

Analisis Pengaruh Perubahan Karakteristik DAS terhadap Keamanan Bendungan Pamukkulu Berdasarkan Penelusuran Banjir

Syahrizal Mufrodi *, Ignatius Sriyana

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

Abstrak

Bendungan Pamukkulu direncanakan untuk mereduksi banjir Sungai Pappa hingga 29% terhadap debit desain Q_{PMF} . Banjir disebabkan tingginya debit di sungai yang dipengaruhi oleh intensitas hujan dan limpasan permukaan. Fakta di lokasi menunjukkan adanya perubahan karakteristik DAS yang ditunjukkan dari peningkatan curah hujan maksimum dari tahun 2013 hingga tahun 2022 dan kecenderungan penurunan indeks tutupan vegetasi. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh kontribusi perubahan karakteristik DAS seperti curah hujan harian maksimum dan perubahan tutupan lahan terhadap perubahan hidrograf banjir dan pengaruhnya terhadap kondisi keamanan Bendungan Pamukkulu dari bahaya terjadinya overtopping. Penelitian diawali dengan pengumpulan data, kemudian menganalisis distribusi hujan-jaman, analisis debit banjir rancangan, dan penelusuran banjir dengan Metode Level Pool Routing dan pemodelan HEC-HMS, Hasilnya menunjukkan debit banjir rancangan cenderung meningkat, khususnya pada Q_{PMF} meningkat mencapai 1652,27 m³/detik (3,45%) dengan metode HSS ITB-1, dan 1893,37 m³/detik (18,54%) dengan model HEC-HMS. Meningkatnya debit banjir menyebabkan perubahan elevasi muka air maksimum waduk pada debit banjir Q_{PMF} naik sebesar 0,04 m hingga 0,08 m di atas Muka Air Banjir (MAB) rencana (+129,68 m), dimana nilai ini masih dibawah elevasi puncak bendungan (+131,50 m) sehingga menunjukkan Bendungan Pamukkulu aman dari potensi terjadinya overtopping.

Kata kunci: debit banjir rencana; overtopping; penelusuran banjir; tinggi muka air

Abstract

[Title: Analysis Of The Effects in Watershed Characteristics Changes on Safety of The Pamukkulu Dam Based On Flood Routing] Pamukkulu Dam planned to reduce flood up to 29% on Pappa River. Flood is caused by high discharge from the rain intensity and surface runoff. Facts show that there are watershed characteristics changes that indicate by an increasing trend in maximum rainfall from 2013 to 2022 and a decreasing trend in the vegetation cover index. This research aims to analysis the contribution of changes in maximum daily rainfall and land cover to flood hydrographs and their influence on the safety of Pamukkulu Dam. The research began with collecting data, then analyzing the distribution of rainfall, analyzing design flood, then flood routing analysis uses Level Pool Routing Method and HEC-HMS modeling. The results showed that the design flood discharge increase specifically in Q_{PMF} increased to 1652.27 m³/s (3.45%) with the HSS ITB-I method, and 1893.37 m³/s (18.54%) with HEC-HMS modeling. The increase in flood discharge causes the maximum water level of the reservoir in the Q_{PMF} flood discharge simulation to increase by 0.04 m to 0.08 m above the planned Flood Water Level (+129.68 m), where this value is still below the top dam elevation (+131.50 m), so the conclusion is Pamukkulu Dam is safe from the potential of overtopping.

Keywords: flood discharge; flood routing; overtopping; reservoir water level

1. Pendahuluan

Sungai Pappa terletak di Provinsi Sulawesi selatan memiliki frekuensi kejadian banjir yang tinggi dan

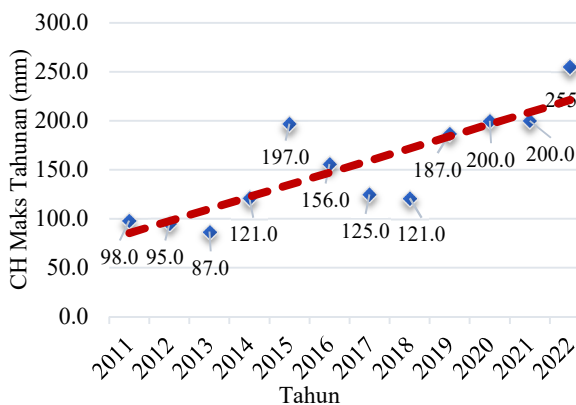
luapannya menyebabkan Kabupaten Takalar tergenang (Amir, 2014). Berdasarkan data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), curah hujan yang tercatat di Provinsi Sulawesi Selatan dikategorikan dalam hujan sangat lebat dengan intensitas mencapai 110 mm/hari, bahkan tergolong hujan ekstrem dengan

*) Penulis Korespondensi.

E-mail: odiongkek@gmail.com

intensitas mencapai 197 mm/hari (Salsabila, Limantara, & Fidqi, 2021). Tingginya intensitas curah hujan menyebabkan akumulasi debit di sungai menjadi besar sehingga terjadi banjir pada Sungai Pappa pada musim penghujan (Haikal, Musa, & Sar, 2023). Berdasarkan data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana Daerah (BNPB-D) Provinsi Sulawesi Selatan sejak tahun 2008 hingga tahun 2021 tercatat telah terjadi 15 kejadian banjir akibat luapan Sungai Pappa. Oleh karena itu Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat membangun Bendungan Pamukkulu pada ruas Sungai Pappa yang direncanakan sejak tahun 2014 dan konstruksinya selesai pada tahun 2024. Bendungan Pamukkulu merupakan jenis bendungan serbaguna yang salah satu fungsi tampungannya adalah untuk mereduksi debit banjir yang mengalir ke daerah hilir yang desain bangunan utamanya direncanakan dengan debit banjir maksimum boleh jadi (*Probable Maximum Flood/ Q_{PMF}*).

Tantangan dalam pembangunan bendungan dengan fungsi mereduksi banjir adalah perubahan besaran debit banjir maksimum yang terjadi tidak sesuai dengan kondisi saat perencanaan sehingga akan memicu perubahan pada tinggi muka air dan kapasitas tampungan waduk yang tidak sesuai rencana (Sobriyah, Setiawan, & Qomariyah, 2016). Banyak faktor yang menjadi penyebab terjadinya perubahan debit banjir, yaitu perubahan karakteristik DAS meliputi karakteristik hidrologi DAS seperti perubahan curah hujan maksimum dan karakteristik fisik DAS dengan adanya perubahan tutupan lahan, dimana pengaruh karakteristik hidrologi DAS berubah, hujan harian dan intensitas hujan yang kecenderungan meningkat akan diikuti dengan meningkatnya debit banjir, mengakibatkan lebih banyak risiko terdampak dan meningkatkan kerusakan bahkan kerugian akibat terjadi kegagalan (Suripin & Kurniani, 2016). Sedangkan pada fisik DAS, faktor peralihan fungsi pada suatu kawasan yang mampu menyerap air (*pervious*)



Gambar 1. Trend curah hujan harian maksimum tahunan DTA Waduk Pamukkulu

menjadi kawasan yang kedap air (*impervious*) juga dapat mengakibatkan perubahan pada respon suatu DAS terhadap karakteristik hujan dan akan berpengaruh terhadap peningkatan hidrograf banjir dan besaran debit puncak banjir (Sari S, 2012).

Gambar 1 menunjukkan terjadinya peningkatan debit banjir di DTA Waduk Pamukkulu diperkuat secara faktual dengan adanya kecenderungan meningkatnya hujan harian maksimum tahunan sejak tahun 2013 hingga tahun 2022, dimana curah hujan harian maksimum tertinggi tercatat selama 10 tahun terakhir terjadi pada tahun 2022 yang mencapai 255 mm, selain itu adanya kecenderungan penurunan indeks tutupan vegetasi pada DAS Pappa daerah hulu dimana luas vegetasi permanen pada tahun 2008 sebesar 19,38% berkurang menjadi 16,96% pada tahun 2018 atau berkurang 0,25% tiap tahunnya (Serastiwati, Subaedah, & Syam, 2020), hal ini menunjukkan bahwa sejak tahun direncanakannya Bendungan Pamukkulu yaitu tahun 2014 telah terjadi perubahan hidrograf banjir yang selain dipengaruhi curah hujan, juga perubahan tutupan lahan menyebabkan hujan tidak terserap ke dalam tanah (infiltrasi dan perkolasi) dan berubah menjadi limpasan aliran permukaan yang mengalir ke sungai (Kodoatie, 2020). Perubahan tutupan lahan pada DTA Waduk Pamukkulu pada tahun 2014 dan 2022 diperkirakan akan berpengaruh terhadap besaran limpasan permukaan.

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh kontribusi perubahan karakteristik DAS seperti curah hujan harian maksimum dan perubahan tutupan lahan terhadap perubahan hidrograf banjir dan pengaruhnya terhadap kondisi keamanan Bendungan Pamukkulu dari bahaya terjadinya *overtopping*. Oleh karena itu berdasarkan kondisi dan tujuan tersebut, perlu dilakukan kaji ulang kemampuan kapasitas Waduk Pamukkulu dengan analisis penelusuran banjir pada kondisi terkini. Dengan hasil dari penelitian ini diharapkan skema pola operasi banjir yang telah direncanakan dapat disempurnakan sehingga bermanfaat untuk meningkatkan kesiapan fungsi reduksi banjir Bendungan Pamukkulu.

2. Bahan dan Metode

Data yang digunakan untuk analisis merupakan data sekunder diperoleh dari Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang. Data yang dibutuhkan meliputi data teknis bendungan yang digunakan untuk analisis penelusuran banjir berupa data desain bangunan utama dan bangunan pelengkap bendungan; data hidrologi meliputi data curah hujan selama 20 tahun (2003-2022) dan data debit observasi selama tiga tahun pencatatan (2020-2022) untuk kalibrasi model hidrologi; selanjutnya data peta *Digital Elevation Model* (DEM), peta tutupan lahan, dan peta jenis tanah yang digunakan untuk parameterisasi DAS dalam model HEC-HMS.

Penelusuran banjir di Waduk Pamukkulu dianalisis menggunakan perbandingan dua metode yaitu menggunakan persamaan empiris Metode *Level Pool Routing* dan Metode *Soil Conservation Service Curve Number (SCS CN)* dengan pemodelan perangkat lunak HEC-HMS 4.11 dengan batasan meliputi elevasi Muka Air Banjir (MAB) rencana pada +129,68 m, dan elevasi puncak Bendungan Pamukkulu pada elevasi +131,5 m (Santosa, Widyaningtiyas, Nugroho, & Nugroho, 2023).

2.1. Analisis Hidrologi

Perhitungan bertujuan untuk meramalkan debit banjir yang akan tertampung di Waduk Pamukkulu. Tahapan analisis hidrologi membutuhkan data curah hujan harian maksimum tahunan yang mempresentasikan daerah penelitian dimana pada DTA Waduk Pamukkulu terdapat satu pos hujan yang mewakili keseluruhan DTA yaitu Pos Curah Hujan DAS Pamukkulu. Data curah hujan selama 20 tahun (2003-2022) tersebut kemudian dilakukan analisis frekuensi dengan metode Log Pearson Tipe III untuk meramalkan besar curah hujan rencana, selanjutnya menganalisis curah hujan maksimum boleh jadi (*Probable Maximum Precipitation/ PMP*) dilakukan dengan Metode Hershfield, dan menganalisis distribusi hujan jam-jaman menggunakan metode PSA 007.

2.2. Analisis Debit Banjir Rancangan

Analisis debit banjir rancangan bertujuan untuk memperoleh hidrograf debit banjir untuk simulasi penelusuran banjir. Penelitian ini menggunakan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) sebagai hidrograf banjir inflow ke waduk Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) ITB-1. HSS ITB-1 merupakan salah satu perhitungan hidrograf satuan yang menggunakan parameter fisik DAS dan curah hujan (Damayanti, Limantara, & Haribowo, 2022). Metode analisis debit banjir rancangan selanjutnya menggunakan metode Hidrograf Sintesis *Soil Conservation Service (SCS)* melalui pemodelan HEC-HMS. Metode ini merupakan model hidrologi yang dikategorikan model matematik yang dikembangkan oleh *Hydrologic Engineering Center (HEC)* (Kodoatie, 2020).

2.2. Penelusuran Banjir di Waduk

Penelusuran banjir dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh ketika hidrograf banjir yang terjadi masuk ke waduk terhadap perubahan tinggi muka air waduk hingga mengisi tampungan sementara (*surcharge storage*) yaitu tampungan banjir yang berada di atas ambang pelimpah. Proses ini akan terjadi hingga puncak banjir tercapai, yaitu ketika inflow dan outflow akan menjadi sama (Perdanawanti, 2010). Pada penelitian ini dilakukan dua metode penelusuran banjir yaitu Metode *Level Pool Routing (LPL)* dan Model HEC-HMS.

Metode *Level Pool Routing* menggambarkan konsep linear sederhana antara hubungan *inflow* dan *outflow*. Metode ini perlu untuk mengetahui jumlah debit maksimum dan mengetahui efektivitas waduk (Amalia &

Wesli, 2021). Persamaan 1 dan 2 menunjukkan persamaan yang umum dipakai dalam konsep penelusuran banjir Metode *Level Pool Routing* (Wijayanti, Istiarto, & Jayadi, 2021).

$$I - O = ds/dt \quad (1)$$

$$T = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, j\Delta t, (j + 1)\Delta t \quad (2)$$

Dimana I adalah debit *inflow* yang berasal dari analisis hujan-limpasan tiap kala ulang dan aliran dasar (*baseflow*) di sungai dari analisis HSS ITB-1 sedangkan O merupakan debit *outflow* yang dialirkan melalui pelimpah, dan Δt adalah interval *routing*.

Perubahan antara debit *inflow* dan debit *outflow* selama Δt dianggap linear sehingga persamaan perubahan tampungan (S) ditunjukkan pada Persamaan 3 (Wijayanti et al., 2021):

$$S_{j+1} - S_j = \frac{I_j + I_{j+1}}{2} \Delta t - \frac{O_j + O_{j+1}}{2} \Delta t \quad (3)$$

Dengan I_j, I_{j+1} diketahui berdasarkan perhitungan *inflow*, O_j, S_j diperoleh dari perhitungan Δt sebelumnya, sedangkan S_{j+1} dan O_{j+1} merupakan besaran yang dicari.

Metode penelusuran selanjutnya adalah dengan Pemodelan HEC-HMS. Metode ini diawali dengan pembuatan *Basin Model* dengan menggunakan data DEM untuk deliniasi *subbasin*. Adapun parameter yang perlu dilengkapi pada *basin model* adalah Parameter *Loss* untuk masing-masing subbasin meliputi nilai *Curve Number (CN)*, *Initial Abstraction*, dan *Percent Impervious* yang diperoleh dari peta tutupan lahan dan peta jenis tanah. Nilai *Curve Number (CN)* sebagai input parameter subbasin merupakan nilai kurva limpasan untuk mengubah besaran hujan menjadi limpasan aliran permukaan (Kodoatie, 2020)

Model *Transform* yang digunakan adalah *SCS Unit Hydrograph*, dimana yang perlu diisi pada metode ini adalah *lag time* (t_{lag}) dengan menggunakan persamaan *Natural Resources Conservation Services (NRCS)* untuk memperoleh waktu yang dibutuhkan untuk hujan menjadi debit limpasan (*time concentration/ t_c*).

Model *Baseflow* yang digunakan adalah *Recession*, dimana parameter yang dibutuhkan adalah *initial discharge* (debit awal) merupakan debit dasar pada Sungai Pappa, *recession constant* adalah nilai rasio antara aliran yang terjadi sekarang dan kemarin secara konstan (nilai 0 - 1), dan *ratio to peak* merupakan rasio aliran dasar ke puncak saat terjadi debit puncak.

Isian parameter *Reach* untuk *routing* menggunakan *Lag method* dan menu *Control Specification Component* digunakan mengatur tentang rentang waktu simulasi pada model hidrologi. *Time Series Data Component* adalah menu untuk melakukan

Tabel 1. Kriteria performa untuk evaluasi model (Novrizal et al., 2023)

Parameter	Kriteria			
	Sangat Baik	Baik	Memuaskan	Tidak Memuaskan
NSE	> 0,80	0,70 - 0,80	0,50 - 0,70	≤ 0,50
PBias (%)	< ±5	±5 - ±10	±10 - ±15	> ±15
R ²	> 0,85	0,75 - 0,85	0,60 - 0,75	< 0,6

input data hidrologi dimana pada model penelitian ini menggunakan hasil analisis distribusi hujan jam-jaman kala ulang. *Meteorological Model Component* digunakan untuk menentukan model meteorologi yang berpengaruh pada tiap *subbasin* dimana metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *Specified Hyetograph*. dan *Menu Paired Data* merupakan hubungan antara kurva elevasi - tampungan dan elevasi - area sebagai input dari model *reservoir* yang diperoleh dari data pada perencanaan Bendungan Pamukkulu.

Hasil simulasi model HEC-HMS selanjutnya dikalibrasi. Kalibrasi model merupakan suatu tahapan dalam melakukan penyesuaian parameter daerah tangkapan air pada hasil simulasi model HEC-HMS agar sesuai atau mendekati pada kondisi asli di lokasi penelitian. Proses ini bertujuan mendapatkan parameter dengan tingkat korelasi dan koherensi yang lebih baik, Proses ini disebut optimasi (Novrizal, Hermawan, Wibowo, & Nasution, 2023).

Tahapan kalibrasi dimulai pada menyesuaikan parameter *loss* yaitu *curve number* dan *initial abstraction*, dilanjutkan dengan parameter *baseflow* yaitu *initial discharge*, *recession constant*, dan *ratio to peak*, dan yang terakhir dilakukan optimasi parameter *transform* dan *routing* yaitu *lag time*. Proses kalibrasi dilakukan secara runtut dan berulang hingga menguji tingkat keandalannya antara hasil pemodelan dengan data observasi, kriteria batasan parameter statistic yaitu *coefficient of determination R square* (R²) yang merupakan proporsi varian dalam data terukur yang dijabarkan pada model, *Nash Suchlift (NSE)* dan *PBias*, yang ditunjukkan pada Tabel 1.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Hujan Rencana

Terdapat beberapa jenis distribusi yang digunakan dalam analisis frekuensi untuk mendapatkan besaran hujan rencana. Tiap distribusi memiliki persyaratan yang berbeda sehingga perlu dianalisis pemilihan distribusi berdasarkan simpangan baku dan kepengcengan data hujan (Wasono, Sari, Sangkawati, & Nugroho, 2022), dalam penelitian ini digunakan distribusi frekuensi Log Pearson Tipe III karena distribusi ini memenuhi

Tabel 2. Curah hujan rencana distribusi Log Pearson Tipe III

No.	Kala Ulang (Th)	Hujan Rencana (mm)
1	2	145,821
2	5	190,246
3	10	219,031
4	25	253,709
5	50	281,246
6	100	307,482
7	200	333,794
8	500	379,417
9	1000	395,912
10	PMP	622,231

persyaratan, sehingga diperoleh hasil analisis hujan rencana distribusi Log Pearson Tipe III untuk berbagai kala ulang dan hasil perhitungan hujan rencana *Probable Maximum Precipitation (PMP)* menggunakan Metode *Hershfield* ditunjukkan pada Tabel 2.

3.2. Distribusi Hujan Jam-Jaman

Distribusi hujan jam-jaman dilakukan dengan mendistribusikan curah hujan rencana pada Tabel 2 menggunakan metode distribusi hujan jam-jaman PSA-007. Pemilihan durasi hujan karena tidak tersedianya data curah hujan jam-jaman di lokasi penelitian maka penentuan durasi hujan menggunakan acuan klasifikasi menurut Singh, 1994 dimana untuk DTA Waduk Pamukkulu diklasifikasikan DAS menengah dengan luas 10 – 100 km² yaitu ≤ 24 jam sehingga pada penelitian ini dipilih durasi hujan 12 jam. Penentuan koefisien pengaliran berdasarkan jenis tutupan lahan mengacu pada Sosrodarsono (Torimtubun & Asmaranto, 2018), terhadap lokasi DTA Waduk Pamukkulu yang merupakan dominasi pegunungan tersier sehingga ditentukan koefisien pengaliran 0,75. Sehingga diperoleh besaran hujan efektif terhadap koefisien pengaliran dan menghasilkan distribusi hujan jam-jaman pada DTA Waduk Pamukkulu ditunjukkan pada Tabel 3.

3.3. Perubahan Tutupan Lahan

Pada penelitian ini, penentuan besaran *Curve Number (CN)* didasarkan pada tutupan lahan di DTA Waduk Pamukkulu pada tahun 2014 dan 2022, dimana perubahan tutupan lahan yang terjadi disajikan pada Tabel 4, sedangkan untuk memperoleh nilai CN dengan mengklasifikasikan jenis tutupan lahan yang di-*overlay* peta jenis tanah dimana pada lokasi studi didominasi Nitosol. Jenis tanah Nitosol memiliki kategori *Hydrology Soil Group (HSG)* kategori “D” (Fadhilla & Lasminto, 2021). Sehingga diperoleh nilai CN terhadap tutupan lahan berdasarkan HSG kategori yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Perubahan tutupan lahan yang terjadi sejak tahun 2014 signifikan terjadi pada areal pemukiman yang meningkat mencapai 1,44 km² atau 1,62 persen sejak

Tabel 3. Distribusi hujan jam-jaman DTA Waduk Pamukkulu

Jam ke t	Hujan netto jam-jaman (mm/jam)									
	2	5	10	25	50	100	200	500	1000	PMP
1	2,19	2,85	3,29	3,81	4,22	4,61	5,01	5,69	5,94	9,33
2	2,19	2,85	3,29	3,81	4,22	4,61	5,01	5,69	5,94	9,33
3	2,19	2,85	3,29	3,81	4,22	4,61	5,01	5,69	5,94	9,33
4	6,93	8,56	9,31	10,15	10,55	9,99	10,01	9,49	8,91	12,44
5	8,75	11,41	13,14	15,22	16,87	18,45	20,03	22,76	23,75	37,33
6	53,59	71,34	83,78	98,95	111,80	126,84	142,70	167,89	178,16	289,34
7	13,12	17,12	19,71	22,83	25,31	27,67	27,54	31,30	32,66	46,67
8	6,93	8,56	9,31	10,15	10,55	9,99	10,01	9,49	8,91	12,44
9	6,93	8,56	9,31	10,15	10,55	9,99	10,01	9,49	8,91	12,44
10	2,19	2,85	3,29	3,81	4,22	4,61	5,01	5,69	5,94	9,33
11	2,19	2,85	3,29	3,81	4,22	4,61	5,01	5,69	5,94	9,33
12	2,19	2,85	3,29	3,81	4,22	4,61	5,01	5,69	5,94	9,33
Koef. Pengaliran	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Hujan Efektif (mm)	109,37	142,68	164,27	190,28	210,93	230,61	250,35	284,56	296,93	466,67

tahun 2014, selain itu terjadi peningkatan pada areal persawahan mencapai 8,51 km² atau mencapai 9,55 persen dari keseluruhan area. Di sisi lain perkembangan hutan tanaman yaitu daerah yang sudah ditanami sebagai daerah resapan (*pervious*) sangat minim, dimana pada lokasi penelitian didominasi oleh pertanian kering bercampur semak dan hutan lahan kering sekunder yang memiliki nilai CN yang besar. Perubahan tutupan lahan pada DTA Waduk Pamukkulu dari tahun 2014 ke tahun 2022 ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3.

3.4. Debit Banjir Rancangan

Analisis debit banjir rancangan dengan Metode HSS ITB-1 dan Metode SCS CN dengan Model HEC-HMS menggunakan *input* hidrologi berupa distribusi hujan jam-jaman kala ulang yang telah dianalisis pada Tabel 3 dan parameter fisik DAS. Khusus untuk metode SCS CN, nilai CN sebagai gambaran kondisi DAS ditentukan berdasarkan jenis tanah di lokasi penelitian yang didominasi Nitosol yang sejenis dengan tanah *clay*.

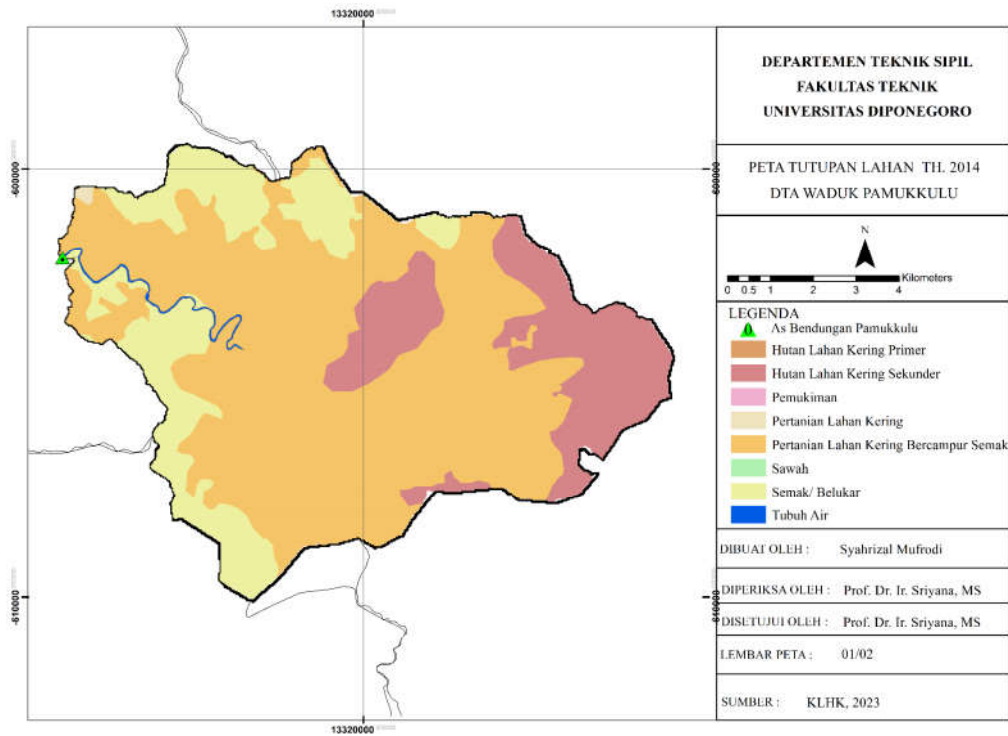
Jenis tanah ini memiliki kategori *Hydrology Soil Group* tipe “D” (Fadhilla & Lasminto, 2021) Penentuan klasifikasi HSG dalam metode SCS CN digunakan untuk menentukan kelas nilai CN yang sesuai jenis tutupan lahan seperti yang telah ditunjukkan pada Tabel 4.

Hasil simulasi kemudian dilakukan kalibrasi debit. Periode kalibrasi pada DTA Pamukkulu dilakukan terhadap data debit tahun 2019 hingga 2022 dengan acuan hasil pengamatan debit pada pos duga air Pamukkulu yang berada di hilir bendungan kurang lebih berjarak 2,7 km. Pengujian kehandalan menunjukkan hasil yang sangat baik yang ditunjukkan pada Tabel 5.

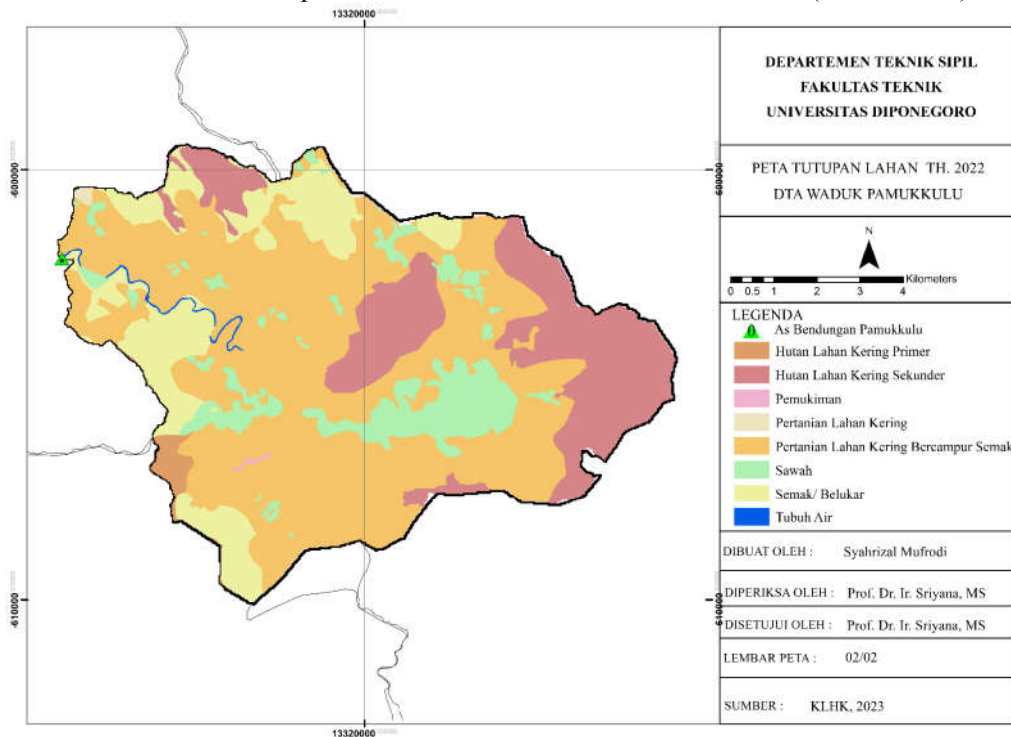
Hasil analisis debit banjir rancangan dari setiap kala ulang pada Metode HSS ITB-1 dan Metode SCS CN dengan Model HEC-HMS menghasilkan debit pada puncak hidrograf yang ditunjukkan pada Tabel 6, yang menunjukkan baik dengan metode HSS ITB-1 atau metode SCS CN dengan Model HEC-HMS menunjukkan adanya perubahan hidrograf banjir pada tahun 2022 dari

Tabel 4. Nilai CN dan perubahan tutupan lahan DTA Waduk Pamukkulu tahun 2014-2022 (Fadhilla & Lasminto, 2021)

No.	Jenis Tutupan Lahan	Nilai CN	Luas (Km ²)		Prosentase Luasan (%)	
			2014	2022	2014	2022
1	Hutan Lahan Kering Primer	79	0,00	0,90	0,00	1,01
2	Hutan Lahan Kering Sekunder	86	16,06	17,68	18,03	19,85
3	Pemukiman	87	0,00	1,44	0,00	1,62
4	Pertanian Lahan Kering	89	0,14	0,13	0,15	0,15
5	Pertanian Lahan Kering Bercampur Semak	89	56,80	48,35	63,74	54,27
6	Sawah	81	0,00	8,51	0,00	9,55
7	Semak/ Belukar	83	15,76	11,79	17,69	13,23
8	Tubuh Air	98	0,35	0,30	0,39	0,33
Jumlah			89,105	89,105	100	100



Gambar 2. Petautupan lahan DTA Waduk Pamukkulu tahun 2014 (KLHK, 2023)



Gambar 3. Petautupan lahan DTA Waduk Pamukkulu tahun 2022 (KLHK, 2023)

tahun 2014 yang diinterpretasikan oleh besaran debit puncak tiap kala ulang. Besarnya peningkatan debit banjir sejak tahun 2014 hingga tahun 2022 berkisar 32,57 %

(Q_{2th}) hingga 3,45% (Q_{PMF}) dengan metode HSS ITB-I. Sedangkan pada metode SCS CN dengan pemodelan HEC-HMS menunjukkan peningkatan debit banjir

Tabel 5. Pengujian hasil kalibrasi DTA Waduk Pamukkulu

Parameter	Nilai	Ket.	Nilai	Ket.
	Sebelum Kalibrasi		Setelah Kalibrasi	
R ²	0,71	Kuat	0,86	Sangat Kuat
NS Indeks	0,57	Memuaskan	0,83	Sangat Baik
Percent Bias (%)	35,01	Tidak Memuaskan	3,16	Sangat Baik

rancangan terjadi pada kala ulang 50 tahun hingga debit PMF yang berkisar 0,57% (Q_{50th}) hingga 18,54%.(Q_{PMF})

Tabel 7 menunjukkan perbandingan Q_{PMF} sebagai debit banjir rancangan pada DTA Waduk Pamukkulu, dimana debit puncak banjir pada Metode HSS ITB-1 dalam kajian ini menghasilkan puncak banjir yang lebih tinggi daripada penelitian Santosa (2022), sedangkan analisis oleh Santosa (2022) menggunakan metode creager (1892,06 m³/detik) dengan analisis penelitian ini dengan pemodelan HEC-HMS (1893,37 m³/detik) menunjukkan nilai yang mendekati dan menunjukkan terjadinya peningkatan debit jika dibandingkan dengan Q_{PMF} tahun 2014 (1597,18 m³/detik), hal ini dipengaruhi perubahan curah hujan harian maksimum dan perubahan tutupan lahan yang terjadi di DTA Waduk Pamukkulu. Untuk mengetahui pengaruh meningkatnya debit banjir rancangan terhadap kondisi tampungan Waduk Pamukkulu selanjutnya dilakukan analisis penelusuran banjir.

3.5. Penelusuran Banjir di Waduk

Penelusuran banjir di Waduk Pamukkulu dilakukan untuk menganalisis pengaruh banjir kala ulang terhadap perubahan karakteristik tampungan waduk. Adapun skema penelusuran banjir yang dianalisis menggunakan *initial condition* atau elevasi awal pada elevasi muka air normal yang setara elevasi ambang mercu pelimpah pada elevasi + 126,00 m. Dari hasil penelusuran banjir selain memperoleh fluktuasi debit inflow banjir dan outflow yang melalui pelimpah juga diperoleh fluktuasi tinggi muka air waduk.

Hasil analisis penelusuran banjir metode *Level Pool Routing* menghasilkan karakteristik tampungan waduk dengan tinjauan muka air waduk dengan inflow debit banjir rancangan berbagai kala ulang disajikan pada Gambar 4.

Tabel 6. Hasil analisis debit banjir rancangan DTA Waduk Pamukkulu

Kala Ulang	Rencana (2014)	Metode HSS ITB-1	Metode SCS CN (HEC-HMS)
Th	m ³ /detik	m ³ /detik	m ³ /detik
2	291,97	387,06	274,82
5	419,23	504,66	403,69
10	503,49	580,96	492,83
25	612,24	672,91	603,22
50	690,07	746,01	693,98
100	767,90	815,98	786,78
200	-	885,95	879,35
500	-	1007,48	1042,14
1000	1026,44	1051,54	1103,78
PMF	1597,18	1652,27	1893,37

Gambar 4 menunjukkan pada tinjauan elevasi muka air waduk pada setiap simulasi debit banjir kala ulang, dimana hasilnya menunjukkan tidak terjadi *overtopping* atau limpasan di atas puncak bendungan dimana elevasi tertinggi yaitu pada hasil penelusuran banjir Q_{PMF} yaitu pada +129,76 m, lebih tinggi dari Muka Air Banjir (MAB) rencana pada elevasi +129,68 m, lebih tinggi 0,08 m di atas MAB rencana, Hasil ini dipengaruhi adanya peningkatan besaran debit banjir rancangan yang terjadi di DTA Waduk Pamukkulu. Secara rinci gambaran hidrograf banjir pada Q_{PMF} ditunjukkan pada Gambar 5

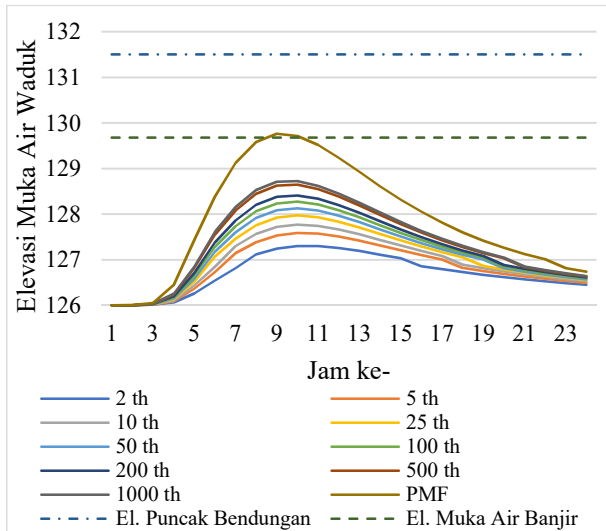
Gambar 5 menunjukkan pada hidrograf banjir Q_{PMF}, waktu untuk mencapai debit puncak (1652,27 m³/detik) terjadi pada jam ke-8 dan elevasi muka air maksimum (+129,76 m) terjadi pada jam ke-9. Sehingga dari hasil analisis penelusuran banjir terhadap perubahan curah hujan maksimum dan perubahan tutupan lahan dengan metode *Level Pool Routing* menunjukkan bahwa adanya peningkatan debit banjir rancangan, tidak menyebabkan luapan pada puncak bendungan atau aman dari potensi terjadinya *overtopping*.

Metode selanjutnya untuk penelusuran banjir Waduk Pamukkulu menggunakan pemodelan HEC-HMS. Hasil simulasi penelusuran banjir di waduk menghasilkan karakteristik tampungan waduk yang ditunjukkan pada Gambar 6 dan kurva *inflow-outflow* pada Q_{PMF} yang ditunjukkan pada Gambar 7.

Gambar 6 menunjukkan hasil pemodelan penelusuran banjir di Waduk Pamukkulu terdapat elevasi

Tabel 7. Perbandingan debit Inflow Waduk Q_{PMF} di DTA waduk Pamukkulu dengan penelitian terdahulu

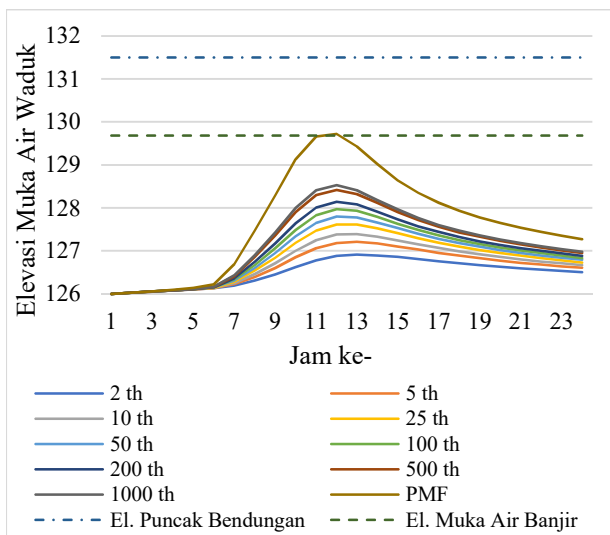
Debit Inflow Q _{PMF} (m ³ /detik)				
Rencana (2014)	Santosa, dkk (2022)		Mufrodi & Sriyana (2023)	
Metode HSS ITB-1	Metode HSS ITB-1	Metode Creager	Metode HSS ITB-1	Metode SCS CN (HEC-HMS)
1597,18	1580,42	1892,06	1652,27	1893,37



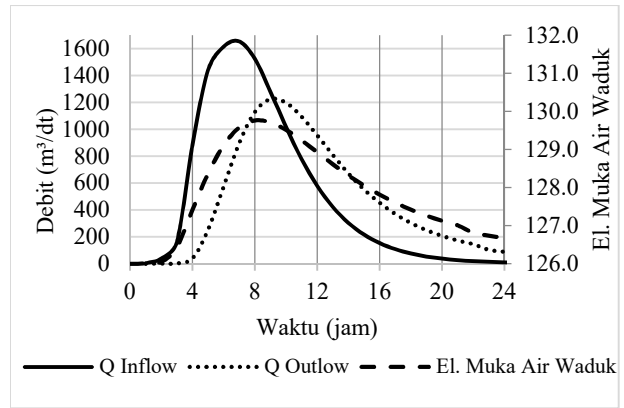
Gambar 4. Kurva muka air waduk hasil penelusuran banjir metode *Level Pool Routing*

maksimum muka air waduk pada debit banjir PMF yang melampaui batas Muka Air Banjir (MAB) rencana (+129,68 m) yaitu pada elevasi +129,72, lebih tinggi 0,04 m di atas MAB rencana. Namun masih dibawah elevasi puncak bendungan. Hasil ini dipengaruhi adanya peningkatan besaran debit banjir rancangan yang terjadi di DTA Waduk Pamukkulu.

Sedangkan hidrograf banjir hasil simulasi penelusuran banjir pada Q_{PMF} dengan Model HEC-HMS yang dapat dilihat pada Gambar 7 menunjukkan waktu untuk mencapai debit puncak (1893,37 m³/detik) dan elevasi muka air maksimum (+129,68 m) terjadi pada jam ke-11. Sehingga dari hasil analisis penelusuran banjir



Gambar 6. Kurva muka air waduk hasil penelusuran banjir Waduk Pamukkulu dengan pemodelan HEC-HMS

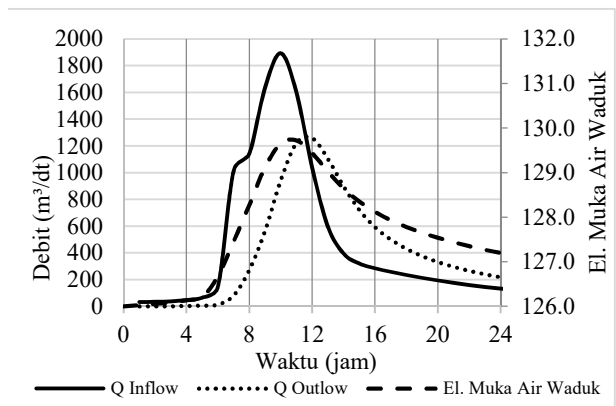


Gambar 5. Hasil penelusuran banjir Waduk Pamukkulu pada debit banjir PMF metode *Level Pool Routing*

dengan Model HEC-HMS menunjukkan peningkatan debit banjir rancangan tidak menyebabkan luapan pada puncak bendungan atau aman dari potensinya terjadinya *overtopping*. Rekapitulasi hasil penelusuran banjir ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8 menunjukkan rekapitulasi hasil penelusuran banjir di Waduk Pamukkulu dengan Metode *Level Pool Routing* (LPL) dan Model HEC-HMS, dimana elevasi maksimum setiap kala ulang tidak menunjukkan adanya bahaya *overtopping*, namun adanya perubahan hidrograf banjir menyebabkan perubahan prosentase reduksi puncak banjir dari Waduk Pamukkulu, khususnya pada debit desain Q_{PMF} dengan metode analisis yang sama dengan rencana yaitu metode *Level Pool Routing*, reduksi banjir terjadi penurunan dari 29% (tahun 2014) menjadi 26% (tahun 2022).

Sedangkan hasil dengan Metode Pemodelan HEC-HMS prosentase mereduksi debit banjir mencapai 33% (tahun 2022). Hal ini disebabkan *time lag* pada model HEC-HMS memiliki durasi lebih panjang yang dipengaruhi model HEC-HMS dipengaruhi oleh panjang



Gambar 7. Hasil penelusuran banjir Waduk Pamukkulu pada debit banjir PMF dengan pemodelan HEC-HMS

Tabel 8. Rekapitulasi hasil penelusuran banjir Waduk Pamukkulu pada kala ulang n-tahun

Kala Ulang	Kondisi	Debit Inflow Maks.	Debit Outflow Maks.	El. MA di atas pelimpah m	TMA di atas Pelimpah m	Reduksi Puncak Banjir %
th		m ³ /detik	m ³ /detik			
2	Rencana (2014)	291,97	162,28	126,98	0,98	44
	LPL (2022)	387,06	215,93	127,30	1,30	44
	Hec-HMS (2022)	274,82	128,51	126,88	0,88	53
5	Rencana (2014)	419,23	245,69	127,30	1,30	41
	LPL (2022)	504,66	298,48	127,59	1,59	41
	Hec-HMS (2022)	403,69	200,63	127,18	1,18	50
10	Rencana (2014)	503,49	303,07	127,50	1,50	40
	LPL (2022)	580,96	355,80	127,77	1,77	39
	Hec-HMS (2022)	492,83	252,60	127,38	1,38	49
25	Rencana (2014)	612,24	380,30	127,80	1,80	38
	LPL (2022)	672,91	423,89	127,97	1,97	37
	Hec-HMS (2022)	603,22	320,35	127,61	1,61	47
50	Rencana (2014)	690,07	436,99	127,92	1,92	37
	LPL (2022)	746,01	479,67	128,13	2,13	36
	Hec-HMS (2022)	693,98	381,48	127,80	1,80	45
100	Rencana (2014)	767,90	505,87	128,12	2,12	34
	LPL (2022)	815,98	533,49	128,27	2,27	35
	Hec-HMS (2022)	786,78	444,69	127,97	1,97	43
200	Rencana (2014)		*tidak tersedia dalam rencana (2014)			
	LPL (2022)	885,95	588,10	128,41	2,41	34
	Hec-HMS (2022)	879,35	507,67	128,14	2,14	42
500	Rencana (2014)		*tidak tersedia dalam rencana (2014)			
	LPL (2022)	1007,48	683,85	128,64	2,64	32
	Hec-HMS (2022)	1042,14	623,45	128,42	2,42	40
1000	Rencana (2014)	1026,44	705,13	128,66	2,66	31
	LPL (2022)	1051,54	718,77	128,73	2,73	32
	Hec-HMS (2022)	1103,78	667,82	128,53	2,53	39
PMF	Rencana (2014)	1597,18	1138,26	129,68	3,68	29
	LPL (2022)	1652,27	1224,45	129,76	3,76	26
	Hec-HMS (2022)	1893,37	1259,53	129,72	3,72	33

sungai, kemiringan sungai dan retensi air maksimum terhadap hujan tiap subbasin (Wiliya, 2022)

4. Kesimpulan

Perubahan curah hujan harian maksimum dan perubahan tutupan lahan pada DTA Waduk Pamukkulu menyebabkan perubahan respon DAS sehingga limpasan permukaan menjadi meningkat kemudian mengakibatkan peningkatan debit banjir di sungai. Besarnya peningkatan debit banjir sejak tahun 2014 hingga tahun 2022 berkisar 32,57 % (Q_{2th}) hingga 3,45% (Q_{PMF}) dengan metode HSS ITB-I. Sedangkan pada metode SCS CN dengan pemodelan HEC-HMS menunjukkan peningkatan debit banjir rancangan terjadi pada kala ulang 50 tahun hingga debit PMF yang berkisar 0,57% (Q_{50th}) hingga 18,54%.(Q_{PMF}). Meningkatnya debit banjir mempengaruhi fluktuasi elevasi muka air waduk saat terjadi debit banjir yang berpotensi berpengaruh terhadap aspek keamanan bendungan yang menyebabkan peningkatan elevasi maksimum muka air waduk melebihi MAB rencana (+129,68 m) hingga 0,08 m nilai ini masih dibawah elevasi puncak bendungan (+131,50 m)

sehingga menunjukkan Bendungan Pamukkulu aman dari potensi terjadinya *overtopping*. Selanjutnya dalam upaya pengelolaan Bendungan Pamukkulu, rekomendasi yang dapat diberikan melihat karakteristik hidrologi suatu DAS sifatnya dinamis seiring bertambahnya waktu yaitu perlu dilakukan suatu sistem pemantauan dan evaluasi secara berkala keamanan dari Bendungan Pamukkulu.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Fakultas Teknik Universitas Diponegoro dan BBWS Pompengan-Jeneberang yang telah mendukung keberlangsungan jurnal ini.

Daftar Pustaka

Amalia, A., & Wesli, W. (2021). Penelusuran Banjir Menggunakan Metode Level Pool Routing Waduk Kota Lhokseumawe. *Teras Jurnal*, 5(1), 1–11.
 Amir. (2014). *Studi Alternatif Pengendalian Banjir Kota Takalar Amir Jurusan Teknik Sipil Sekolah Tinggi*

- Teknik Dharma Yadi Makassar*. 12, 1–7.
- Damayanti, A. C., Limantara, L. M., & Haribowo, R. (2022). Analisis Debit Banjir pada DAS di Pulau Sumba dengan Metode HSS Nakayasu dan Metode HSS GAMA-1. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 1(1), 11–20. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v1i1.6>
- Fadhilla, I. N., & Lasminto, U. (2021). Pemodelan Hujan-Debit DAS Kali Madiun Menggunakan Model HEC-HMS. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 19(3), 361.
- Haikal, A., Musa, R., & Sar, M. (2023). *Model Sedimentasi Dengan Menggunakan Aplikasi Hec-Ras* (Studi Kasus : Sungai Pappa Kab. Takalar). 3, 8004–8013.
- Kodoatie, R. J. (2020). Pengaruh Perubahan Kondisi DAS terhadap Debit Sungai Studi Kasus DAS Waduk Jatigede. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(1), 95–103.
- Novrizal, D., Hermawan, F., Wibowo, M. A., & Nasution, I. A. (2023). Analisis Inflow Lokal Waduk Jatiluhur. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 28(2), 300–309.
- Perdanawanti, M. (2010). *Studi Penentuan Control Water Level Maksimum Waduk Sutami dan Lahor untuk Menghindari Kemungkinan terjadi Overtopping Akibat Banjir PMF*. (12810605).
- Salsabila, N., Limantara, L. M., & Fidqi, J. (2021). Analisis Curah Hujan Serial Terhadap Debit Maksimum di Sub DAS Kampili, DAS Jeneberang, Sulawesi Selatan Nadia. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 1(2), 736–749.
- Santosa, D., Widyaningtias, W., Nugroho, J., & Nugroho, E. (2023). Upaya Penanggulangan Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan Pamukkulu Dalam Kondisi Hujan Ekstrem, Kabupaten Takalar, Sulawesi Selatan. *Conference Paper*, (September).
- Sari S. (2012). Studi limpasan permukaan spasial akibat perubahan penggunaan lahan (menggunakan model KINEROS). *Jurnal Teknik Pengairan*, 2(2), 148–158.
- Serastiwati, A. R., Subaedah, S., & Syam, N. (2020). Analisis Pengaruh Perubahan Tutupan Lahan Terhadap Hidrolisis Das Pamukkulu Sulawesi Selatan. *AGROTEK: Jurnal Ilmiah Ilmu Pertanian*, 4(1), 62–76.
- Sobriyah, Setiawan, A. R. I., & Qomariyah, S. (2016). Tinjauan Debit Banjir Kala Ulang Terhadap Tinggi Muka Air Waduk Krisak Kabupaten Wonogiri. *Matriks Teknik Sipil*, 4(3q), 706–713.
- Suripin, S., & Kurniani, D. (2016). Pengaruh Perubahan Iklim terhadap Hidrograf Banjir di Kanal Banjir Timur Kota Semarang. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 22(2), 119.
- Torimtubun, A., & Asmaranto, R. (2018). *Analisis banjir akibat keruntuhan bendungan banyukuwung dengan menggunakan hec-ras*.
- Wasono, A., Sari, Y. K., Sangkawati, S., & Nugroho, H. (2022). Analisis Debit Banjir Berdasarkan Data Curah Hujan Pada DAS Sekampung Menggunakan Pemodelan HEC-HMS. *Agregat*, 7(2), 686–692.
- Wijayanti, P., Istiarto, I., & Jayadi, R. (2021). Wonogiri reservoir operation pattern after the construction of new spillway for flood control. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 27(2), 268–276.
- Wiliya, W. (2022). Pemodelan Hujan-Debit Menggunakan Model HEC-HMS Di DAS Bengawan Solo Hulu. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 20(2), 193.