

Analisa Kebutuhan Instrumentasi Geoteknik Dry Dam Bendungan Sawangan Kabupaten Minahasa Utara

Farhan Zaky*¹, Hari Nugroho², Sutarto Edhisono³

^{1,2,3}Program Magister Rekayasa Bendungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang
e-mail: *Zakyfarhan@gmail.com, Harinugroho66@yahoo.co.id, stoerto@gmail.com

Received 11 April 2023; Reviewed 20 May 2023; Accepted 24 July 2023
Journal Homepage: <http://jurnal.borneo.ac.id/index.php/borneoengineering>
Doi: <https://doi.org/10.35334/be.v7i2.3661>

Abstract

Located in the downstream watershed, Manado city is at risk of hydrometeorological disasters such as flooding every year, especially in conjunction with high tides. One solution to the city's flooding problem is to provide flood water storage by building the Sawangan dry dam in North Minahasa Regency. In building a dam, dam safety is a very important requirement to minimize disaster risks for the community such as property losses and damage to infrastructure downstream of the dam. Dam safety is highly dependent on the accuracy of planning and during construction. The safety of a dam also depends on the operation stage, the implementation of maintenance, as well as intensive and continuous supervision, monitoring the behavior of the dam and its building facilities. The purpose of the geotechnical instrumentation analysis study of Sawangan Dam in North Minahasa Regency is to determine the ideal geotechnical instrumentation needs in the process of optimal and periodic observation of dam behavior. Geotechnical parameters affect dam behavior due to soil strength related to pore water pressure, water seepage, deformation characteristics of foundation and embankment materials during construction and after construction. Determination of the amount of geotechnical instrumentation installed at Sawangan Dam is based on technical data of the dam dimensions. Based on the analysis conducted, the required geotechnical instrumentation components are; pore water pressure gauges, dam deformation gauges installed inside and outside the embankment, groundwater level gauges, seepage gauges, reservoir water level gauges, and other supporting components. By installing geotechnical instrumentation using telemetry systems or integrated computer systems, data acquisition, management and security are easier.

Keywords: *geotechnical instrumentation, soil strength, Sawangan Dam, telemetry*

Abstrak

Terletak di hilir DAS, kota Manado berisiko mengalami bencana hidrometeorologi seperti banjir setiap tahunnya, apalagi bersamaan dengan pasang tinggi. Salah satu solusi permasalahan banjir kota adalah dengan menyediakan tampungan air banjir dengan membangun bendungan kering Sawangan di Kabupaten Minahasa Utara. Dalam membangun bendungan, keamanan bendungan merupakan syarat yang sangat penting untuk meminimalisir resiko bencana bagi masyarakat seperti kerugian harta benda dan rusaknya infrastruktur di hilir bendungan. Keamanan bendungan sangat bergantung pada ketepatan perencanaan dan pada saat pembangunan. Keamanan suatu bendungan juga tergantung pada tahap operasi, pelaksanaan pemeliharaan, serta pengawasan intensif dan berkesinambungan, pemantauan perilaku bendungan dan bangunan fasilitasnya. Tujuan studi analisis instrumentasi geoteknik Bendungan Sawangan di Kabupaten Minahasa Utara untuk menentukan kebutuhan instrumentasi geoteknik yang ideal dalam proses pengamatan perilaku bendungan secara optimal dan berkala. Parameter geoteknik mempengaruhi perilaku bendungan akibat kekuatan tanah yang berhubungan dengan tekanan air pori, rembesan air, karakteristik deformasi pondasi dan bahan timbunan selama konstruksi dan setelah konstruksi. Penentuan jumlah instrumentasi geoteknik yang dipasang di Bendungan Sawangan berdasarkan data teknis dimensi bendungan. Berdasarkan analisis yang dilakukan, komponen instrumentasi geoteknik yang dibutuhkan adalah; alat pengukur tekanan air pori, alat pengukur deformasi bendungan yang dipasang di dalam dan di luar tanggul, alat pengukur tinggi muka air tanah, alat pengukur rembesan, alat pengukur tinggi muka air waduk, dan komponen pendukung lainnya. Dengan memasang instrumentasi geoteknik menggunakan sistem telemetri atau sistem komputer yang terintegrasi, akuisisi data, manajemen dan keamanan lebih mudah dilakukan.

Kata kunci: *geotechnical instrumentation, soil strength, Sawangan Dam, telemetry*

1. Pendahuluan

Bendungan adalah bangunan yang berupa urugan tanah, urugan batu, beton, dan/atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang, atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk (Peraturan Pemerintah No. 37 Tahun 2010 Tentang Bendungan, 2010). Keberadaan suatu bendungan menyimpan potensi yang sangat besar yang dapat memberikan kerugian bagi kehidupan manusia (Juwono & Subagiyo, 2018). Kerusakan atau runtuhnya suatu bendungan dapat terjadi karena: melimpasnya air diatas mercu bendungan (*overtopping*), longsornya lereng bendungan (*sliding*), terbawanya butiran tanah dari tubuh bendungan (*internal erosion atau piping*) dan lain sebagainya. Berdasarkan statistik dan penelitian para ahli, menyatakan bahwa lebih kurang 85% kerusakan bendungan adalah disebabkan oleh pengaruh hidraulik dan rembesan air (Kementerian PUPR, 2017). Menurut Pedoman Instrumentasi Tubuh Bendungan Tipe Urugan dan Tanggul (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004) Instrumentasi geoteknik adalah alat ukur yang digunakan untuk mengukur parameter geoteknik yang terjadi pada bendungan (Ishbaev & Pandjaitan, 2014). Parameter geoteknik tersebut terjadi pada saat konstruksi, pengisian awal, dan saat pengoperasian air waduk (Nala et al., 2021). Pemasangan instrumentasi geoteknik pada tubuh bendungan dan sekitarnya yang meliputi pemasangan alat - alat instrumen pemantau, melakukan pengukuran atau pembacaan instrumen terpasang serta melakukan evaluasi dan analisis terhadap keamanan bendungan (Badan Standarisasi Nasional, 2017). Dengan mengukur parameter geoteknik yang ada pada bendungan maka pengelola bendungan dapat mengetahui perilaku bendungan dan memperkirakan perilaku yang akan terjadi (Pramudawati et al., 2020).

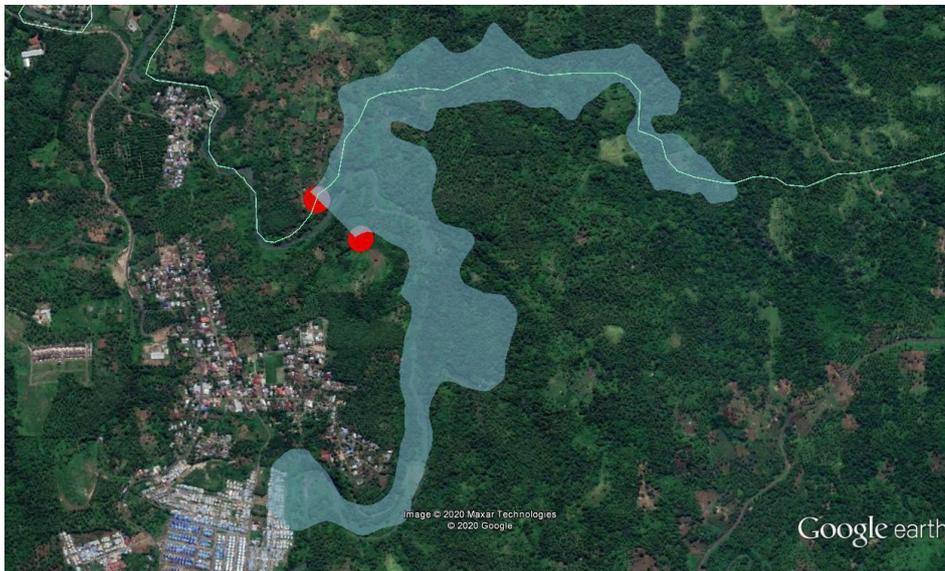
Kota Manado merupakan ibu kota Provinsi Sulawesi Utara yang terletak di bagian hilir dari DAS Tondano, Tikala, Sario, Bailang dan Malalayang. Karena berada di ujung hilir aliran beberapa sungai dari DAS diatas, kondisi Kota Manado terancam oleh bencana hidrometeorologi yakni banjir setiap tahunnya, terlebih pada saat bersamaan dengan air laut pasang. Kerusakan dan kerugian yang diakibatkan hampir terjadi setiap tahun. Banjir terbesar dalam beberapa dasawarsa ini terjadi pada tahun 1996, 2000, 2005 dan tahun 2014 telah menimbulkan kerugian atas harta benda dan hidup manusia (BPBD Provinsi Sulawesi Utara, 2018). Upaya untuk mengatasi permasalahan banjir yang terjadi di kota Mando Provinsi Sulawesi Utara salah satunya adalah menyediakan tampungan air banjir dengan membangun bendungan kering seperti halnya membangun bendungan Ciawi dan bendungan Sukamahi. Bendungan Ciawi dan Sukamahi merupakan bendungan kering (*dry dam*) pertama di Indonesia yang selesai dibangun pada tahun 2022 (Hartono et al., 2022). Bendungan kering ini difungsikan untuk mereduksi banjir bagi kawasan ibukota Jakarta sebesar 35,33% pada kala ulang Q100 tahun, dengan memotong debit puncak banjir yang semula 464,03 m³/dt menjadi 300,08 m³/dt.

Bendungan kering dibangun dengan tujuan utama untuk pengendalian banjir, dimana konsep pemanfaatannya adalah dengan pengaturan elevasi muka air waduk (Sembiring, 2016). Pada saat awal musim hujan, elevasi muka air waduk diatur pada elevasi yang rendah sehingga pada saat debit banjir tiba, air dapat tertampung pada waduk guna mereduksi kawasan hilir dari bendungan akibat debit banjir yang datang. Dengan permasalahan diatas, maka dalam penelitian ini bertujuan untuk menentukan sebuah sistem instrumentasi geoteknik yang ideal untuk Bendungan Sawangan, Kabupaten Minahasa dengan memperhatikan manfaat, menganalisis kebutuhan instrumentasi geoteknik, dan melakukan analisis sistem instrumentasi geoteknik yang ideal untuk Bendungan Sawangan.

2. Metode Penelitian

Rencana lokasi Bendungan Sawangan yang terletak di Sungai Tikala, Sub DAS Tikala, DAS Tondano yang berada di propinsi Sulawesi Utara. Posisi geografis Sulawesi Utara terletak pada 0030'

LU dan 1230127' BT. Wilayah Sungai Tondano, yang berada di wilayah administratif Propinsi Sulawesi Utara terletak pada posisi 00 30' LU dan 1230127' BT, dengan luas total 526.000 km², dimana seluruh wilayah Kota Manado berada di dalamnya. Dimana aliran Sungai Tikala masuk ke Sungai Tondano dan sangat berpengaruh terhadap seringnya kejadian banjir yang ada di Kota Manado.



Gambar 1. Peta Lokasi Pekerjaan Bendungan Sawangan

2.1 Metode Pengerjaan

Data yang dibutuhkan untuk penentuan desain sistem instrumentasi geoteknik yang ideal untuk Bendungan Sawangan. Data yang dibutuhkan adalah data geologi rencana lokasi Bendungan Sawangan, data kondisi topografi rencana lokasi Bendungan Sawangan, profil melintang dan memanjang Bendungan Sawangan, studi-studi terdahulu mengenai Bendungan Sawangan.

Data yang sudah didapat dari langkah pengerjaan sebelumnya akan dianalisa untuk dapat mengetahui permasalahan geoteknik atau kondisi geoteknik seperti apa yang terdapat pada rencana lokasi Bendungan Sawangan. Contoh permasalahan geoteknik pada rencana lokasi bendungan adalah pondasi dangkal, tubuh dan pondasi bendungan tipe urugan, tubuh dan pondasi bendungan tipe beton, galian dan pemotongan lereng, kondisi tekanan pori pada pondasi, besaran nilai permeabilitas pada rencana lokasi dan apakah ada sesar atau tidak pada rencana lokasi bendungan.

2.1.1 Desain Instrumentasi Geoteknik

Setelah diketahui permasalahan geoteknik yang ada pada Bendungan Sawangan, rencana pemasangan instrumentasi geoteknik yang ideal dapat dilakukan analisa. Langkah-langkah pengerjaan dalam desain instrumentasi geoteknik Bendungan Sawangan adalah dengan memilih parameter yang diperlukan dalam pemantauan untuk memperkirakan besarnya perubahan akibat dari gaya gaya yang bekerja. Setelah diketahui parameter yang dipantau untuk memperkirakan besarnya perubahan, lokasi penempatan instrumentasi bendungan sawangan dapat dilakukan dengan mempertimbangkan jenis instrumentasi yang akan dipasang. Instrumentasi yang dipasang sangat berpengaruh terhadap faktor-faktor yang terjadi dilapangan, maka dari itu perlu dicatat semua faktor-faktor lapangan yang mempengaruhi pencatatan hasil bacaan instrumentasi. Sebelum instrumentasi dipasang, alat perlu dilakukan kalibrasi untuk dapat memastikan keabsahan data. Pemasangan instrumentasi dilakukan dengan mematuhi prosedur pemasangan alat sesuai standart yang telah ada. Setelah alat terpasang, diperlukan perencanaan pengumpulan dan pengolahan data hasil pembacaan

alat. Serta diperlukan perhitungan penentuan biaya baik dari pengadaan alat sampai dengan pemasangan dan operasional alat.

2.2 Data-data Penelitian

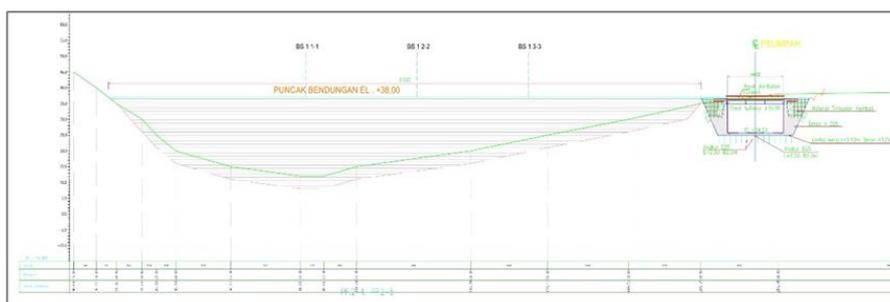
Langkah awal dalam merencanakan kebutuhan Instrumentasi Geoteknik pada Bendungan kering Sawangan sebagai pengendalian banjir kota Manado adalah dengan mengumpulkan data-data yang diperlukan, yakni data detail desain bendungan sawangan baik dari layout posisi bendungan, potongan memanjang, potongan melintang bendungan, serta peta kawasan bendungan. Data lain yang diperlukan yaitu kondisi geologi dan parameter geoteknik.

Parameter geologi dan geoteknik diatas sangat mempengaruhi perilaku bendungan sebagai akibat dari kekuatan geser, koefisien permeabilitas k , dan kompresibilitas (modulus elastisitas E). Parameter geoteknik ini perlu diketahui terutama berkaitan dengan tekanan air pori, rembesan air, karakteristik deformasi pondasi dan bahan timbunan pada saat konstruksi maupun sesudah konstruksi. Menurut Pedoman Instrumentasi Tubuh Bendungan Tipe Urugan dan Tanggul (2004) dalam mendesain instrumentasi geoteknik, dan melakukan evaluasi hasil pengamatan instrumen sangat dibutuhkan pengetahuan dasar tentang geoteknik (Soetjiono, 2010). Oleh sebab itu, kunci keberhasilan melakukan evaluasi perilaku bendungan tipe urugan, dan tanggul terletak pada kejelian tenaga ahli geoteknik dalam melakukan evaluasi hasil pengamatan instrumen (Suprpto et al., 2021).

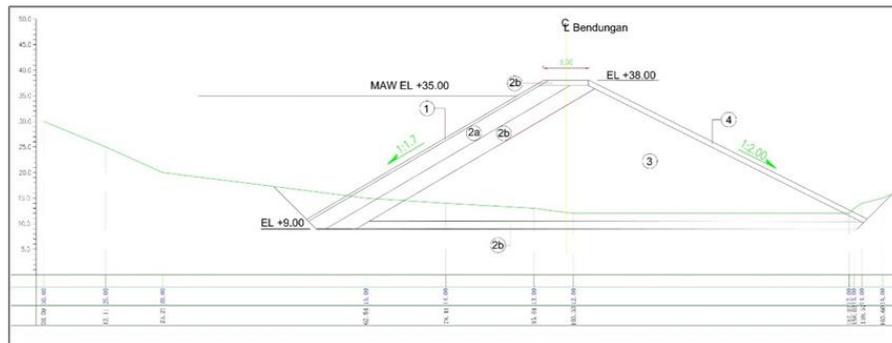


Gambar 2. Denah bendungan Sawangan

Bendungan Sawangan di kabupaten Minahasa didesain dengan panjang 213 meter dan tinggi 29 meter dari dasar sungai. Tipe dari bendungan sawangan merupakan urugan batu dengan pelat muka beton (*Concrete Faced Rockfill Dam*) dengan volume tampungan sebesar 2,5 juta meter kubik. Bendungan dilengkapi dengan bangunan pelimpah (*Spillway*) dengan tipe *Overflow* serta bangunan pengelak yang juga difungsikan sebagai bangunan pengatur muka air waduk.



Gambar 3. Potongan memanjang bendungan Sawangan



Gambar 4. Potongan melintang bendungan Sawangan

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisa permasalahan Geologi

Lokasi Bendungan Sawangan dari hasil penyelidikan geologi berada di wilayah Rote dimana morfologi lembah dan perbukitan di lokasi ini bergelombang rendah. Pola aliran sungai dengan stadia dewasa, sedangkan batuan dasar penyusun pada rencana Bendungan Sawangan adalah batupasir Lapili tuffan dengan warna lapuk coklat kehitaman dan warna segar coklat muda kekuningan. Sifat batuan ini tergolong kompak dengan material berbutir halus hingga sedang.



Gambar 5. Peta Geologi Bendungan Sawangan

Lokasi penyelidikan geoteknik berjumlah 4 titik pada sekitar rencana penempatan tubuh bendungan Sawangan. Penyelidikan dilakukan dengan cara pengeboran untuk mengetahui lithologi batuan tiap kedalaman dan juga nilai SPT.

3.2 Analisa permasalahan Geoteknik

Morfologi penyusun disekitar rencana Bendungan Sawangan adalah endapan aluvial yang terdiri dari berangkal, kerakal, kerikil, pasir, dan lempung. Endapan aluvial secara umum berupa endapan sungai diatas Lapili tuff yang menumpang secara tidak selaras. Endapan sungai tersebut terdiri dari material lempung, pasir, kerikil, kerakal, berangkal yang tidak terkonsolidasi dan bersifat urai sampai agak terurai. Material-material overburden ini dapat digunakan sebagai material konstruksi tubuh bendungan Sawangan.

Hasil pengujian laboratorium material tanah sampel bor dan uji test pit yang dilaksanakan selama investigasi, disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil penyelidikan lab geologi teknik rencana Bendungan Sawangan

NO.	Bore Hole	Depth (m)	NWC %	Gs	Grain Size Distribution Analysis (ASTM D 422)				Atterberg Limits (ASTM D 4318)			
					Gravel %	Sand %	Silt %	Clay %	LL %	PL %	PI %	FI %
					1	TP 1	3	39.28	2.664	0.90	9.00	44.40
2	TP 2	3	36.54	2.667	0.80	6.80	50.10	42.30	58.94	37.56	21.38	11.79

NO.	Bore Hole	Permeability K cm/sec	Triaxial Consolidated - Undrained				Consolidation					
			Total		Effective		eo	Po kg/cm ²	Cc	Cv cm ² /sec	mv cm ² /gr	K cm/sec
			C kg/cm ²	ϕ	C' kg/cm ²	ϕ						
1	TP 1	5.75E-07	0.30	14° 43'	0.30	16° 42'	1.12	1.61	0.78	3.94E-03	7.26E-05	2.95E-07
2	TP 2	3.52E-07	0.26	15° 21'	0.23	18° 15'	1.10	1.76	0.42	3.86E-03	3.01E-05	1.23E-07

Sumber: Hasil penyelidikan laboratorium

Parameter geoteknik diatas sangat mempengaruhi perilaku bendungan sebagai akibat dari kekuatan geser, koefisien permeabilitas k, dan kompresibilitas (modulus elastisitas E).

Parameter geoteknik ini perlu diketahui terutama berkaitan dengan tekanan air pori, rembesan air, karakteristik deformasi pondasi dan bahan timbunan pada saat konstruksi maupun sesudah konstruksi.

3.3 Instrumentasi bendungan Sawangan

Instrumentasi bendungan Sawangan ditentukan berdasarkan perkiraan perilaku pada lokasi yang ditentukan (Pamungkas et al., 2023). Dalam masa konstruksi penimbunan tubuh bendungan serta pekerjaan perkuatan pondasi tubuh bendungan dikhawatirkan dapat terjadi anomali yang berupa perubahan maupun kerusakan yang dapat mengakibatkan kegagalan konstruksi sebagai akibat dari kesalahan manusia, kondisi alam, maupun akibat kesalahan alat konstruksi. Pembacaan instrumentasi yang telah terpasang selama konstruksi sampai dengan pasca konstruksi akan memberikan data kondisi aktual sebagai evaluasi keamanan bendungan.

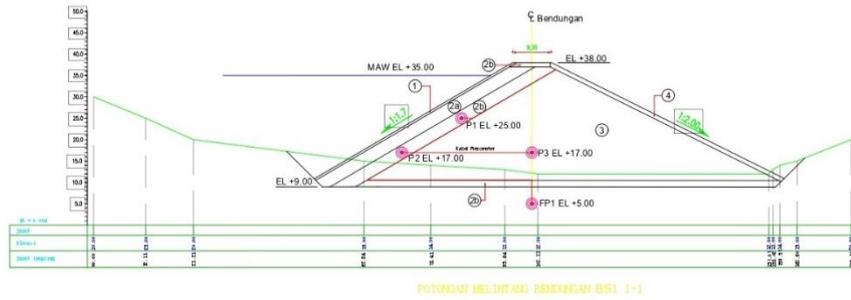
3.3.1 Tekanan Air pori

Pemilihan alat ukur tekanan air pori menggunakan jenis Vibrating Wire Piezometer adalah karena kemudahannya dalam pelaksanaan konstruksi dengan waktu baca yang relatif paling cepat dari jenis alat ukur tekanan pori lainnya. Untuk menghindari rusaknya sistem elektronis ini terhadap bahaya petir, maka kabel-kabel perlu dibungkus cukup rapat serta perlu dipasang alat penangkal petir. Lokasi penempatan Vibrating Wire Piezometer bendungan Sawangan yaitu pada dua Cross Section BS1 1-1 dan BS1 3-3 dimana masing masing dari Cross Section berjumlah 4 dan 3 alat.

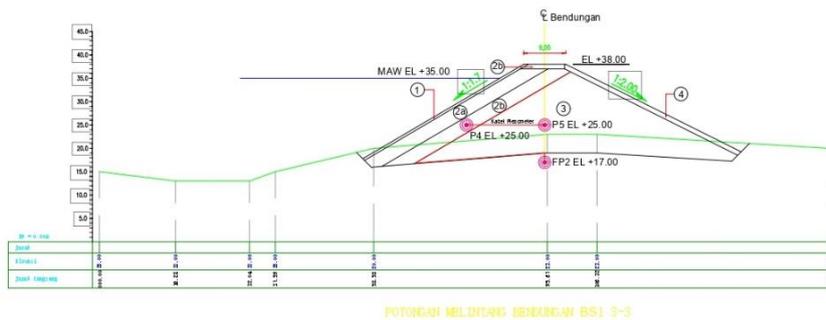
Tabel 2. Kebutuhan alat Vibrating Wire Piezometer Bendungan Sawangan

Kode Alat	Lokasi	Jenis	Koordinat		El. Alat	El. MAB	Kapasitas (kPa)	Pabrikan (kPa)
			X	Y				
FP. 1	BS1 1-1	Low Air Entry	709803.55	160778.06	5.00		315.6	500
P.1	BS1 1-1	High Air Entry	709818.02	160770.15	25.00		120.0	300
P.2	BS1 1-1	High Air Entry	709830.18	160763.53	17.00		198.2	300
P.3	BS1 1-1	High Air Entry	709803.55	160778.06	17.00	37.25	198.2	300
FP. 2	BS1 3-3	Low Air Entry	709841.86	160848.29	17.00		198.2	300
P.4	BS1 3-3	High Air Entry	7098	160840.28	25.00		120.0	300
P.5	BS1 3-3	High Air Entry		160848.29	25.00		120.0	300

Sumber: Hasil perhitungan



Gambar 6. Penempatan Vibrating Wire Piezometer BS1 1-1



Gambar 7. Penempatan Vibrating Wire Piezometer BS1 3-3

Jumlah alat *Vibrating Wire Piezometer* bendungan Sawangan pada ke dua *cross section* berbeda jumlah pemasangan karena ketinggian timbunan bendungan yang tidak sama. Pada *Cross Section* BS1 1-1 dengan tinggi bendungan 29 m dipasang 2 alat pada zona filter untuk dapat mendeteksi tekanan air pori saat muka air waduk tinggi dan saat rendah, 1 alat pada zona timbunan batu, dan 1 alat pada batuan pondasi. Sedangkan pada *Cross Section* BS1 3-3 dengan tinggi bendungan 18 m dipasang 1 alat pada zona filter, 1 alat pada zona timbunan batu, dan 1 alat pada batuan pondasi. Pada zona timbunan batu dipasang alat dengan tujuan agar mengevaluasi kemampuan horizontal drain dalam membuang rembesan air waduk, apabila didapatkan bacaan tekanan air pori tinggi mengindikasikan horizontal drain dalam kondisi tidak baik atau tersumbat.

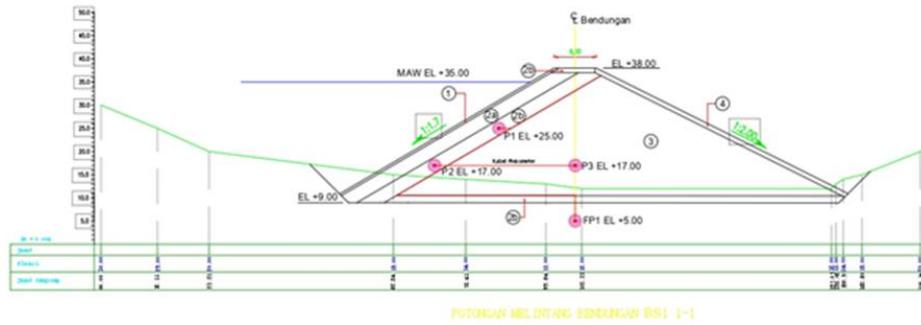
Open Stand Pipe Piezometer atau pisometer pipa tegak perlu dipasang pada komponen instrumentasi bendungan Sawangan dimana berfungsi juga untuk mengukur tekanan air pori. Alat ini tergolong sederhana dan dengan umur guna alat yang lama sehingga dapat dipasang pada lapisan tanah yang *pervious* atau *semi pervious* dan sebagai data pembanding tekanan air pori dengan alat *Vibrating Wire Piezometer*. Pemilihan lokasi pisometer pipa tegak pada *Cross Section* BS1 2-2 dikarenakan berada diantara penempatan alat *Vibrating Wire Piezometer*, sehingga angka tekanan pori pada tubuh bendungan maupun pada pondasi bendungan dapat terwakilkan dengan akurat.

Adapun kebutuhan alat *Open Stand Pipe Piezometer* adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Kebutuhan alat *Open Stand Pipe Piezometer* Bendungan Sawangan

Kode Alat	Lokasi	Jenis	Koordinat		El. Alat	El. MAB	Kapasitas (kPa)	Pabrikan (kPa)
			X	Y				
OSP. 1	BSI 2-2	Low Air Entry	709820.41	160814.18	11.00	37.25	256.8	300
OSP. 2	BSI 2-2	High Air Entry	709820.41	160814.18	20.00		168.8	300

Sumber: Hasil perhitungan



Gambar 8. Penempatan *Open Stand Pipe Piezometer* BS1 2-2

Pemilihan lokasi Pisometer pipa tegak pada *Cross Section* BS1 2-2 berada diantara penempatan alat *Vibrating Wire Piezometer* adalah sebagai data pembandingan bacaan tekanan air pori dari alat *Vibrating Wire Piezometer* apabila didapati alat mengalami kerusakan, sehingga angka tekanan pori pada tubuh bendungan maupun pada pondasi bendungan masih dapat dipantau. Alat dipasang pada zona timbunan batu dan batuan pondasi dengan satu lubang yang lurus keatas untuk memantau tekanan air pori pada kedua zona ini. Sedangkan pada zona filter karena didesain dengan kemiringan, maka alat tidak dapat dipasang. Pada zona timbunan batu dipasang alat dengan tujuan agar mengevaluasi kemampuan horizontal drain dalam membuang rembesan air waduk, apabila didapatkan bacaan tekanan air pori tinggi mengindikasikan horizontal drain dalam kondisi tidak baik atau tersumbat.

3.3.2 Deformasi vertikal dan horizontal

Deformasi atau perubahan bentuk yang sangat mungkin terjadi pada bendungan sawangan terdapat pada material timbunan bendungan sebagai akibat dari beban konstruksi dan pasca konstruksi, baik secara vertikal maupun horizontal (Swanandhia & Hudaya, 2022). Pemilihan jenis instrumen deformasi pada tubuh bendungan Sawangan yang digunakan dapat dikombinasikan menjadi satu alat pada lokasi yang sama yaitu alat Ekstensometer dan Inclinomometer, dimana pelat magnet dan dattum pada Ekstensometer di pasang pada pipa Inclinomometer.(Dunnicliff, 1993). Sedangkan untuk menghitung besarnya pergerakan permukaan tanah (arah vertical dan horizontal) di sekeliling struktur bendungan Sawangan perlu dipasang patok geser (*Surface monuments*) Lokasi pemansangan alat Inclinomometer Multilayer Settlement berada 13 meter ke arah sandaran kanan dari *Cross Section* BS1 1-1. Lokasi ini merupakan titik paling dalam dari timbunan tubuh bendungan, sehingga dapat diperoleh data pergerakan tubuh bendungan baik pergerakan vertikal maupun horizontal dengan akurat.

Tabel 4. Kebutuhan alat Inclinometer Multilayer Settlement Bendungan Sawangan

Kode Alat	Koordinat		El. Alat	Kode Alat	Koordinar		El. Alat
	X	Y			X	Y	
Datum			4.50	Plat magnet 3			20.00
Plat magnet 1	709809.81	160789.36	8.00	Plat magnet 4	709809.81	160789.36	26.00
Plat magnet 2			14.00	Plat magnet 5			32.00

Sumber: Hasil perhitungan



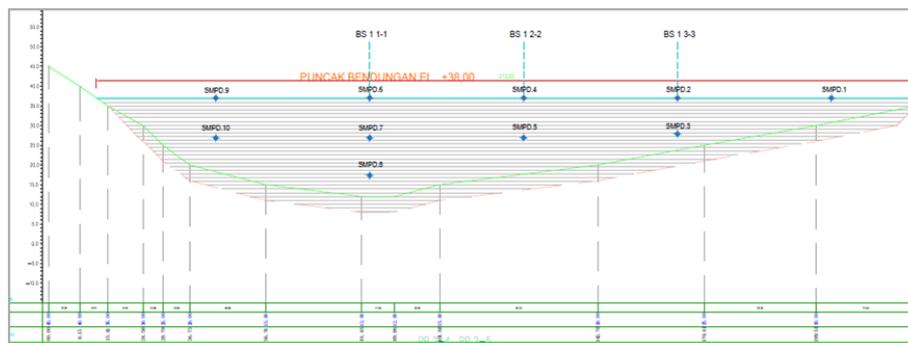
Gambar 9. Penempatan Inclinometer Multilayer Settlement

Instrumentasi patok geser dipasang berfungsi untuk memantau retakan memanjang pada puncak bendungan sebagai evaluasi terhadap data instrumen patok geser (berupa data deformasi vertikal, deformasi lateral ke arah udik/hilir bendungan, dan deformasi longitudinal yang sejajar tubuh bendungan) yang terpasang pada permukaan bagian hilir bendungan sehingga pemantauan deformasi dapat dilakukan pada lereng sebelah hilir. Sedangkan dibagian hulu hanya dapat dipasang pada lereng sebelum tergenang air waduk

Tabel 5. Kebutuhan alat Patok Geser Bendungan Sawangan

Alat	Koordinat		EL. penempatan	Keterangan	Alat	Koordinat		EL. penempatan	Keterangan
	X	Y				X	Y		
SMP U 1	709869.56	160878.98	36.00	Upstream	SMP D 4	709818.67	160815.13	38.00	Downstream
SMP U 2	709848.81	160844.49	36.00	Upstream	SMP D 5	709801.11	160824.71	28.00	Downstream
SMP U 3	709829.55	160809.19	36.00	Upstream	SMP D 6	709799.61	160780.20	38.00	Downstream
SMP U 4	709810.50	160774.26	36.00	Upstream	SMP D 7	709782.07	160789.78	28.00	Downstream
SMP U 5	709791.44	160739.33	36.00	Upstream	SMP D 8	709764.50	160799.36	18.00	Downstream
SMP U 1	709857.19	160885.73	38.00	Downstream	SMP D 9	709780.56	160745.27	38.00	Downstream
SMP U 2	709837.93	160850.43	38.00	Downstream	SMP D 10	709763.00	160754.85	28.00	Downstream
SMP U 3	709820.37	160860.01	28.00	Downstream	SMP D 11				

Sumber: Hasil perhitungan



Gambar 10. Penempatan Patok Geser (Surface Monuments)

Pada hulu tubuh bendungan (*Upstream*) jumlah alat yang dapat dipasang hanya terbatas karena terhalang oleh genangan waduk. Sebaliknya, pada lereng bendungan hilir (*Downstream*) jumlah patok geser dapat dipasang lebih banyak. Jumlah pemasangan patok geser pada bendungan Sawangan adalah 15 patok dimana terdapat 5 buah patok yang berada pada lereng bendungan hulu

(*Upstream*) dan 10 buah patok yang berada pada lereng bendungan hilir (*Downstream*). Penempatan patok geser dibuat sejajar antara posisi patok pada hulu dan pada hilir bendungan dengan membentuk suatu poligon tertutup

3.3.3 Muka air tanah

Instrumen pemantauan *Observation Well* dipasang untuk mengamati atau memonitor kenaikan muka air tanah di dalam lapisan tanah atau batuan akibat penggenangan waduk dengan cara membuat lubang bor dan muka air tanah diukur menggunakan alat *deep meter*. Pengamatan ini berguna untuk mendeteksi adanya potensi zona lolos air pada batuan di bawah tubuh bendungan di bagian hilir yang dapat mengakibatkan kebocoran waduk.

Tabel 6. Kebutuhan alat Observation Well Bendungan Sawangan

Alat	Koordinat		Kedalaman	El. Dasar alat
	X	Y		
OW 1	709758.62	160715.69	20	20.00
OW 2	709746.52	160789.46	15	2.00
OW 3	709796.39	160859.58	15	5.00
OW 4	709840.19	160899.78	15	5.00
OW 5	709799.06	160926.85	15	5.00
OW 6	709803.86	160987.05	15	7.00

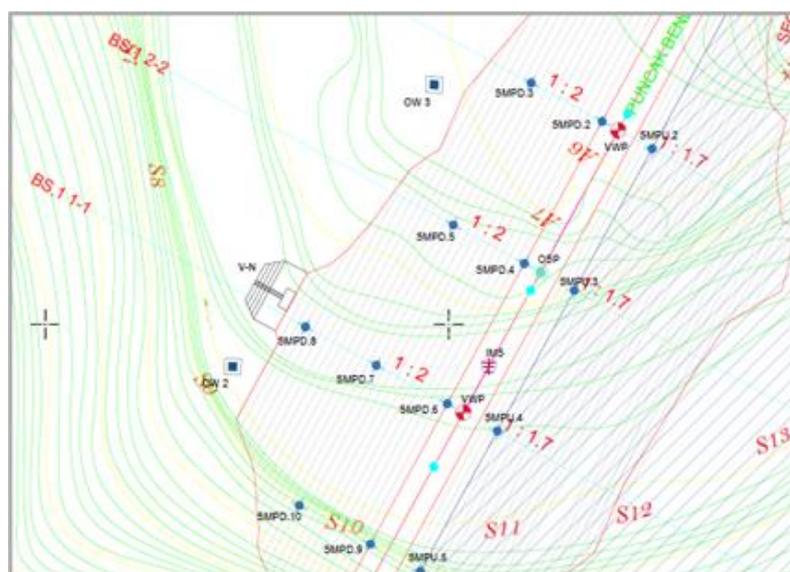
Sumber: Hasil perhitungan

Pada Bendungan Sawangan, Observation Well berjumlah 6 buah dimana 4 buah bertujuan untuk memantau muka air tanah di kaki dan sandaran bendungan dan 2 buah untuk memantau muka air tanah di sekitar dinding spillway dengan kedalaman 20 meter.

3.3.4 Alat ukur rembesan

Alat ukur rembesan menggunakan ambang V-notch perlu dipasang pada bendungan Sawangan untuk mengantisipasi kerusakan tubuh bendungan yang disebabkan oleh pengaruh hidraulik dan rembesan air yang biasanya sulit dihitung secara teliti, baik dalam masa konstruksi maupun setelah konstruksi. Rembesan air yang diukur harus dilakukan secara kontinu terhadap kuantitas dan kualitas. Pengujian unsur unsur kimia dan kadar endapannya dipantau untuk mendapatkan :

- Gejala pelarutan pada fondasi batuan yang dapat mengakibatkan kekuatan geser menurun dan permeabilitas fondasi meningkat, kekuatan geser menurun, dan permeabilitas fondasi meningkat.
- Gejala erosi buluh (piping) pada tubuh atau fondasi bendungan.



Gambar 11. Penempatan alat ukur rembesan (V-Notch)

Pengamatan laju rembesan dapat dikorelasi dengan pengukuran tekanan pisometer, dan digunakan untuk memeriksa efektivitas saluran drainase, sumur pematas, dan dinding-halang. Pengukuran rembesan biasanya dilakukan selama umur layan bendungan untuk memantau kinerja jangka panjang. Sumur pematas, drainase pengeluaran (outlet), saluran, dan parit biasanya digunakan untuk mengukur rembesan tempat-tempat yang mengalami rembesan.

Alat ukur ini ditempatkan di kaki bendungan pada celah sungai dengan posisi lebih rendah dari horizontal drain (zona filter pasir). Penempatan lokasi ini dipilih agar zona filter pasir pada tubuh bendungan dapat menyalurkan rembesan air waduk dan dibawa menuju V-notch secara gravitasi sehingga rembesan air waduk dapat diukur

3.3.5 Kelengkapan alat ukur lain

- Instrumentasi Automatic Water Level Recorder (AWLR)
Untuk mendapatkan data fluktuasi muka air waduk secara real time dengan jangka waktu tertentu, maka alat ini perlu dipasang pada area genangan waduk. Data yang diperoleh juga dapat digunakan sebagai upaya tindak darurat atau Early warning System ketika air waduk mulai tinggi atau datang banjir.
- Instrumentasi tower penangkal petir
Fungsi dari alat ini adalah untuk meredam pengaruh petir di area bendungan Sawangan yang dapat merusak peralatan instrumentasi Vibrating Wire Piezometer. Jumlah alat penangkal petir yang digunakan yaitu satu set dengan jarak radius 250 m yang dipasang pada area tinggi di atas galian Spillway
- Instrumentasi Stasiun Klimatologi
Stasiun Klimatologi perlu dipasang sebagai kelengkapan Instrumentasi Bendungan Sawangan untuk mengukur intensitas hujan, kecepatan angin, suhu udara, dll pada daerah sekitar Bendungan Sawangan. Lokasi pemasangan stasiun klimatologi pada bendungan Sawangan diletakkan pada area terbuka yang tidak terpengaruh oleh bangunan atau pepohonan agar data yang di hasilkan akurat.

Tabel 7. Rekapitulasi Instrumentasi Bendungan Sawangan

Instrumen yang dipasang		Jumlah	Keterangan Lokasi
Tekanan Air Pori	Vibrating Wire Piezometer	7	2 di pondasi, 5 di timbunan
	Open Standpipe Piezometer	2	1 di pondasi, 1 di timbunan
Deformasi	Inclinometer Multilayer Settlement	1	1 tempat dengan 5 pelat magnet dam 1 dattum
	Patok Geser & Brench Mark	15	5 di hulu bendungan 10 di hilir bendungan
Muka Air Tanah	Observation Well	6	4 di kaki bendungan 2 di sekitar spillway
Rembesan air	V-Notch	1	Di hilir (kaki bendungan)
	Automatic Water Level Recorder	1	Di area genangan
Kelengkapan	Tower penangkal petir	1	Di atas area spillway
	Stasiun Klimatologi	1	Area terbuka

Sumber: Hasil perhitungan

Instrumentasi yang akan dipasang pada bendungan kering Sawangan didasarkan pada analisa kebutuhan alat, dari kondisi geologi dan geoteknik. Didapatkan bahwa parameter utama yang dipantau untuk keamanan bendungan Swangan terdiri dari parameter pengukuran tekanan air pori, pengukuran deformasi, pengukuran muka air tanah, dan pengukuran rembesan air. Sedangkan parameter tambahan terdiri dari alat ukur kegempaan, pengukuran muka air waduk, penangkal petir, serta stasiun Klimatologi.

3.4 Pemasangan Instrumentasi bendungan Sawangan

Sebelum instrumentasi Bendungan Sawangan dipasang, diperlukan terlebih dahulu desain dan jadwal pemasangan dengan mengikuti pedoman seperti petunjuk instruksi pabrik pembuat alat, dan kondisi geologi yang khusus. Prosedur tertulis mencakup daftar terperinci dari material, dan alat yang diinginkan. Formulir data pemasangan perlu dipersiapkan untuk dokumentasi faktor-faktor pengaruh data terukur. Peralatan instrumentasi harus dipasang oleh personel proyek atau konsultan instrumentasi yang telah berpengalaman dan harus dikoordinasikan dengan kontraktor pelaksana termasuk pengaturan untuk jalan masuk, keamanan personel, dan perlindungan instrumen sementara ataupun permanen serta menghindari kerusakan.

3.5 Pembacaan dan pelaporan instrumentasi bendungan Sawangan

Pembacaan instrumentasi bendungan merupakan faktor terpenting dalam hal pengelolaan dan berlanjutnya kinerja dari bendungan (Fischer et al., 2021). Hal ini merupakan aktualisasi dari pemantauan kinerja dan pengamanan bendungan itu sendiri. Beberapa hal yang penting yang perlu diperhatikan dalam pembacaan instrumentasi adalah mengenai kalibrasi awal dari alat yang akan dibaca, pembacaan awal, program pelatihan petugas dan frekuensi pembacaan instrumen.

3.5.1. Pembacaan Awal

Pembacaan awal instrumen hendaknya dilakukan secara cermat dan bertahap, karena digunakan sebagai rujukan (dattum) untuk pembacaan selanjutnya. Disamping itu, kajian teknis perilaku bendungan pada umumnya cenderung menggunakan atau berdasarkan ada tidaknya perubahan-perubahan kecendrungan perilaku yang terjadi daripada angka pembacaan yang absolut

3.5.2. Frekuensi Pembacaan

Frekuensi pembacaan pada kondisi normal ditentukan berdasarkan kebutuhan, yakni dengan mempertimbangkan faktor-faktor tingkat resiko dan kelas bahaya bendungan Sawangan, dimensi bendungan dan volume tampungan waduk, serta tingkat permasalahan bendungan yang bersangkutan.

Pada kondisi tidak normal atau kondisi khusus, frekuensi pembacaan perlu ditingkatkan guna mengantisipasi hal-hal yang tidak diinginkan yang sewaktu-waktu dapat terjadi. Kondisi khusus adalah kondisi internal dan atau eksternal di luar kebiasaan yang dapat mempengaruhi atau “mengancam” keamanan bendungan, sebagian atau keseluruhan, dan biasanya ditunjukkan oleh adanya penyimpangan-penyimpangan secara signifikan terhadap pola atau kecenderungan perilaku atau parameter-parameter yang telah ditetapkan di dalam desain.

Tabel 8. Jadwal Pemantauan Instrumentasi dan Inspeksi kondisi normal

Jenis Pengukuran	Instrumen (Pengukuran)	Konstruksi	Pengisian Awal	Tahap	Operasi Selanjutnya
				Tahun-1 Operasi	
Defleksi/ Deformasi	Pendulum	1x/minggu	Harian selama pengisian atau elevasi tertentu	1x/bulan	1x/bulan
	Patok geser (triangulasi)	1x/minggu	1x/minggu	1x/bulan	2x setahun saat waduk penuh
Tegangan/ Regangan/ Suhu	Deformasi	1x/minggu	1x/minggu	1x/bulan	1x/ 3 bulan
	Ekstensometer (multi titik)	1x/minggu	1x/minggu	1x/bulan	1x/ 3 bulan
Pisometrik	Stressmeter	1x/minggu	1x/minggu	1x/bulan	1x/ 3 bulan
	Strainmeter	1x/minggu	1x/minggu	1x/bulan	1x/ 3 bulan
Rembesan	Termometer	1x/minggu	1x/minggu	1x/bulan	1x/ 3 bulan
	Gaya angkat	1x/minggu	1x/hari	1x/minggu	2x/bulan
Inspeksi	Piezometer	1x/minggu	1x/hari	1x/minggu	2x/bulan
	Visual	1x/bulan	1x/hari	1x/minggu	1-2x/bulan

Sumber: Hasil perhitungan

Bendungan Sawangan (*Dry Dam*) dengan data teknis tubuh bendungan dan tampungan waduk yang tidak terlalu besar tidak memerlukan perhatian khusus pada proses pemantauan dan frekuensi pembacaan alat seperti halnya pada bendungan bendungan besar di Indonesia. Maka frekuensi pembacaan Instrumentasi yang dilakukan tidak memerlukan waktu yang cepat.

3.6 Rencana Anggaran Biaya Instrumentasi

Perhitungan rencana anggaran biaya pekerjaan instrumentasi bendungan Sawangan didasarkan pada kuantitas alat yang akan dipasang, termasuk biaya pemasangan dan kalibrasi alat serta untuk komponen jangka panjang dalam pemeliharaan peralatan. Perhitungan mengacu pada Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 1 tahun 2022 tentang Pedoman Penyusunan Perkiraan Biaya Pekerjaan Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat. Adapun perhitungan total biaya Instrumentasi pada bendungan Sawangan adalah sebesar Rp. 2,548,814,000.00 (Dua milyar lima ratus empat puluh delapan juta delapan ratus empat belas ribu rupiah).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa yang dilakukan, maka kebutuhan instrumentasi geoteknik yang ideal untuk Bendungan kering (*Dry Dam*) Sawangan dengan tipe *Concrete Face Rockfill Dam* (CFRD) atau bendungan urugan batu dengan pelat muka beton terdiri dari alat ukur Tekanan Air Pori, yaitu *Vibrating Wire Piezometer* (2 pada pondasi, 5 pada timbunan) dan *Open Standpipe Piezometer* (1 pada pondasi, 1 pada timbunan), alat ukur Deformasi Bendungan yaitu *Inclinometer Multilayer Settlement* 1 set dan Patok Geser (5 pada hulu, 10 pada hilir bendungan), alat ukur muka air tanah yaitu *Observation Well* (4 pada kaki bendungan, 2 sekitar *Spillway*), alat ukur rembesan air yaitu *V-Notch* 1 buah (hilir/kaki bendungan), alat ukur muka air waduk yaitu *Automatic Water Level Recorder* 1 buah (pada area genangan), alat pengaman petir yaitu tower penangkal petir 1 buah (diatas area *Spillway*), serta kelengkapan alat yaitu Stasiun Klimatologi 1 set (area terbuka). Sistem instrumentasi geoteknik yang direncanakan terpasang pada Bendungan Sawangan didesain dengan sistem telemetri atau terintegrasi sistem komputer untuk mempermudah dalam perolehan data, pengelolaan, serta pengamanannya dengan memastikan alat telah terkalibrasi, pelaksanaan pembacaan awal alat, program pelatihan petugas dan frekuensi pembacaan instrumen yang tepat.

Daftar Pustaka

- Badan Standarisasi Nasional. (2017). Persyaratan perancangan geoteknik. In *SNI* (Vol. 8460, p. 2017). Badan Standarisasi Indonesia.
- Dunncliff, J. (1993). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John Wiley & Sons.
- Fischer, F., Miller, G. J., & Baihaqi, I. (2021). *Evolusi Analisis Kebijakan di Belanda: Handbook Analisis Kebijakan Publik*. Nusamedia.
- Hartono, A. O., Istiarto, I., & Sujono, J. (2022). Redaman Banjir Pasca Pembangunan Bendungan Ciawi dan Sukamahi. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*, 147–152.
- Ishbaev, A., & Pandjaitan, N. H. (2014). Evaluasi Keamanan DAM Jatiluhur Berbasis Indeks Resiko. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 4(2), 111.
- Juwono, P. T., & Subagiyo, A. (2018). *Sumber Daya Air dan Pengembangan Wilayah: Infrastruktur Keairan Mendukung Pengembangan Wisata, Energi, dan Ketahanan Pangan*. Universitas Brawijaya Press.
- Kementerian PUPR. (2017). *Modul Instrumentasi Bendungan Urugan Pelatihan Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar*. Pusat Pendidikan Dan Pelatihan Sumber Daya Air Dan Konstruksi.

- Nala, I. M. A., Sangkawati, S., & Putranto, T. T. (2021). Pengaruh Muka Air Waduk Saat Pengisian Awal Terhadap Deformasi dan Rekahana pada Tubuh Bendungan (Studi Kasus: Bendungan Titab). *Jurnal Geosains Dan Teknologi*, 4(3), 168–182.
- Pamungkas, Z. A. A., Nugroho, H., & Sadono, K. W. (2023). Penilaian Indeks Risiko Metode Modifikasi Andersen dan Metode Modifikasi ICOLD untuk Bendungan Palasari, Bendungan Gerokgak dan Bendungan Benel. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(1).
- Peraturan Pemerintah No. 37 Tahun 2010 tentang Bendungan, Pub. L. No. 37 (2010).
- Pramudawati, M. A. H., Tanjung, M. I., & Ghafara, R. (2020). Penilaian Risiko Keamanan Bendungan di Jawa Timur. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 11(2), 93–102.
- Sembiring, C. E. (2016). *Analisis Debit Air Irigasi (Suplai Dan Kebutuhan) Di Sekampung Sistem*. Universitas Lampung.
- Soetjiono, C. (2010). Gagasan Revitalisasi Bendungan Urugan dalam Mendukung Pengelolaan Sumber Daya Air. *Jurnal Sumber Daya Air*, 6(1), 59–74.
- Suprpto, R. E., Japarussidik, J., Sriyana, S., & Sadono, K. W. (2021). Penilaian Risiko Bendungan Pelaparado Berbasis Metode Modifikasi ICOLD dan Metode Indeks Risiko. *TEKNIK*, 42(2), 226–235.
- Swanandhia, R., & Hudaya, R. A. (2022). *Analisis Daya Dukung Tanah Menggunakan Matras Bambu Terhadap Beban Struktur Atas Pada Proyek Jalan Tol Semarang–Demak Seksi 1*. Universitas Islam Sultan Agung.