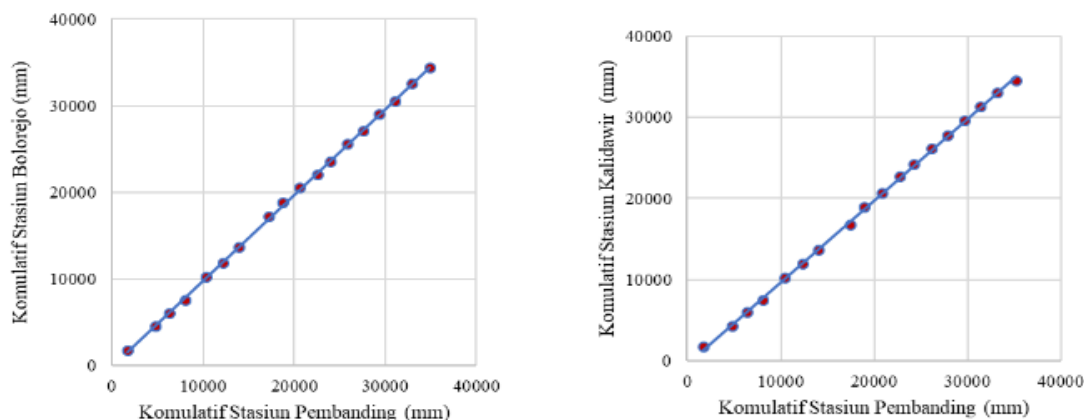
Metode Interpolasi *Kriging*

Metode *Kriging* adalah estimasi *stochastic* yang mirip dengan *Inverse Distance Weighted (IDW)* dimana menggunakan kombinasi linear dari *weight* untuk memperkirakan nilai diantara sampel data. Yuan (2016) melakukan penelitian variasi spasial dan temporal dalam akurasi peta kekeringan meteorologi, hasilnya *Kriging* bekerja lebih baik daripada *IDW*.

Hasil Studi dan Pembahasan

Uji Konsistensi

Berdasarkan hasil uji konsistensi data hujan dengan menggunakan kurva massa ganda di 16 stasiun hujan di DAS Ngrowo tidak ditemukan adanya penyimpangan, maka data hujan dianggap konsisten sehingga dapat digunakan untuk perhitungan selanjutnya. Pada Gambar 2 disajikan contoh grafik kurva massa ganda di Stasiun Bolorejo dan Stasiun Kalidawir.



Gambar 2. Grafik kurva massa ganda Stasiun Bolorejo dan Stasiun Kalidawir

Uji Stationer (Uji F dan Uji T)

Dari hasil Uji F dan Uji T pada 16 stasiun hujan di DAS Ngrowo menggunakan derajat kepercayaan 5% pada pengujian dua arah hipotesa nol seluruhnya diterima (Tabel 3 dan 4). Sehingga dapat disimpulkan seluruh data hujan pada stasiun yang berada di DAS Ngrowo merupakan data yang stabil terhadap nilai rata-rata dan variannya atau dapat dikatakan deret berkala pada semua stasiun adalah stasioner dan homogen.

Tabel 3. Rekapitulasi hasil uji F di DAS Ngrowo

No.	Stasiun Hujan	Nilai F tabel		Nilai F hitung		Nilai F tabel	Kesimpulan
1	Bolorejo	-1,49	<	0,980	<	1,49	Diterima
2	Bandung	-1,49	<	0,889	<	1,49	Diterima
3	Bendo	-1,49	<	1,451	<	1,49	Diterima
4	Bendungan	-1,49	<	1,132	<	1,49	Diterima
5	Bagong	-1,49	<	0,891	<	1,49	Diterima
6	Boyolangu	-1,49	<	0,782	<	1,49	Diterima
7	K.D.PU.Air	-1,49	<	0,895	<	1,49	Diterima
8	Kalidawir	-1,49	<	1,075	<	1,49	Diterima
9	Kampak	-1,49	<	0,811	<	1,49	Diterima
10	Pagerwajo	-1,49	<	0,747	<	1,49	Diterima
11	Paingan	-1,49	<	1,113	<	1,49	Diterima
12	Prambon	-1,49	<	1,224	<	1,49	Diterima
13	Pule	-1,49	<	0,874	<	1,49	Diterima
14	Sendang	-1,49	<	1,011	<	1,49	Diterima
15	Song Jambu-II	-1,49	<	1,123	<	1,49	Diterima
16	Widoro	-1,49	<	0,835	<	1,49	Diterima

Tabel 4. Rekapitulasi hasil uji T di DAS Ngrowo

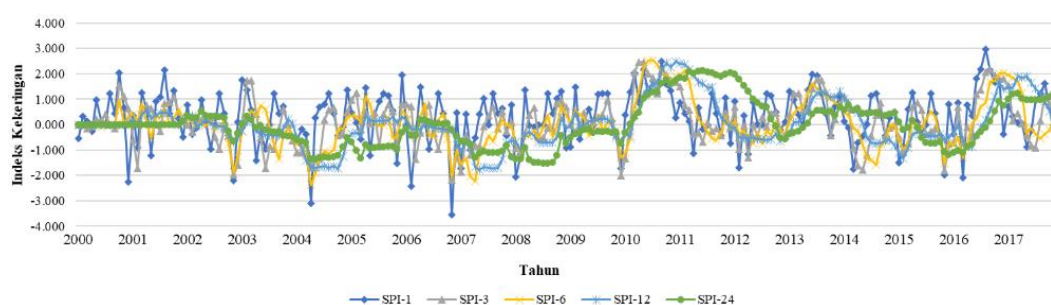
No.	Stasiun Hujan	Nilai t tabel		Nilai t hitung		Nilai t tabel	Kesimpulan
1	Bolorejo	-1,97	<	0,13	<	1,97	Diterima
2	Bandung	-1,97	<	0,18	<	1,97	Diterima
3	Bendo	-1,97	<	0,03	<	1,97	Diterima
4	Bendungan	-1,97	<	0,13	<	1,97	Diterima
5	Bagong	-1,97	<	0,12	<	1,97	Diterima
6	Boyolangu	-1,97	<	0,12	<	1,97	Diterima
7	K.D.PU.Air	-1,97	<	0,12	<	1,97	Diterima
8	Kalidawir	-1,97	<	0,13	<	1,97	Diterima
9	Kampak	-1,97	<	0,10	<	1,97	Diterima
10	Pagerwajo	-1,97	<	0,14	<	1,97	Diterima
11	Paingan	-1,97	<	0,08	<	1,97	Diterima
12	Prambon	-1,97	<	0,03	<	1,97	Diterima
13	Pule	-1,97	<	0,12	<	1,97	Diterima
14	Sendang	-1,97	<	0,09	<	1,97	Diterima
15	Song Jambu-II	-1,97	<	0,12	<	1,97	Diterima
16	Widoro	-1,97	<	0,13	<	1,97	Diterima

Nilai Indeks Kekeringan Metode (SPI)

Bedasarkan hasil analisis metode *SPI*, memberikan hasil perbandingan indeks kekeringan berbagai periode defisit seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi *SPI* 1, 3, 6, 12, 24 bulanan

Periode Defisit	Jumlah Kejadian							Nilai Indeks
	ASB	SB	CB	MN	CK	SK	ASK	Minimum
SPI 1	8	10	41	137	6	7	7	-3,553
SPI 3	7	14	12	158	12	10	1	-2,178
SPI 6	8	11	8	160	15	5	4	-2,372
SPI 12	7	10	18	150	7	13	0	-1,793
SPI 24	8	11	13	130	27	4	0	-1,535

Gambar 3. Grafik perbandingan metode *SPI* periode defisit 1, 3, 6, 12, 24 bulanan di Stasiun Hujan Bolorejo

Semakin besarnya periode defisit maka grafik menunjukkan alur garis yang lebih halus, hal ini memungkinkan terjadi karena metode *SPI* perhitungan periode defisit dilakukan dengan akumulasi hujan bulanan seiring bertambahnya periode dapat dilihat pada Gambar 3. Selain itu, kondisi pada periode yang lebih besar cenderung lebih stabil, baik kondisi basah maupun kering, tidak menunjukkan nilai dengan

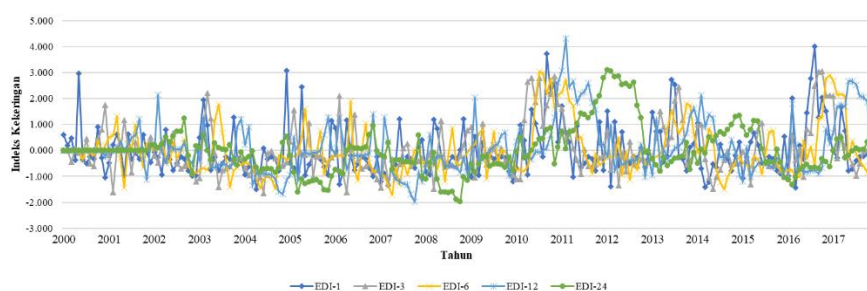
intensitas kondisi yang ekstrim. Salah satu faktor dari perbedaan variasi periode defisit tersebut adalah semakin besar jumlah periode, nilai hujan yang terjadi akan semakin stabil karena fluktuasi perbedaan akumulasi periode defisit akan memberikan dampak pada hasil indeks kekeringan.

Nilai Indeks Kekeringan Metode (*EDI*)

Berdasarkan hasil analisis metode *EDI*, memberikan hasil perbandingan indeks kekeringan berbagai periode defisit seperti pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi *EDI* 1, 3, 6, 12, 24 bulanan

Periode Defisit	Jumlah Kejadian							Nilai Indeks Minimum
	ASB	SB	CB	MN	CK	SK	ASK	
SPI 1	12	6	13	172	12	1	0	-1,507
SPI 3	14	8	10	158	21	3	0	-1,658
SPI 6	14	9	6	162	19	1	0	-1,719
SPI 12	16	9	13	149	14	4	0	-1,986
SPI 24	10	2	12	144	16	9	0	-1,984

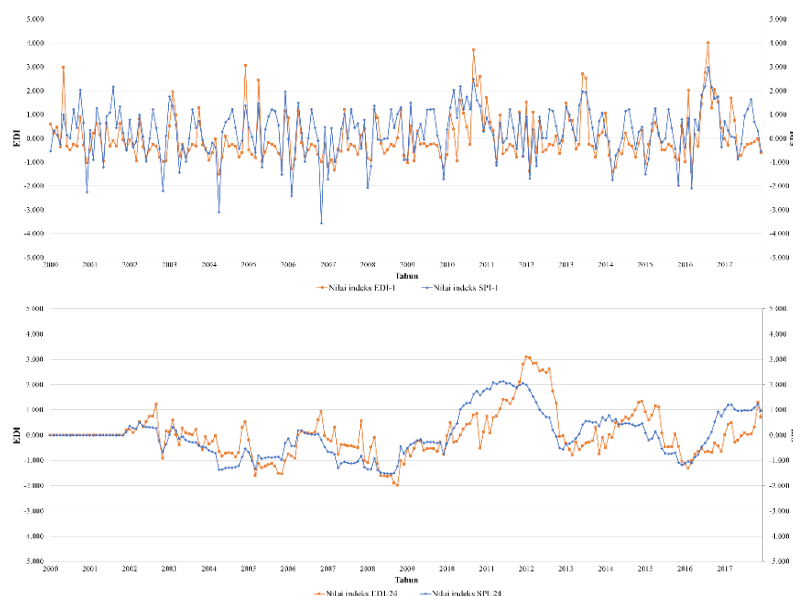


Gambar 4. Grafik perbandingan metode *EDI* periode defisit 1, 3, 6, 12, 24 bulanan di Stasiun Hujan Bolorejo

Pada metode *EDI* perbedaan dari masing-masing periode defisit tidak terlalu signifikan, berdasarkan Gambar 4 dapat dilihat metode *EDI* lebih mampu memberikan nyata perbedaan surplus dan defisit indeks pada berbagai periode, hal ini memungkinkan terjadi karena dalam metode *EDI* perhitungan periode defisit tidak hanya dihitung berdasarkan akumulasi curah hujan saja, tetapi dilakukan dengan menghitung hujan efektif yang mana nilai hujan tertimbang akibat sisa pengaruh hujan pada waktu saat ini dan sebelumnya, selain itu indeks *EDI* tidak menunjukkan nilai dengan intensitas kondisi kekeringan yang ekstrim, artinya nilai kekeringan tidak ada yang jauh melampaui kelas klasifikasi intensitas kekeringan yang ada.

Perbandingan Metode *Standardized Precipitation Index (SPI)* dan *Effective Drought Index (EDI)*

Untuk membandingkan pola kekeringan yang terjadi antara *SPI* dan *EDI* digambarkan grafik yang menunjukkan surplus dan defisit indeks kekeringan dengan periode yang sama seperti pada Gambar 5.



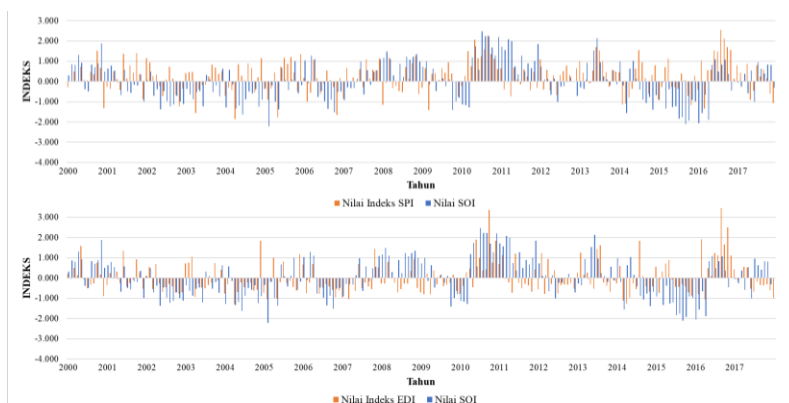
Gambar 5. Grafik perbandingan indeks kekeringan metode *SPI* dan *EDI* periode defisit 1 dan 24 bulanan

Dengan menggunakan langkah perhitungan yang berbeda, kedua metode menghasilkan prediksi kekeringan dengan pola yang cenderung sama. Pada pola yang dihasilkan oleh metode *EDI* dapat terlihat perubahan naik turunnya indeks yang terjadi meskipun dalam waktu yang singkat dari kondisi basah ke kering dan sebaliknya. Berbeda dengan metode *SPI* yang sulit dilihat dalam waktu yang singkat, hal ini memungkinkan terjadi karena dalam metode *EDI* tidak hanya memperhitungkan hujan yang terjadi saat ini melainkan juga memperhitungkan hujan tertimbang dari periode sebelumnya.

Non-transformasi pada perhitungan indeks kekeringan metode *EDI* mengakibatkan curah hujan dipertahankan kemiringannya terhadap seri datanya, akibatnya positif curah hujan yang miring menghasilkan kisaran yang lebih besar *EDI* positif daripada *EDI* negatif. Mengingat nilai *EDI* yang negatif lebih penting untuk mewakili curah hujan yang diperlukan untuk kembali normal dari kondisi kekeringan, hal ini dapat dijadikan keuntungan dari metode *EDI* dibandingkan dengan *SPI* untuk keakuratan deteksi kekeringan. Kelebihan lain yang membuat nilai indeks *EDI* memiliki hasil yang lebih akurat, metode ini tidak memerlukan parameter distribusi atau asumsi lainnya terkait data hujan.

Perbandingan Metode *Standardized Precipitation Index (SPI)* dan *Effective Drought Index (EDI)* dengan Data *SOI* (Indeks Osilasi Selatan)

Perbandingan ini dilakukan untuk mengetahui apakah kekeringan yang terjadi di DAS Ngrowo dipengaruhi oleh faktor peristiwa *ENSO*. Perbandingan yang dilakukan adalah dengan membandingkan nilai surplus dan defisit dari masing-masing metode *SPI-1* dan *EDI-1* bulanan rerata 16 stasiun hujan di DAS Ngrowo dengan data *ENSO* berupa indeks osilasi selatan (*SOI*) yang terdistribusi normal.

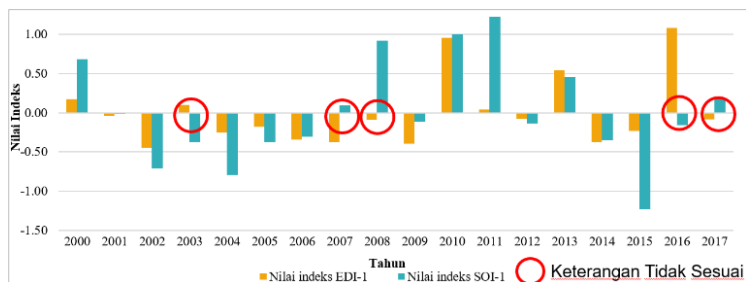


Gambar 6. Grafik perbandingan indeks kekeringan metode *SPI-1* (atas) dan *EDI-1* (bawah) bulanan rerata 16 stasiun hujan di DAS Ngrowo dengan *SOI-1* bulanan

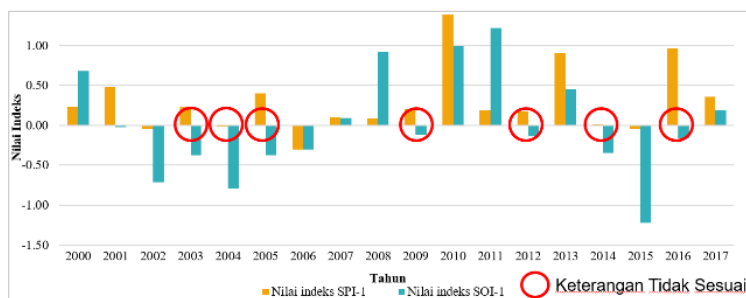
Berdasarkan Gambar 6 dapat dilihat bahwa metode *EDI* menghasilkan grafik surplus dan defisit yang lebih mirip secara visual terhadap nilai indeks osilasi selatan dibanding metode *SPI*. Ketika surplus pada metode *EDI*, maka terjadi surplus pada *SOI*, dan sebaliknya. Hal tersebut menunjukkan *EDI* secara visual adalah lebih baik dalam pembacaan kejadian kekeringan akibat fenomena *EL Nino*.

Nilai Persen Kesesuaian Metode *Standardized Precipitation Index (SPI)* dan *Effective Drought Index (EDI)* dengan Data *SOI* (Indeks Osilasi Selatan)

Untuk mengetahui secara kuantitatif metode mana yang memiliki hubungan paling besar terhadap fenomena *ENSO (El Nino Southern Oscillation)* dalam membaca kejadian kekeringan di DAS Ngrowo, digunakan perhitungan analisis persen kesesuaian dari nilai indeks osilasi selatan (*SOI*) dengan nilai indeks metode *SPI* dan *EDI* seperti pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Grafik surplus dan defisit indeks kekeringan rerata tahunan *EDI-1* Bolorejo dengan *SOI-1* rerata tahunan



Gambar 8. Grafik surplus dan defisit indeks kekeringan rerata tahunan *SPI-1* Bolorejo dengan *SOI-1* rerata tahunan

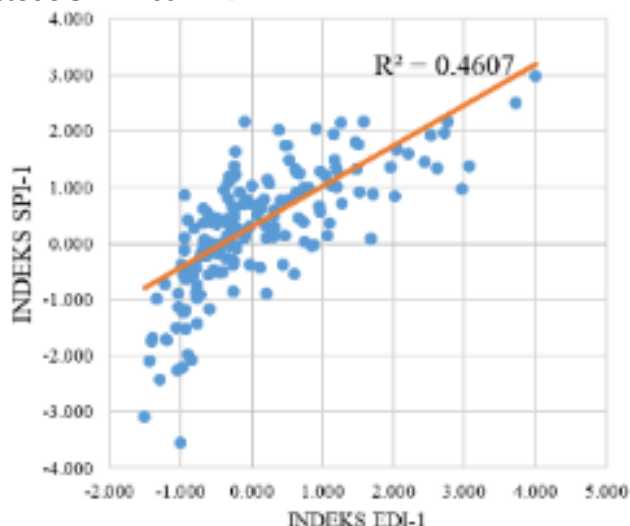
Tabel 7. Hasil persen kesesuaian metode *SPI* dan *EDI* terhadap Indeks Osilasi Selatan

Stasiun Bolorejo	Sesuai	Persen Kesesuaian
<i>SPI</i> -1 Rerata Tahunan Dan <i>SOI</i> -1 Rerata Tahunan	11	61,11
<i>SPI</i> -1 Minimum Tahunan Dan <i>SOI</i> -1 Rerata Tahunan	11	61,11
<i>SPI</i> -1 Minimum Tahunan Dan <i>SOI</i> -1 Minimum Tahunan	15	83,33
<i>EDI</i> -1 Rerata Tahunan Dan <i>SOI</i> -1 Rerata Tahunan	13	72,22
<i>EDI</i> -1 Minimum Tahunan Dan <i>SOI</i> -1 Rerata Tahunan	11	61,11
<i>EDI</i> -1 Minimum Tahunan Dan <i>SOI</i> -1 Minimum Tahunan	16	88,89

Secara kuantitatif dari 16 stasiun hujan di DAS Ngrowo metode *EDI* memiliki persen kesesuaian yang lebih besar terhadap nilai *SOI* dibandingkan dengan metode *SPI* (Tabel 7). Namun selisih perbedaan persen kesesuaian kedua metode tersebut terhadap *SOI* tidak terlalu jauh, artinya metode *EDI* lebih unggul dalam analisis persen kesesuaian grafik surplus dan defisitnya dibanding metode *SPI*.

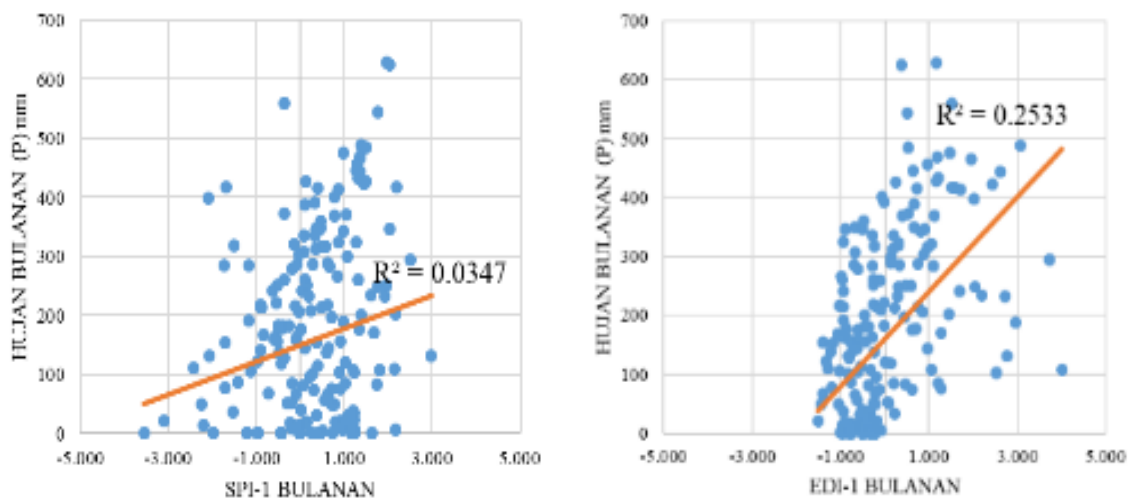
Analisis Korelasi dan Determinasi

1) Korelasi metode *SPI*-1 dan *EDI* -1

Gambar 9. Hubungan nilai indeks *SPI*-1 dan *EDI*-1 bulanan Bolorejo

Berdasarkan Gambar 9 di atas, grafik sebaran plot nilai indeks periode defisit 1 bulanan pada kedua metode diperoleh nilai R^2 (koefisien determinasi), untuk mengetahui seberapa besar hubungan dapat dilihat pada koefisien korelasi (R). Dari hasil 16 stasiun hujan di DAS Ngrowo metode *EDI* dan *SPI* memiliki hubungan dalam memberikan hasil indeks kekeringan, artinya dapat dikatakan metode *EDI* memberikan hasil indeks kekeringan yang memiliki hubungan dengan metode yang sudah banyak digunakan yaitu *SPI*, sehingga *EDI* dapat dijadikan pertimbangan untuk melakukan analisis kekeringan meteorologi karena metode pengerjaan yang cukup sederhana dan hasilnya dapat diterima dengan baik.

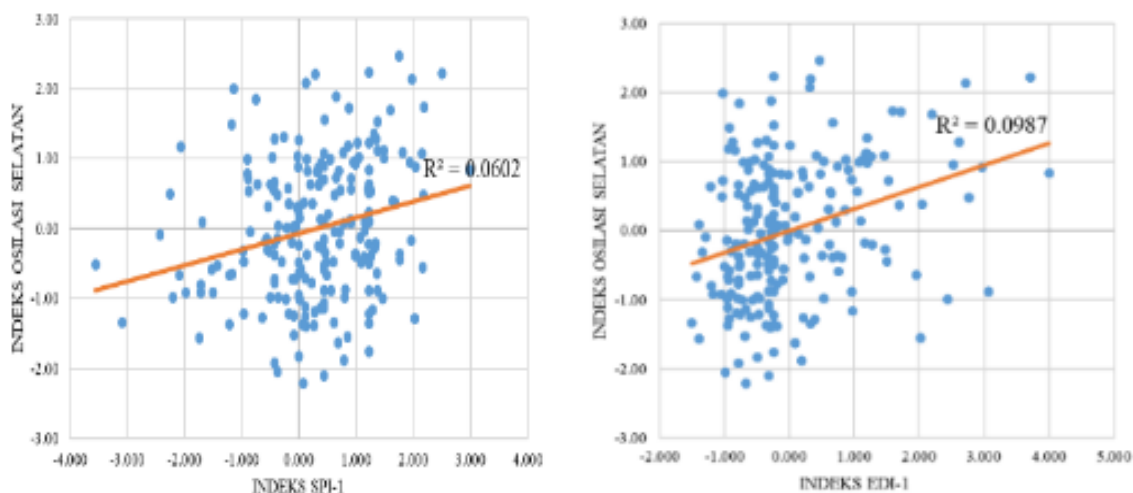
2) Korelasi dan determinasi metode *SPI*-1 dan *EDI* -1 dengan data hujan bulanan



Gambar 10. Hubungan nilai indeks SPI-1 dan EDI-1 bulanan dengan data hujan bulanan

Berdasarkan 16 stasiun hujan di DAS Ngrowo, *EDI* lebih baik dalam memberikan model kekeringan yang sesuai dengan kejadian hujan yang sesungguhnya dibanding metode *SPI*, terbukti secara kuantitatif dari hasil nilai koefisien korelasi dan determinasinya terhadap curah hujan bulanan yang lebih baik dibanding *SPI*. Hal ini mungkin terjadi dikarenakan *EDI* tidak melakukan proses transformasi dalam analisis kekeringannya, non-transformasi pada perhitungan indeks kekeringan metode *EDI* mengakibatkan curah hujan dipertahankan kemiringannya terhadap seri datanya, sehingga mampu memberikan hasil yang lebih akurat karena tidak menggunakan parameter distribusi atau asumsi lainnya tentang data hujan yang digunakan.

3) Korelasi dan determinasi metode *SPI-1* dan *EDI-1* dengan Indeks Osilasi Selatan



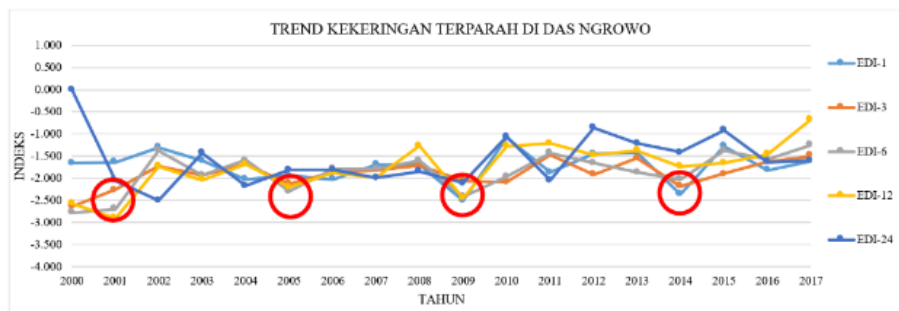
Gambar 11. Hubungan nilai indeks SPI-1 dan EDI-1 bulanan dengan data Indeks Osilasi Selatan

Berdasarkan 16 stasiun hujan di DAS Ngrowo, hasil pembacaan memberikan korelasi yang lebih baik pada metode *EDI* dibanding *SPI*. Artinya metode *EDI* lebih baik dalam menghasilkan indeks yang berkorelasi dengan fenomena *El Nino Southern Oscillation (ENSO)*.

Dari keseluruhan analisis metode *EDI* lebih baik dalam analisis kekeringan yang dihasilkan dikarenakan hubungan indeks kekeringan yang dihasilkan memiliki hubungan korelasi dan determinasi yang lebih baik terhadap indeks osilasi selatan yang mampu mengitrepetaskan fenomena *El Nino* dan *La Nina* yang memberikan hubungan terhadap perubahan nilai variabilitas curah hujan di Indonesia.

Kegunaan Indeks Kekeringan *EDI* untuk Masa yang Akan Datang

Hasil studi dengan metode *EDI* ini dapat digunakan untuk memprediksikan kekeringan di masa yang akan datang dengan cara melihat *trend* kekeringan terparah yang terjadi, berikut disajikan grafik trend kekeringan yang terjadi di DAS Ngrowo berdasarkan kekeringan minimum 16 stasiun hujan di DAS Ngrowo setiap periode defisit:



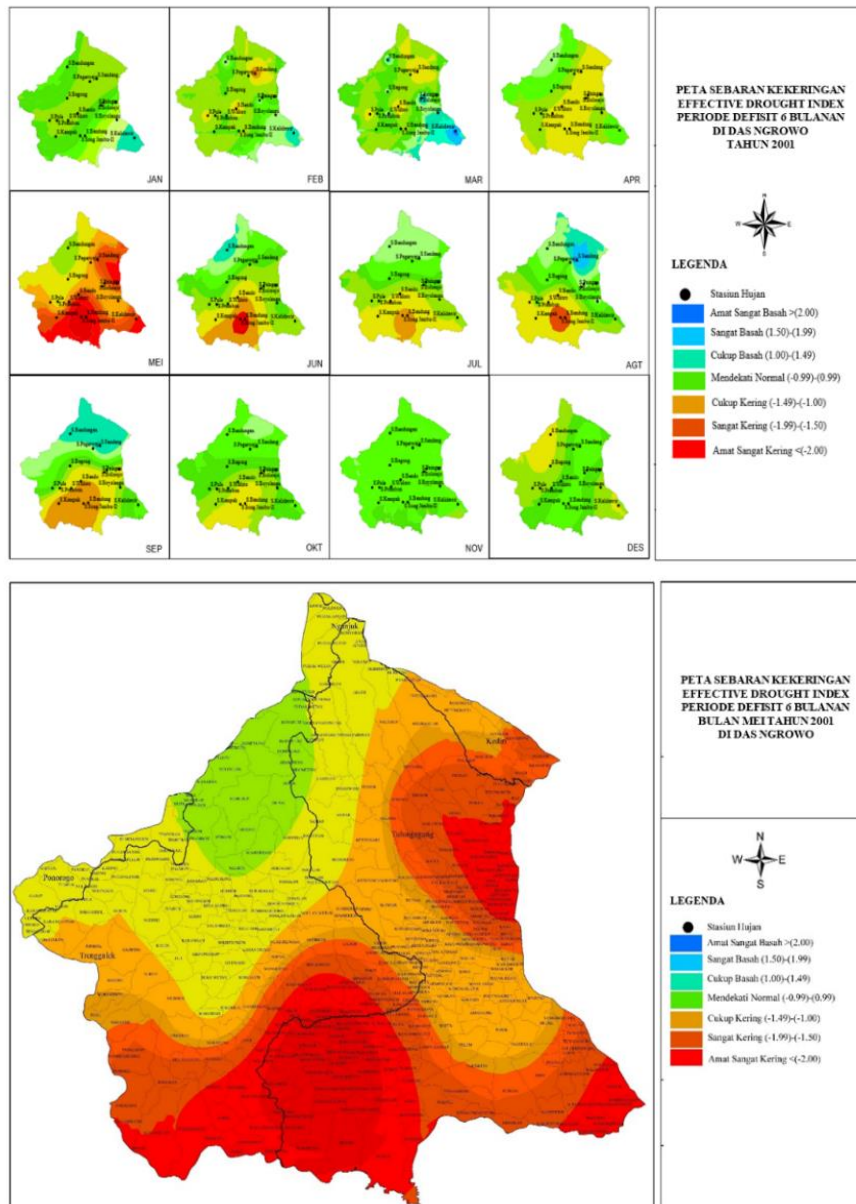
Gambar 12. Trend kekeringan terparah di DAS Ngrowo

Grafik trend di Gambar 12, kekeringan minimum tahunan yang terjadi di DAS Ngrowo di beberapa periode menunjukkan kekeringan dengan indeks di bawah -2 yang masuk dalam klasifikasi kekeringan “amat sangat kering”. Hal tersebut terjadi pada 4 dan 5 tahun sekali. Hal ini mungkin terjadi akibat perubahan iklim yang terjadi atau perubahan tata guna lahan yang tidak di perhitungan dalam analisis ini, sehingga dapat disimpulkan kemungkinan terjadinya kekeringan terparah di masa mendatang bisa terjadi 4 atau 5 tahun setelah tahun 2014. Namun dalam analisis ini keterbatasan data menjadi kekurangan dalam mendapatkan prediksi kekeringan di masa mendatang. Artinya ketelitian prediksi kekeringan masa mendatang dapat lebih baik apabila data yang digunakan dalam analisis memiliki kurun waktu yang lebih panjang hingga kondisi terbaru. Selanjutnya tahun-tahun kekeringan terparah akan digambarkan dalam peta sebaran kekeringan pada pembahasan selanjutnya.

Peta Sebaran Kekeringan

Penggambaran peta sebaran kekeringan dari hasil indeks kekeringan meteorologi metode (*Effective Drought Index*) *EDI* menggunakan program berbasis spasial dengan metode interpolasi *Kriging*. Untuk dapat mengetahui wilayah administrasi yang terdampak kekeringan dengan intensitas “amat sangat kering” perlu dilakukan *overlay* hasil interpolasi *kriging* hasil interpolasi *kriging* peta sebaran kekeringan

dan data wilayah administrasi di Kawasan DAS Ngrowo. Gambar 13 merupakan peta sebaran kekeringan untuk *EDI-6* bulanan tahun 2001 di DAS Ngrowo serta *overlay* dengan wilayah administrasi untuk mengetahui desa terdampak kekeringan di DAS Ngrowo.



Gambar 13. Peta sebaran kekeringan *EDI-6* di DAS Ngrowo tahun 2001 dan wilayah administrasi yang terdampak kekeringan

Dari hasil penggambaran peta sebaran kekeringan metode *EDI-6* tahun 2001 di DAS Ngrowo dapat dilihat perbedaan kondisi kering dan basah berdasarkan klasifikasi warna pada peta. Kekeringan terparah terjadi pada bulan Mei tepatnya pada musim kemarau dengan tingkat kekeringan “Amat Sangat Kering” yang berada di wilayah Kabupaten Tulungagung dan sebagian Kabupaten Trenggalek. Desa-desanya yang sering terjadi bencana kekeringan sesuai dengan hasil analisis

kekeringan meteorologi metode *EDI* dan hasil interpolasi kriging sebaran kekeringannya, nama desa-desa tersebut diantaranya sebagai berikut, di Kabupaten Tulungagung meliputi Desa Pakisrejo, Desa Kresikan, Desa Tenggarejo, Desa Besuki, Desa Sedayu Gunung, Desa Keboireng, Desa Tulungrejo, Desa Kalibatur, Desa Rejosari, Desa Banyu Urip, Desa Winong, Desa Kali Genthong, dan Desa Sukorejo. Sedangkan di Kabupaten Trenggalek meliputi Desa Besuki, Desa Karangrejo, Desa Pakel dan Desa Watulimo

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Dari analisis yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode *SPI* menghasilkan indeks kekeringan terparah di Stasiun Hujan Kalidawir pada tahun 2000 dengan periode defisit 3 bulanan sebesar (-5,14). Metode *EDI* menghasilkan indeks kekeringan terparah di Stasiun Hujan Song Jambu-II pada tahun 2001 dengan periode defisit 12 bulanan sebesar (-2,91).
2. Perbandingan pola periode defisit metode *SPI* cenderung lebih rendah dalam kondisi negatif (kering) sedangkan *EDI* cenderung lebih tinggi dalam kondisi positif (basah). Metode *EDI* secara visual menunjukkan grafik perubahan naik turunnya indeks dengan jelas pada berbagai periode baik basah maupun kering pada fenomena *ENSO (El-Nino Southern Oscillation)* dibandingkan metode *SPI*.
3. Peta sebaran kekeringan dengan metode *EDI* kejadian kekeringan terparah dengan tingkat “amat sangat kering” terjadi pada tahun 2001, 2005, 2009, dan 2014 menggunakan interpolasi *kriging*.
4. Peta sebaran kekeringan yang di-*overlay* dengan wilayah administrasi menunjukkan kesesuaian dengan peta bencana kekeringan dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Tulungagung dan Trenggalek.

Saran

Untuk mendapatkan hasil analisis yang lebih akurat diperlukan data hujan yang panjang dan lengkap, serta metode analisis kekeringan meteorologi lain sebagai pembandingan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada BBWS Brantas, Dinas Pengairan dan *Berau of Meteorology Australian Government* yang telah berkontribusi dalam pelaksanaan terkait penyediaan data sehingga dapat menunjang analisis dan penyelesaian penulisan studi ini.

Daftar Referensi

- Brumbelow, K, and Georgakakas, 2005. Consideration of Climate Variability and Change in Agricultural Water Resources Planning, *J. Water Resources Planning and Management*, W.R/2005/022915.
- Byun, H.R. and Kim, D.W., 2010. *Comparing the effective drought index and the standardized precipitation index*. South Korea.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J., 1993. *The relationship of drought frequency and duration to time scales*, (January), 17–22.
- Morid, Saeid, 2015. *Comparison of Seven Meteorological Indices for Drought Monitoring in Iran*. Tarbiat Modarres University, College of Agriculture, Tehran, Iran
- Murdiyarso, 2015. The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 5(12), 1089–1092. <https://doi.org/10.1038/nclimate2734>
- Rafiuddin M Dash B, Khanam F, 2011. Diagnosis of drought in Bangladesh using the Standardized Precipitation Index. *2011 International Conference on Environment Science and Engineering, IPCBEE vol 8, IACSIT Press*, Singapore.
- Yuan, S., Quiring, S. M., dan Patil, S., 2016. Spatial and Temporal Variations in the Accuracy of Meteorological Drought Maps. *Cuadernos de Investigacion Geografica*. Volume 42 (1). 167-183. <https://doi.org/10.18172/cig.2916>

PENILAIAN DEBIT LINGKUNGAN BERBASIS PENDEKATAN HIDROLOGI PADA DAS CITARUM HULU

Ika Sari Damayanthi Sebayang*, Indratmo Soekarno,
M. Cahyono, Arno Adi Kuntoro

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

*ika.sebayang@gmail.com

Pemasukan: 1 Nopember 2022 Perbaikan: 19 Mei 2023 Diterima: 19 Mei 2023

Intisari

Di Indonesia, kawasan Sungai Citarum mengalami tantangan lingkungan yang cukup signifikan, antara lain meluapnya Sungai Citarum dan daerah aliran sungainya yang menyebabkan banjir, dan kekurangan air pada musim kemarau. Namun, tantangan utama adalah ketersediaan air di Citarum, karena debit yang mempengaruhi keseimbangan ekologi Daerah Aliran Sungai (DAS). Penelitian ini mengkaji beberapa metode penilaian debit lingkungan dengan pendekatan berbasis hidrologi diantaranya Tennant, *Range of Variability Approach* (RVA). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya aliran lingkungan (EF) yang diperlukan untuk menopang fungsi sungai dalam mendukung keseimbangan ekologi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode penilaian aliran lingkungan berbasis hidrologi merupakan langkah pertama yang diperlukan dalam perencanaan alokasi debit untuk perlindungan lingkungan. Ditunjukkan bahwa penggunaan fitur-fitur pelengkap dari teknik penilaian aliran lingkungan yang ada dapat digunakan untuk mencapai perkiraan aliran lingkungan yang dapat dibenarkan, bahkan dalam kondisi keterbatasan informasi terkait hubungan ekologi-hidrologi spesifik pada DAS Citarum. Penelitian ini bermaksud untuk mempromosikan perlunya perencanaan alokasi debit lingkungan dalam pengembangan DAS dan dapat dirumuskan ke dalam kebijakan nasional yang relevan. Kajian EF dilakukan dengan membandingkan 7Q10 dan Q95 dari kedua data pengamatan debit Nanjung dan pemodelan curah hujan-limpasan. Hasilnya ditemukan bahwa metode Weibull minima, hasil 7Q10 untuk pemodelan Sacramento, adalah 2,18 m³/s sedangkan AWLR Nanjung adalah 1,24 m³/s. Selain itu, nilai Q95 untuk Nanjung AWLR adalah 6,55 m³/s sedangkan hasil pemodelan curah hujan limpasan Sacramento adalah 7,06 m³/s. Besaran debit yang tersedia perlu dipastikan dapat mendukung kondisi ekologi di wilayah DAS Citarum Hulu. Hal ini relevan karena perbedaan tersebut tentunya mempengaruhi keseimbangan ekologi dan pengelolaan Sungai Citarum.

Kata Kunci: debit lingkungan, Citarum, FDC, Sacramento, RVA, sungai

Latar Belakang

Sungai Citarum dan DASnya memiliki permasalahan yang kritis dan kompleks. Kompleksitas permasalahan tersebut membuat Sungai Citarum perlu mendapat

perhatian khusus, sehingga pemerintah mengeluarkan Perpres no. 15 Tahun 2018 tentang Percepatan Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Daerah Aliran Sungai Citarum. Salah satu bentuk pengendalian DAS adalah dengan memenuhi debit pemeliharaan. Kajian debit lingkungan di Indonesia belum banyak diterapkan, terutama dalam menentukan besarnya debit pemeliharaan sungai. Di Indonesia masih terdapat anggapan bahwa penentuan debit pemeliharaan sungai ditentukan pada skala statistik probabilistik dengan menetapkan debit sebesar 95% atau dikenal dengan Q95. Kondisi sungai di Indonesia bervariasi, ada jenis sungai yang tersedia debit sepanjang tahun (Perennial) dan ada jenis sungai yang debitnya dapat kering sewaktu-waktu (Ephemeral). Selain itu, di Indonesia juga terdapat sungai yang memiliki waduk dan yang tidak memiliki waduk. Debit pemeliharaan juga dapat berbeda untuk lokasi sungai hulu, tengah dan hilir. Hal ini perlu dikaji lebih lanjut untuk memastikan ketersediaan debit pemeliharaan mampu mendukung keseimbangan pemeliharaan jasa lingkungan.

Pembahasan mengenai debit pemeliharaan, harus dilihat dari definisi debit pemeliharaan itu sendiri. Debit pemeliharaan berhubungan dengan aliran rendah (*low flow*). Berdasarkan *International glossary of hydrology* (WMO, 1974) definisi aliran rendah adalah 'aliran air selama musim kemarau yang berkepanjangan'. Debit pemeliharaan merupakan parameter penting mengingat perannya bagi kelestarian sungai itu sendiri. Dalam menilai keandalan debit di Sungai Citarum, Sub DAS Citarum Hulu perlu mempertimbangkan beberapa aspek, antara lain vegetasi riparian, hewan air, banjir di sungai (*floodplains*) dan aspek jasa ekosistem (misalnya: penyediaan air minum/air bersih).

Masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah penentuan debit pemeliharaan di Sungai Citarum di DAS Citarum Hulu, yang dapat mendukung ekologi dan keberlanjutan sungai dalam beberapa aspek. Permasalahan selanjutnya adalah bagaimana membuat alternatif pengendalian yang dapat menjamin keberlangsungan aspek-aspek tersebut dalam jangka waktu yang lama.

Penelitian-penelitian sebelumnya membahas berbagai masalah termasuk deskripsi teknik yang ada dari analisis aliran rendah dari perekaman aliran (analisis durasi aliran, analisis frekuensi aliran rendah, analisis resesi aliran, dan analisis penyimpanan). McMahon dan Arenas (1982) mempresentasikan kumpulan metode yang digunakan di berbagai negara untuk menghitung karakteristik debit rendah, menggambarkan beberapa metode ini dengan studi kasus dan membahas beberapa aspek teoritis dari faktor alam dan faktor ulah manusia yang mempengaruhi aliran rendah. Aspek spesifik dari analisis aliran rendah, manajemen dan topik terkait (seringkali termasuk tinjauan literatur yang komprehensif) diselidiki oleh Searcy (1959), Hall (1968), Riggs (1976), Vasak (1977), Kurdov (1977), McMahon dan Mein (1986), Gustard (1989), Ponce dan Lindquist (1990), Amusja et al., (1991), Heicher (1993), Demuth (1994), Tallaksen (1995) dan Vogel dan Fennessey (1995). Perhitungan debit rendah menggunakan berbagai metode pemodelan curah hujan-limpasan juga diteliti oleh Beven (2001).

Smakhtin (2001) menulis ulasan untuk melihat subjek hidrologi debit rendah secara sistematis termasuk interaksi yang timbul dari hidrologi aliran rendah dengan

bidang terkait air lainnya (misalnya pengelolaan sungai). Debit aliran rendah berkaitan dengan keberlanjutan sumber daya air, terutama dalam hal peningkatan kebutuhan air (Wijayanti, 2020). Beberapa metode telah banyak digunakan untuk menentukan dan juga menguji besarnya debit rendah yang nantinya dapat diuji sebagai debit pemeliharaan sungai.

Air yang dialokasikan untuk memelihara habitat perairan dan proses ekologis dalam keadaan yang diinginkan disebut sebagai “*instream flow requirement (IFR)*”, “*environmental flow (EF)*”, “*environmental flow requirement (EFR)*”, or “*environmental water demand (EWD)*” Karimi, Yasi dan Eslamian (2012). Dalam penelitian ini digunakan untuk mendefinisikan debit pemeliharaan. Proses untuk menentukan aliran ini disebut sebagai *environmental flow assessment (EFA)* (Davis dan Hirji 2003; Dyson dkk. 2003; Lankford 2002; Smakhtin dkk. 2006).

Penilaian debit lingkungan sangat bergantung pada fitur-fitur apa yang perlu dilindungi. Adapun penjelasan fitur-fitur yang dilindungi secara garis besar dapat terlihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1 Penjelasan fitur-fitur

Fitur	Penjelasan Nilai	Contoh alasan debit lingkungan diperlukan
Hewan akuatik sebagai pemijahan atau bertelur.	Ikan air tawar adalah sumber yang sangat berharga, protein untuk masyarakat pedesaan. Fauna bernilai lainnya termasuk: ikan pemancing, burung air langka, atau kehidupan air kecil yang membentuk dasar rantai makanan.	• Aliran untuk mempertahankan habitat fisik; • Aliran untuk menjaga kualitas air yang sesuai; • Aliran untuk memungkinkan perjalanan ikan bermigrasi; • banjir kecil untuk memicu isyarat siklus hidup seperti pemijahan atau bertelur.
Vegetasi riparian	Menstabilkan tepian sungai, menyediakan makanan dan kayu bakar untuk masyarakat pedesaan dan habitat hewan, dan melindungi sungai terhadap hilangnya nutrisi dan sedimen dari aktivitas manusia di daerah tangkapan air.	• aliran yang menjaga tingkat kelembaban tanah di tepian • aliran tinggi untuk menyimpan nutrisi di tampungan (<i>bank</i>) dan mendistribusikan benih.
Pasir Sungai	Digunakan untuk bangunan.	• Aliran untuk mengangkut pasir dan memisahkannya dari partikel yang lebih halus.
Muara	Menyediakan area pembibitan untuk ikan laut.	• aliran yang menjaga keseimbangan garam / air tawar dan koneksi laut ke muara.
Akuifer dan air tanah	Mempertahankan sifat sungai perennial yang bertindak sebagai sumber air selama musim kemarau.	• Aliran untuk mengisi ulang akuifer.
Dataran banjir	Mendukung perikanan dan pertanian saat terjadi resesi akibat banjir untuk masyarakat pedesaan.	• banjir yang menggenangi dataran banjir pada waktu yang tepat tahun tertentu.

Fitur	Penjelasan Nilai	Contoh alasan debit lingkungan diperlukan
Estetika	Suara air mengalir di bebatuan, bau dan pemandangan sungai dengan pepohonan, burung, dan ikan.	• aliran yang cukup untuk memaksimalkan fitur estetika alami, termasuk banyak aliran yang disebutkan di atas.
Fitur rekreasi dan budaya	Air bersih dan jeram untuk arung jeram sungai atau kolam yang bersih untuk upacara pembaptisan atau mandi. Juga fitur yang dihargai oleh pemancing, pengamat burung dan fotografer.	• Aliran yang mengguyur sedimen dan ganggang, dan yang menjaga kualitas air - lihat juga hewan air.
Layanan ekosistem	Mempertahankan kapasitas ekosistem perairan untuk mengatur proses ekologis penting, misalnya untuk memurnikan air, menipiskan banjir, atau mengendalikan hama.	• aliran yang menjaga fungsi keanekaragaman hayati dan ekosistem.
Perlindungan lingkungan secara keseluruhan	Keinginan untuk meminimalkan dampak manusia dan melestarikan sistem alam untuk generasi mendatang.	• beberapa atau semua jenis aliran di atas.

Sumber: Terjemahan dari World Bank (King and Brown, 2003)

Metodologi Studi

Indeks Debit Rendah

Penentuan debit lingkungan dengan menggunakan pendekatan hidrologi menggunakan metode indeks debit rendah telah digunakan secara luas di beberapa negara (Smakhtin, 2001; Granemann, 2018). USGS sering menggunakan statistik aliran 7Q10 untuk membantu memandu keputusan dalam pekerjaan sehari-hari mereka dalam pengaturan Total Beban Harian Maksimum, pasokan air dan pengelolaan, izin pembuangan air limbah, dan perlindungan habitat perairan yang terancam punah. 7Q10 adalah debit aliran terendah dalam 7 hari yang terjadi setiap 10 tahun (Nnaji, 2014). Untuk nalisa neraca air, dalam penelitian ini dilakukan beberapa metode, antara lain HBV, Sacramento, dan NRECA.

Distribusi Gumbel untuk Minima

Perhitungan debit rendah dengan distribusi Gumbel_{min} telah digunakan, meskipun tidak sering, sebagai distribusi ekstrim untuk pemodelan minimum tahunan variabel terkait kekeringan, seperti Q7, dimana debit rata-rata terendah 7 hari berturut-turut pada tahun tertentu digunakan sebagai input perhitungan (Naghetini, 2017). Fungsi distribusi kumulatif untuk Gumbel_{min} adalah:

$$Fz(z) = 1 - \exp \left[-\exp \left(\frac{z-\beta}{\alpha} \right) \right] \text{ for } -\infty < z < \infty, -\infty < \beta < \infty, \alpha > 0 \quad (1)$$

di mana α mewakili parameter skala dan β parameter lokasi. Sama seperti fungsi Gumbel_{max}, sebenarnya β adalah modus dari Z. Fungsi kepadatan probabilitas (*probability density function*) dari distribusi Gumbel_{min} diberikan oleh:

$$Fz(z) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[\frac{z-\beta}{\alpha} - \exp \left(\frac{z-\beta}{\alpha} \right) \right] \quad (2)$$

Nilai rata-rata, varians, dan koefisien skewness dari varian Gumbel_{min} masing-masing dinyatakan sebagai:

$$E(Z) = \beta - 0.5772\alpha \quad (3)$$

$$Var[Z] = \sigma_z^2 = \frac{\pi^2 \alpha^2}{6} \quad (4)$$

$$\gamma = -1.1396 \quad (5)$$

Perlu dijadikan catatan bahwa distribusi Gumbel_{min} miring ke kiri dengan koefisien tetap $\gamma = -1,1396$. Fungsi kepadatan probabilitas Gumbel_{min} dan Gumbel_{max}, keduanya dengan parameter yang identik, adalah simetris terhadap garis vertikal yang melintasi sumbu absis pada mode umum (Naghetini, 2017). Fungsi kuantil Gumbel_{min} ditulis sebagai:

$$Z(F) = \beta + \alpha \ln[-\ln(1 - F)] \text{ or } \gamma(T) = \beta + \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (6)$$

di mana T menunjukkan periode ulang (*return period*), dalam tahun, dan F mewakili probabilitas non-kelebihan tahunan (Naghetini, 2017). Untuk minimum tahunan, periode ulang adalah kebalikan dari F atau $T=1/P (Z \leq z) = 1/(F z(z))$. Perlu dicatat bahwa, perhitungan kuantil Gumbel_{min} mungkin dapat menghasilkan angka negatif tergantung pada nilai numerik dari parameter distribusi dan pada periode ulang target. Ini adalah salah satu kelemahan utama dari distribusi Gumbel_{min}, yang telah membatasi penggunaan sebagai model untuk analisis frekuensi aliran rendah (Naghetini, 2017).

Distribusi Weibull untuk Minima

Distribusi Extreme-Value type III (EV3) untuk minima juga dikenal sebagai Weibull_{min}. Karena aliran rendah pasti dibatasi oleh nol dalam kasus yang paling parah, distribusi Weibull_{min} adalah kandidat alami untuk model hidrologi minima (Naghetini, 2017; Granemann, 2018; Nnaji, 2014). Jika aliran rendah dibatasi oleh nol, distribusi EV3 disebut sebagai Weibull_{min} dua parameter. Di sisi lain, jika aliran rendah dibatasi oleh beberapa nilai ξ , distribusi EV3 disebut sebagai Weibull_{min} tiga parameter (Naghetini, 2017). Fungsi distribusi kumulatif untuk Weibull_{min} dua parameter diberikan oleh:

$$Fz(Z) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{z}{\beta} \right)^\alpha \right] \text{ para } z \geq 0, \beta \geq 0 \text{ e } \alpha > 0 \quad (7)$$

di mana β dan α masing-masing adalah parameter skala dan bentuk. Jika 1, Weibull_{min} menjadi distribusi eksponensial satu parameter dengan parameter skala β . Fungsi kepadatan probabilitas dari distribusi Weibull_{min} dua parameter dinyatakan sebagai Variabel Acak Kontinu: Distribusi Probabilitas (Naghetini, 2017).

$$F_Z(z) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{z}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp \left[-\left(\frac{z}{\beta}\right)^{\alpha} \right] \quad (8)$$

Rata-rata dan varians dari dua parameter Weibull_{min} variate, masing-masing diberikan oleh

$$E(Z) = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (9)$$

$$Var [Z] = \beta^2 \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right] \quad (10)$$

Koefisien variasi dan skewness dari variabel Weibull_{min} dua parameter berturut-turut adalah,

$$CV_Z = \frac{\sqrt{\Gamma(1+\frac{2}{\alpha}) - \Gamma^2(1+\frac{1}{\alpha})}}{\Gamma(1+\frac{1}{\alpha})} = \frac{\sqrt{B(\alpha) - A^2(\alpha)}}{A(\alpha)} \quad (11)$$

$$\text{dan } \gamma = \frac{\Gamma(1+\frac{3}{\alpha}) - 3\Gamma(1+\frac{2}{\alpha})\Gamma(1+\frac{1}{\alpha}) + 2\Gamma^3(1+\frac{1}{\alpha})}{\sqrt{[\Gamma(1+\frac{2}{\alpha}) - \Gamma^2(1+\frac{1}{\alpha})]^3}} \quad (12)$$

Perhitungan parameter dan probabilitas untuk distribusi Weibull_{min} dua parameter dilakukan dengan terlebih dahulu menyelesaikan Persamaan. (13) untuk α , baik melalui prosedur iterasi numerik, mirip dengan yang digunakan untuk menghitung parameter bentuk GEV, atau dengan tabulasi (atau regresi) nilai α yang mungkin dari dan fungsi bantu $A(\alpha) = \Gamma(1 + 1/\alpha)$ terhadap CVZ (Naghetini, 2017). Analisis ketergantungan α dan $A(\alpha)$ pada koefisien variasi CVZ mengarah pada hubungan korelatif berikut:

$$\alpha = 1.0079(CV)^{-1.084}, \text{ for } 0.08 \leq CV_Z \leq 2 \quad (13)$$

$$A(\alpha) = -0.0607(CV_Z)^3 + 0.5502(CV_Z)^2 - 0.4937(CV_Z) + 1.003, \text{ for } 0.08 \leq CV_Z \leq 2 \quad (14)$$

yang memberikan pendekatan yang baik untuk solusi numerik dari Persamaan. (14). Setelah α dan $A(\alpha)$ telah ditentukan, parameter dapat dihitung dari Persamaan. (15), atau

$$\beta = \frac{E(Z)}{A(\alpha)} \quad (15)$$

Dengan kedua parameter diketahui, kuantil Weibull_{min} dua parameter ditentukan oleh

$$z(F) = \beta [-\ln(1 - F)]^{\frac{1}{\alpha}} \text{ or } z(T) = \beta \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (16)$$

Analisis Kurva Debit Aliran/Flow Duration Curve Analysis (FDCA)

Metodologi berbasis hidrologi lainnya yang diterapkan di seluruh dunia dalam bentuk umumnya adalah metode FDCA (Smakhtin, 2001). Dalam penelitian ini FDCA juga digunakan untuk mempelajari distribusi probabilitas dari data yang direkam. Menggunakan FDCA, data diberi peringkat dan dihitung probabilitasnya yang sesuai dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P = \left(\frac{m}{n} + 1 \right) 100\% \quad (17)$$

Smakhtin (2001) menunjukkan bahwa desain rentang aliran rendah dari FDC berkisar antara 70 dan 99% (dilambangkan sebagai Q70 dan Q99%). Q90 dan Q95 % adalah bentuk yang sering digunakan sebagai indikator aliran rendah dan telah banyak digunakan untuk menetapkan debit lingkungan minimum (Pyrce, 2004; Karimi, 2012; Nikghalb, 2016).

Kalibrasi Model

Indeks efisiensi *Nash-Sutcliffe* (EF) adalah cara uji statistik yang digunakan secara luas dan berpotensi andal untuk menilai tingkat kecocokan model hidrologi. (Richard H. McCuen; dkk, 2006). Dalam menghitung penyimpangan yang terjadi menggunakan metode *Nash-Sutcliffe Coefficient* (NSE) untuk menghitung perbedaan jumlah kuadrat dari data observasi dengan data hasil pemodelan dan metode *Relative Volume Error* (RVE) untuk menghitung volume dari data observasi dari AWLR dengan data hasil pemodelan.

Berikut adalah persamaan umum *Nash-Sutcliffe Coefficient*:

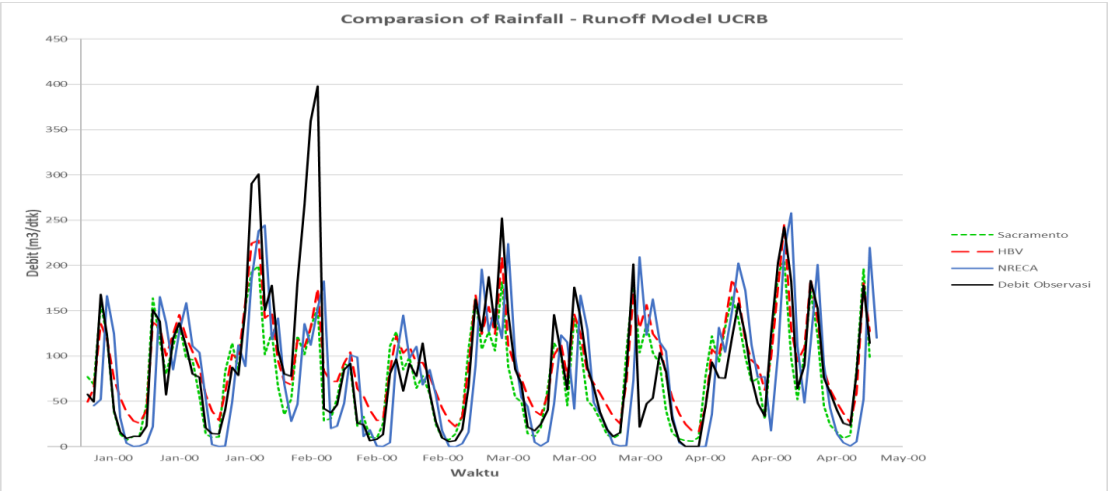
$$R^2 = 1 - \frac{\text{MSE}(Q)}{\text{VAR}(Q_{\text{ons}})} \quad (18)$$

Persamaan umum *Relative Volume Error*:

$$\text{VE} = \frac{\sum (Q_{\text{sim}} - Q_{\text{obs}})}{\sum (Q_{\text{obs}})} \quad (19)$$

Hasil Studi dan Pembahasan

Dari hasil yang diperoleh dari analisis yang telah dilakukan ada beberapa hal yang menarik untuk dibahas. Yang pertama adalah dari ketiga metode yang digunakan, hasil terbaik ditunjukkan oleh metode Sacramento (Gambar 1). Hal ini mengacu pada hasil pengujian model dengan data debit observasi menggunakan metode *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), dimana nilai NSE mendekati satu ditunjukkan dengan pemodelan Sacramento (Tabel 2).



Gambar 1. Perbandingan debit harian

Hal ini mengacu pada hasil pengujian model dengan data debit observasi menggunakan metode Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), dimana nilai NSE mendekati nilai satu ditunjukkan dengan pemodelan Sacramento (Tabel 2).

Tabel 2 Nash-Sutcliffe Efficiency model Sacramento pada UCRB

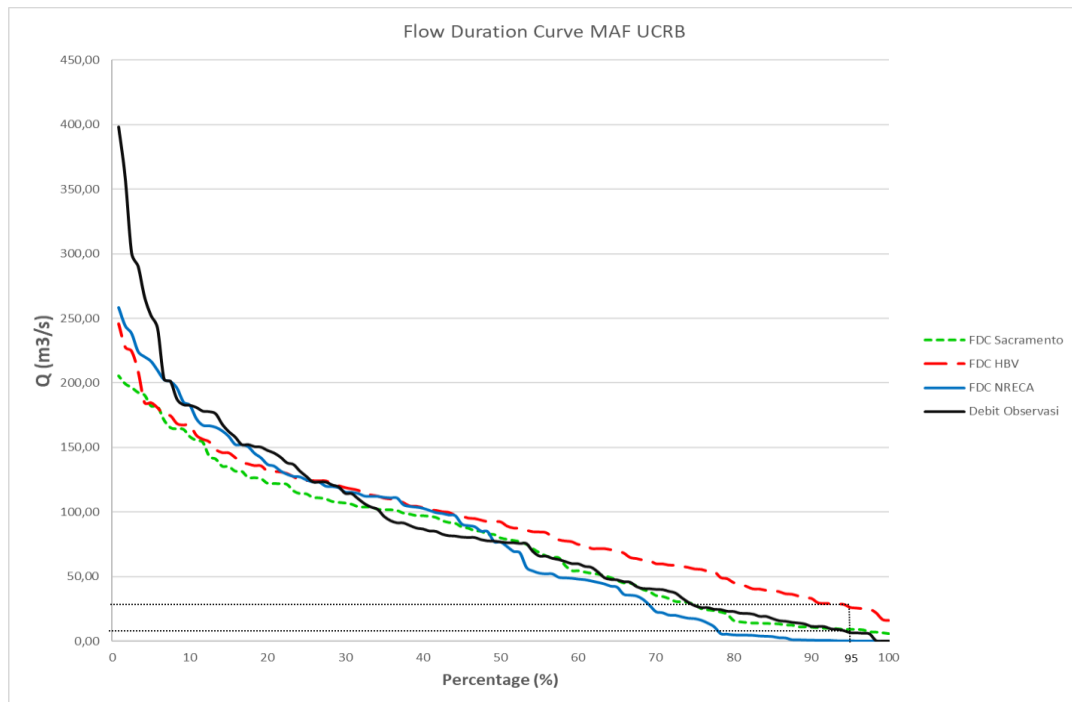
Periode	2008-2017	2008-2009
NSE	0,63	0,78

Hasil optimasi parameter akhir yang dapat menjadi acuan model bagi para perekayasa dan *modeler* di UCRB ditunjukkan pada Table 3.

Tabel 3. Parameters Sacramento model untuk Citarum Hulu

Model Parameter	Default Value	Default Minimum	Default Maximum
ADIMP	0,80	0	1
LZFPM	50,00	0	1000
LZFSM	50,00	0	1000
LZPK	0,01	0	1
LZSK	0,00	0	1
LZTWM	200,00	0	400
PCTIM	0,18	0	1
PFREE	0,80	0	1
REXP	1,50	0	3
RSERV	1,00	0	1
SARVA	0,60	0	1
SIDE	1,00	0	1
SSOUT	0,80	0	1
UZFWM	80,00	0	80
UZK	0,14	0	1
UZTWM	2,00	0	100
ZPERC	12,00	0	80

Hal kedua dari penelitian ini adalah hasil perhitungan debit 7Q10 yang dilakukan dengan menggunakan metode Gumbel minima dan Weibull minima, baik dari data pencatatan debit harian Nanjung maupun hasil perhitungan Sacramento. Jumlah debit 7Q10 untuk keduanya seperti yang disajikan dalam Table 2. Dari hasil tersebut didapatkan bahwa hasil dari metode Gumbel minima mendapatkan hasil yang negatif dimana hal ini tidak dapat digunakan untuk mengestimasi debit rendah pada sungai. Hal ini sesuai dengan hipotesis yang menyatakan bahwa metode Gumbel minima memiliki keterbatasan dalam perhitungan 7Q10 (Naghetini, 2017).



Gambar 2. Flow duration curve UCRB (2008-2017)

Untuk metode Weibull minima, hasil 7Q10 untuk pemodelan Sacramento adalah 2,18 m³/s sedangkan AWLR Nanjung adalah 1,24 m³/s. Hasil inilah yang dijadikan acuan sebagai pembandingan debit lingkungan UCRB dengan metode FDCA.

Tabel 4. Debit lingkungan DAS Citarum Hulu

	7Q10 (m ³ /s)		Q95
	Gumbel min	Weibull min	(m ³ /s)
Sacramento Model	0,38	2,18	9,26
HBV Model			26,19
NRECA Model			0,22
Nanjung AWLR	-5,05	1,24	6,55

Nilai Q95 untuk Nanjung AWLR adalah 6,55 m³/s sedangkan hasil pemodelan curah hujan limpasan Sacramento adalah 7,06 m³/s, HBV adalah 26,19 m³/s dan NRECA 0,22 m³/s (Gambar 2). Nilai 7Q10 menunjukkan hasil yang secara signifikan lebih kecil dari Q95 untuk Sacramento dan HBV (Tabel 4), dimana di Indonesia penentuan debit pemeliharaan banyak digunakan Q95 (Hatmoko, 2020).

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

1. Hasil analisis aliran rendah di UCRB menunjukkan bahwa debit aliran rendah yang diperoleh dengan metode indeks aliran rendah adalah Q95 sekitar 9 m³/s dan untuk 7Q10 2,18 m³/s dan 1,24 m³/s. Debit terbatas pada kondisi UCRB tanpa reservoir. Kedua debit ini dapat menjadi dasar penentuan debit lingkungan dengan menguji respon ekologi terhadap fitur lingkungan.
2. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa kedua metode yang digunakan untuk menentukan besarnya debit lingkungan (EF) memiliki perbedaan yang signifikan sehingga perlu dilakukan pengujian dan analisis lebih lanjut dengan mempertimbangkan kondisi ekologi atau habitat. Untuk selanjutnya, perlu dipastikan bahwa jumlah debit dapat mendukung kondisi ekologi di kawasan UCRB.
3. Dalam kegiatan Percepatan Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Daerah Aliran Sungai Citarum yang dicanangkan pemerintah sebagai implementasi dari Keppres tersebut, juga perlu dipastikan ketersediaan jumlah debit lingkungannya. Karena perbedaan yang signifikan tersebut tentunya mempengaruhi kondisi ekologi, serta mempengaruhi pengelolaan Sungai Citarum, khususnya di UCRB.

Saran

Perlu dilakukan pengujian dan analisis lebih lanjut dengan mempertimbangkan kondisi ekologi atau habitat dalam penentuan debit lingkungan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Doktor Teknik Sipil ITB yang telah mendukung sebagian penelitian ini dan Universitas Mercu Buana atas dukungan dana terhadap penulis. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Citarum yang telah memberikan data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini.

Daftar Referensi

- Amusja, A.Z., Ratner, N.S., Sokolov, B.L., 1991. Minimum river flow: state of art and prospects for research, Trudy GGI (Trans. State Hydrol. Inst., Leningrad, USSR) 350, 3–28.

- Beven, K.J., 2001. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom.
- Bovee, K. D., 1982. A Guide to Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology. Instream Flow Information Paper 12. U.S. Fish Wildl. Serv. FWS/OBS-82/26.
- Brunner, P., R. Therrien, P. Renard, C. T. Simmons, and H.-J. H. Franssen, 2017. Advances in understanding river-groundwater interactions, *Rev. Geophys.*, 55, 818–854. <https://doi.org/10.1002/2017RG000556>
- Davis, R., dan Hirji, R., 2003. Environmental Flows: Concepts and Methods, *Water Resources And Environment Technical Note C.1*, World Bank.
- Demuth, S., 1994. Regionalisation of low flows using a multiple regression approach—a review, *Proceedings of the XVIIth Conference of Danube countries*, Budapesht, vol. 1, pp. 115– 122.
- Dyson M., Bergkamp G., Scanlon J. (eds), 2003. Flow. The essential of environmental flows. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- Granemann A.R.B., Mine M.R.M., Kaviski E., 2018. Frequency analysis of minimum flows, *Brazilian Journal of Water Resources*, Porto Alegre, 23, e17. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0318170080>
- Hatmoko W., Levina, Radhika, Amirwandi, Firmansyah R., 2020. Quantification of Environmental Flow Requirement for some Rivers in West Java, *E3S Web of Conferences*, 148, 07003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014807003>
- Karimi S., Salarijazi M., Ghorbani K, dkk., 2021. Comparative assessment of environmental flow using hydrological methods of low flow indexes, Smakhtin, Tennant and flow duration curve. *Acta Geophys*, 69, 285–293. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00539-z>
- Karimi, S.S., Yasi, M., dan Eslamian, S., 2012. Use of hydrological methods for assessment of environmental flow in a river reach, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 9, 549–558. <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0062-6>
- Kuntoro A.A., Cahyono M., Soentoro E.A., 2018. Land Cover and Climate Change Impact on River Discharge: Case Study of Upper Citarum River Basin. *J. Eng. Technol. Sci.*, 50(3), 364-381. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.3.4>
- McCuen, R.H., Knight, Z. dan Cutter, A.G., 2006. Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index, *Journal of Hydrologic Engineering*, 11, 597-602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597))
- Naghetini, M., 2017. Fundamentals of Statistical Hydrology. Springer International Publishing Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43561-9>
- Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles, *J. Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

- Nestler, J. M., Milhous, R. T., Payne, T. R., Smith, D.L., 2019. History and review of the habitat suitability criteria curve in applied aquatic ecology, *River Res Applic*, 1–26, <https://doi.org/10.1002/rra.3509>
- Nikghalb S., Shokoohi A., Singh V.P., Yu R., 2016. Ecological Regime versus Minimum Environmental Flow: Comparison of Results for a River in a Semi Mediterranean Region. *Water Resour Manage*, 30(13), 4969–4984. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1488-2>
- Nnaji G.A., Huang W., Gitau M.W., Clark C., 2014. Frequency Analysis of Minimum Ecological Flow and Gage Height in Suwannee River, Florida, *Journal of Coastal Research*, 68(sp1), 152-159. <https://doi.org/10.2112/SI68-020.1>
- Pemerintah Indonesia, 1974. Undang-Undang No. 11 Tahun 1974 tentang Pengairan, *Lembaran Negara RI Tahun Tahun 1974 No. 65*, Sekretariat Negara, Jakarta.
- Pemerintah Indonesia, 2004. Undang-Undang No. 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air, *Lembaran Negara RI Tahun Tahun 2004 No. 32*, Sekretariat Negara, Jakarta.
- Pemerintah Indonesia, 2019. Undang-Undang No. 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air, *Lembaran Negara RI Tahun Tahun 2019 No. 190*, Sekretariat Negara, Jakarta.
- Pemerintah Indonesia, 2020. Undang-Undang No. 11 Tahun 2020 tentang Cipta Kerja, *Lembaran Negara RI Tahun Tahun 2020 No. 245*, Sekretariat Negara, Jakarta.
- Pemerintah Indonesia, 2011. Peraturan Pemerintah Nomor 38 Tahun 2011 tentang Sungai, *Lembaran Negara RI Tahun Tahun 2011 No. 74*, Sekretariat Negara, Jakarta.
- Pemerintah Indonesia, 2018. Peraturan Presiden Nomor 15 Tahun 2018 tentang Percepatan Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Daerah Aliran Sungai Citarum, *Lembaran Negara RI Tahun Tahun 2018 No. 30*, Sekretariat Negara, Jakarta.
- Podger, G., 2004. Rainfall Run Off Library Versi 1.05 User Guide, *Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources*; CRC for Catchment Hydrology.
- Ponce, V.M., Lindquist, D.S., 1990. Management of baseflow augmentation: a review. *Water Resour. Bull.*, 26 (2), 259–268. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1990.tb01369.x>
- Poovakka A.K., Eldho T.I., 2019. A comparative study of conceptual rainfall-runoff models GR4J, AWBM and Sacramento at catchments in the upper Godavari river basin, India. *J. Earth Syst. Sci.*, 128:33. <https://doi.org/10.1007/s12040-018-1055-8>
- Pyrce, R. Hydrological low flow indices and their uses. Canada, 2004. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20714343> (accessed in September 20th, 2014).

- Riggs, H.C., 1972. Low flow investigations. Techniques of Water Resources Investigations of the USGS, Book 4, *Hydrological Analysis and Interpretation*, Washington DC, 18 pp.
- Riggs, H.C., 1976. Effects of man on low flows. Proceedings of the Conference on Environment, Aspects Irrigation and Drainage, University of Ottawa, *American Society of Civil Engineers*, New York, pp. 306–314.
- Searcy, J.C., 1959. Flow duration curves. United States Geological Survey, Washington, DC, *Water Supply Paper*, 1542A.
- Smakhtin, V.U., 2001. Low flow hydrology: A Review, *Journal of Hydrology*, 240, 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)
- Smakhtin, V.U., Shilpakar R.L. dan Hughes D.A., 2006. Hydrology based assessment of environmental flows: an example from Nepal, *Hydrological Sciences Journal*, 51:2, 207-222. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.2.207>
- Supatmanto B.D., Yusuf S.M., 2015. Hydrological study based on climate changes using SWAT model in Jatiluhur water catchment area, *J. Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 16(2), 55-60. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v16i2.1047>
- Suwelo, I. S., 2005. Spesies Ikan Langka dan Terancam Punah Perlu Dilindungi Undang-undang, *Jurnal Ilmu-ilmu Perairan dan Perikanan Indonesia*, Jilid 12, Nomor 2: 161-168
- Syiva, H., et al, 2020. Rainfall distribution in relation to flooding in upper Citarum watershed, Indonesia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 500, 012088. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/500/1/012088>
- Solander K.C., Bennett K.E., Middleton R.S., 2017. Shifts in historical streamflow extremes in the Colorado River Basin, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 363-377. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.004>
- Tallaksen, L.M., 1995. A review of baseflow recession analysis, *Journal Hydrology*, 165, 349–370. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)
- Tharme, R. E., 2003. A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in The Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers, *River Research and Applications*, 19: 397–441. <https://doi.org/10.1002/rra.736>
- Toriman M.E., Jaafar M., Abdullah S.M.S., 2008. Environmental flow modelling as a tool for water resources management: a study of detailed environmental impact assessment (DEIA) in Sungai Pelus catchment, Malaysia, *Journal of Social Sciences and Humanities*, 3(1), 1-10.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization, 1992. International Glossary of Hydrology. Second edition, UNESCO, Paris.
- Vasak, L., 1977. Low flow studies. A literature survey. Free University, Amsterdam, Netherlands.

- Verma RK, Murthy S, Verma S. et. al., 2017. Design flow duration curves for environmental flows estimation in Damodar River Basin, India, *Appl Water Sci*, 7, 1283–1293. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0486-0>
- Vogel, R.M., dan Fennessey, N.M., 1994. Flow duration curves. I. A new interpretation and confidence intervals, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 120 (4), 485–504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:4\(485\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(485))
- Vogel, R.M., dan Fennessey, N.M., 1995. Flow duration curves. II. a review of applications in water resource planning, *Water Resour. Bull.*, 31 (6), 1029–1039. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb03419.x>
- Vogel, R.M., dan Kroll, C.N., 1989. Low-flow frequency analysis using probability-plot correlation coefficients, *J. Water Res. Plan. Manag. (ASCE)*, 115 (3), 338–357. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1989\)115:3\(338\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1989)115:3(338))
- Wijayanti, Y., Anda, M., Safitri, L., Tarmadja, S., Juliastuti, dan Setyandito, O., 2020. Water-energy nexus development for sustainable water management in Indonesia, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 426, 012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012058>
- World Meteorological Organization, 1988, 2004, 2006. Technical Regulations (WMO-No. 49), Geneva.
- World Meteorological Organization, 2009. Manual on Low Flow Estimation and Prediction, (WMO-No. 1029), Geneva.
- Xu W., Dong Z., Hao Z., Ren L., Wang W., Li D., 2019. Ecological flow regime and its satisfactory degree assessment based on an integrated method, *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(5), 3959-3970. <https://doi:10.15244/pjoes/97395>
- Zeiringer B., Seliger C., Greimel F., Schmutz S., 2018. River Hydrology, Flow Alteration, and Environmental Flow. In: Schmutz S., Sendzimir J. (eds) *Riverine Ecosystem Management. Aquatic Ecology Series*, vol 8. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_4