PERAN INFRASTRUKTUR SUMBER DAYA AIR PADA SAAT BENCANA HIDROMETEOROLOGI ACEH: STUDI KASUS BENDUNGAN RUKOH

Ni Made Sumiarsih[1)]; Asyari[2)]; Variadi[2)]; Khairul Iqbal[3)]

1) Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum
2) Balai Wilayah Sungai Sumatera 1, Kementerian Pekerjaan Umum
3) Fakultas Teknik Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia

**Corresponding author: khairuliqbal@usk.ac.id*
Banda Aceh, Indonesia
Diterima: ;Direvisi: ; Disetujui:

Intisari

Bencana hidrometeorologi yang melanda Aceh pada November 2025 menimbulkan banjir dan longsor di sejumlah kabupaten, namun wilayah hilir Bendungan Rukoh di Kabupaten Pidie, yaitu Kecamatan Kota Bakti hingga Beureunuen, dilaporkan tidak mengalami luapan sungai yang berarti. Penelitian ini bertujuan menganalisis peran fungsi pengendalian banjir Bendungan Rukoh pada kejadian tersebut menggunakan data primer pencatat curah hujan otomatis dan pencatat muka air otomatis periode 20 November sampai 20 Desember 2025 sebanyak 744 data jam-jaman, yang divalidasi silang dengan lengkung elevasi, luas, dan tampungan waduk. Metode yang digunakan adalah neraca air waduk dengan asumsi pelepasan air nol selama pengisian awal, dilengkapi tinjauan kajian keruntuhan bendungan dan rencana tanggap darurat sebagai pembanding kesiapsiagaan. Hasil menunjukkan hujan ekstrem 25 sampai 27 November 2025 mencapai 273,6 mm dalam tiga hari dan memicu debit masuk puncak 27,7 m^3/detik. Elevasi muka air waduk naik 4,46 m dengan penambahan tampungan 2,87 juta m^3 yang seluruhnya tertahan karena bukaan pelepasan tertutup, sehingga tidak terjadi pelepasan air ke hilir. Keterisian waduk pada akhir pengamatan baru 6,56% dari kapasitas 128,66 juta m^3, sehingga masih tersedia ruang tampung kosong sekitar 120 juta m^3. Mekanisme ini berupa retensi total yang bersifat sementara dan berbeda dari redaman parsial pada operasi normal. Skenario keruntuhan hipotetis menghasilkan debit puncak 13.700 sampai 65.700 m^3/detik dengan 104.015 jiwa berisiko, sehingga kesiapsiagaan tetap menjadi prioritas meskipun kinerja pengendalian banjir tahap pengisian awal tergolong baik.

***Kata Kunci**: Bendungan Rukoh, pengendalian banjir, bencana hidrometeorologi, neraca air waduk, rencana tanggap darurat*

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global secara konsisten meningkatkan intensitas dan frekuensi kejadian hujan ekstrem, sehingga risiko banjir di berbagai Daerah Aliran Sungai (DAS) turut meningkat, termasuk di Sumatra dan Aceh (Aldrian & Syamsudin, 2020; Kurniadi et al., 2024). Pada November 2025, Provinsi Aceh mengalami bencana hidrometeorologi berskala luas yang berdampak pada jalan, jembatan, sungai, dan jaringan irigasi. Hingga pertengahan Januari 2026 tercatat 523 titik terdampak, terdiri atas 465 titik banjir dan 58 titik longsor, dengan penanganan darurat kebutuhan dasar masyarakat di Aceh Tamiang, Aceh Utara, Pidie, Pidie Jaya, dan Bireuen (Balai Wilayah Sungai Sumatera I [BWS Sumatera I], 2026).

Bendungan berperan sebagai infrastruktur multiguna (*multipurpose*) yang mendukung penyediaan air baku, irigasi, konservasi sumber daya air, pembangkit listrik, sekaligus pengendalian banjir (Kwak, 2021; Shrestha & Kawasaki, 2020), sebagaimana juga diterapkan pada skema operasi bendungan multiguna berbasis terowongan interkoneksi di Aceh (Iqbal, Abduh, et al., 2023; Variadi et al., 2024). Salah satu infrastruktur sumber daya air strategis di Kabupaten Pidie adalah Bendungan Rukoh yang dibangun antara lain untuk fungsi pengendalian banjir di sepanjang Krueng Rukoh. Menurut pemberitaan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (8 Februari 2025), bendungan ini telah selesai dibangun. Bendungan memasuki tahap pengisian awal (*initial impounding*) sejak awal tahun 2025

dan diresmikan oleh Presiden Republik Indonesia pada 10 Juli 2026.

Sebagian besar kajian hidrologi waduk berfokus pada kondisi operasi normal, sementara tahap *initial impounding* — yaitu periode pengisian awal waduk pascakonstruksi hingga tercapainya elevasi operasi — masih relatif jarang diteliti secara mendalam, padahal tahap ini memiliki karakteristik hidrologi khas dan berimplikasi langsung terhadap keselamatan bendungan serta kesiapan fungsi pengendalian banjir sejak dini (Rashidi & Haeri, 2017; Luo et al., 2015). Fungsi awal pengendalian banjir selama pengisian awal juga belum banyak dievaluasi secara kuantitatif berbasis data lapangan (Shrestha & Kawasaki, 2020), padahal area tampungan sementara dapat meredam limpasan permukaan (Roberts et al., 2023).

Pada kejadian November 2025, wilayah hilir Bendungan Rukoh, yaitu Kecamatan Kota Bakti hingga Beureunuen, dilaporkan tidak mengalami luapan Krueng Rukoh yang berarti. Kondisi ini mendorong penelusuran kuantitatif kinerja bendungan pada periode tersebut menggunakan data pemantauan instrumentasi. Kebaruan makalah ini terletak pada (1) pemanfaatan data observasi jam-jaman *Automatic Rainfall Recorder* (ARR) dan *Automatic Water Level Recorder* (AWLR) selama tahap *initial impounding*; dan (2) penyandingan kinerja operasional tersebut dengan kajian keruntuhan bendungan dan rencana tanggap darurat resmi sebagai dasar kesiapsiagaan.

Pertanyaan penelitian meliputi pola hujan penyebab bencana, respons *inflow* dan tampungan waduk, keterkaitannya dengan kondisi hilir, serta kerangka Rencana Tanggap Darurat (RTD) untuk kondisi ekstrem berupa *overtopping* atau potensi keruntuhan. Penelitian ini bertujuan (1) menganalisis hubungan antara curah hujan, debit *inflow*, dan penambahan tampungan Bendungan Rukoh selama kejadian November 2025 berdasarkan data primer ARR–AWLR; (2) mendokumentasikan kinerja fungsi pengendalian banjir dan keterkaitannya dengan kondisi hilir Kecamatan Kota Bakti–Beureunuen; dan (3) merangkum kerangka RTD sebagai bahan diskusi kesiapsiagaan bencana. Analisis dilakukan dengan pendekatan neraca air waduk, dan hasilnya diharapkan menjadi dasar evaluasi kinerja pengendalian banjir bendungan secara berkelanjutan.

METODOLOGI

Lokasi dan Data Penelitian

Bendungan Rukoh terletak di Desa Alue, Kecamatan Titeue, Kabupaten Pidie, pada aliran Krueng Rukoh (Wilayah Sungai Aceh Meureudu) dengan dukungan suplai tambahan air dari Bendung Pengarah Krueng Inong di Kecamatan Tiro. Bendungan bertipe urugan zonal dengan inti tanah kedap air, setinggi 84,90 m dan bertampungan 128,66 juta m^3 pada Muka Air Normal (MAN) +122,00 m (Tabel 1) (BWS Sumatera I, t.t.-a). Bendungan Rukoh dipilih sebagai lokasi kajian karena berada pada tahap pengisian awal saat hujan ekstrem November 2025 terjadi, memiliki instrumentasi ARR dan AWLR jam-jaman, serta wilayah hilirnya dilaporkan tidak mengalami luapan.

Penelitian ini menggunakan data pemantauan Bendungan Rukoh sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Elevasi kontrol Waduk Rukoh berdasarkan kurva tampungan adalah *Low Water Level* (LWL) 83,00 m, MAN 122,00 m, dan *High Water Level* (HWL) 123,91 m. Elevasi muka air selama periode pengamatan (80,72–87,62 m pada jendela jam-jaman) berada jauh di bawah MAN, menegaskan bahwa waduk berada pada tahap *initial impounding*. Kurva elevasi–luas–tampungan semacam ini juga lazim menjadi dasar evaluasi kapasitas dan potensi sedimentasi waduk pada tahun-tahun awal operasinya (Arebu et al., 2026).

Tabel 1 Karakteristik teknis Bendungan Rukoh

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Lokasi	Desa Alue, Kec. Titeue, Kab. Pidie	Tipe bendungan	Zonal, inti tanah kedap air
Sungai / Wilayah Sungai	Krueng Rukoh / WS Aceh Meureudu	Tinggi maksimum di atas dasar sungai	84,90 m
Luas DAS di lokasi bendungan	19,63 km²	Elevasi puncak bendungan	+127,93 m
Panjang Krueng Rukoh	6,87 km, bermuara di Selat Malaka	Panjang / lebar puncak	220,00 m / 14,0 m
Debit sungai rerata tahunan	0,77 m³/detik	Muka air rendah (LWL)	83,00 m
Curah hujan rerata tahunan	1.470 mm	Muka air normal (MAN)	122,00 m
Debit banjir rancangan Q100 / Q1000	133,71 / 170,86 m³/detik	Tampungan pada MAN	128,66 juta m³
Debit banjir maksimum boleh jadi (QPMF)	622,10 m³/detik	Tampungan efektif / mati	125,70 / 2,96 juta m³
Pelimpah (*spillway*)	Tipe *Ogee* tanpa pintu; lebar mercu 15,00 m; elevasi mercu +122,00 m	Luas genangan pada MAN	687,37 ha
Layanan irigasi / air baku	11.950 ha / 0,902 m³/detik	Pembangkit (PLTMH)	1 unit × 1,22 MW
Debit rencana pengendalian banjir	Q50 = 116,83 m³/detik	Status November–Desember 2025	*Controlled impounding*, bukaan pelepasan tertutup

Sumber: Draft RTD dan Dam Break Analysis *Bendungan Rukoh, BWS Sumatera I (t.t.-a); kurva tampungan (t.t.-b)*

Tabel 2 Sumber data penelitian

Dataset	Deskripsi	Periode/Cakupan	Resolusi
ARR–Curah Hujan	Curah hujan otomatis pos pengamatan DAS Rukoh	20 Nov–20 Des 2025 (744 data)	Jam-jaman
AWLR–Volume	Elevasi muka air, volume tampungan, keterisian (%), dan debit *inflow* terhitung (ΔS/Δt)	20 Nov–20 Des 2025 (744 data)	Jam-jaman
Tinggi Muka Air Waduk	Elevasi muka air hasil pembacaan manual harian, termasuk catatan operasional	6 Nov–30 Des 2025 (55 data)	Harian
Kurva Tampungan (*elevation–area–volume*, E-A-V)	Hubungan elevasi–luas genangan–volume tampungan serta elevasi kontrol LWL, MAN, dan HWL	Seluruh rentang elevasi waduk	Statis
Dokumen RTD dan *Dam Break Analysis* (DBA)	Karakteristik teknis, hasil simulasi keruntuhan, zona bahaya, dan prosedur tanggap darurat	Dokumen draft BWS Sumatera I	Statis

Sumber: Data pemantauan dan dokumen teknis Bendungan Rukoh (BWS Sumatera I, 2025a, 2025b, t.t.-a, t.t.-b)

Metode Analisis

Analisis hubungan antara hujan penyebab bencana, debit *inflow*, dan tampungan waduk disusun berdasarkan prinsip neraca air waduk, sejalan dengan pendekatan neraca air yang lazim digunakan pada evaluasi ketersediaan dan alokasi air di DAS lain di Indonesia (Iqbal & Kasuri, 2023):

$$\Delta S = (Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}})\Delta t \quad (1)$$

Dimana: ΔS = penambahan tampungan waduk pada interval waktu Δt (m³); Q_{in} = debit masuk (*inflow*) dari DAS Krueng Rukoh dan Krueng Inong (m³/detik); Q_{out} = debit keluar (*outflow*) melalui pelimpah maupun *intake* (m³/detik); Δt = interval waktu, satu jam (3.600 detik).

Karena pada periode pengamatan bendungan masih berada pada tahap *impounding* terkendali dengan bukaan pelepasan tertutup, *outflow* diasumsikan mendekati nol, sehingga ΔS praktis setara dengan volume *inflow* neto yang masuk ke waduk dan debit *inflow* jam-jaman dihitung sebagai:

$$Q_{\text{in}} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (2)$$

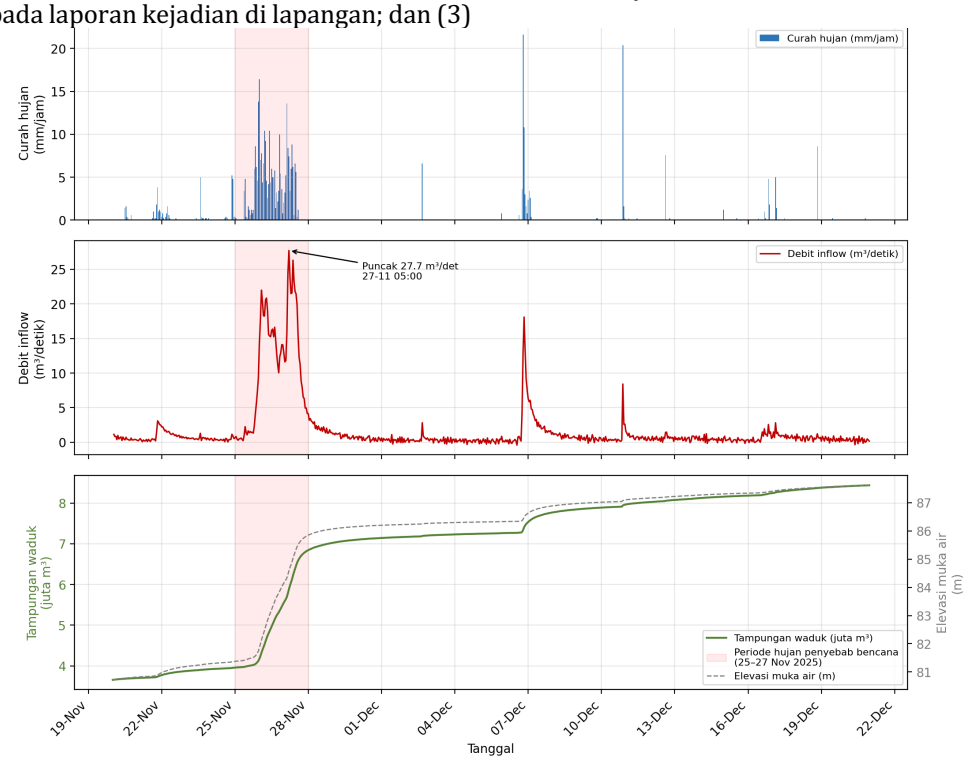
Nilai *inflow* pada *dataset* AWLR merupakan besaran turunan (*derived*) yang dihitung dari perubahan volume tampungan antarwaktu (ΔS/Δt), bukan hasil pengukuran debit langsung di sungai. Nilai pada kolom *inflow* sistem pemantauan dan hasil perhitungan independen ΔS/Δt identik secara numerik dalam satuan m^3/detik, meskipun kolom tersebut pada berkas sumber berlabel liter/detik; seluruh debit pada makalah ini karenanya disajikan dalam m^3/detik. Analisis data dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python (pustaka pandas dan scipy), meliputi statistik deskriptif, uji korelasi Pearson dan Spearman, *cross-correlation* curah hujan terhadap *inflow* pada *lag* 0–12 jam, serta analisis kurva resesi pasca-puncak melalui regresi linier terhadap ln(*Q*).

Kajian keruntuhan bendungan (*Dam Break Analysis*, DBA) dan RTD merupakan dokumen sekunder BWS Sumatera I; makalah ini merangkum hasilnya sebagai pembanding kesiapsiagaan tanpa mengulang simulasi. Keterbatasan analisis meliputi (1) luas DAS kontribusi *inflow*, termasuk suplai dari Krueng Inong, belum dikonfirmasi sehingga volume *inflow* belum dapat dibandingkan dengan potensi limpasan total; (2) data debit sungai ruas hilir Kecamatan Kota Bakti–Beureunuen tidak tersedia sehingga pernyataan tidak terjadinya luapan merujuk pada laporan kejadian di lapangan; dan (3) *outflow* diasumsikan nol berdasarkan status operasional dan belum dikonfirmasi dengan catatan pembukaan pelepasan secara eksplisit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pola Hujan Penyebab Bencana

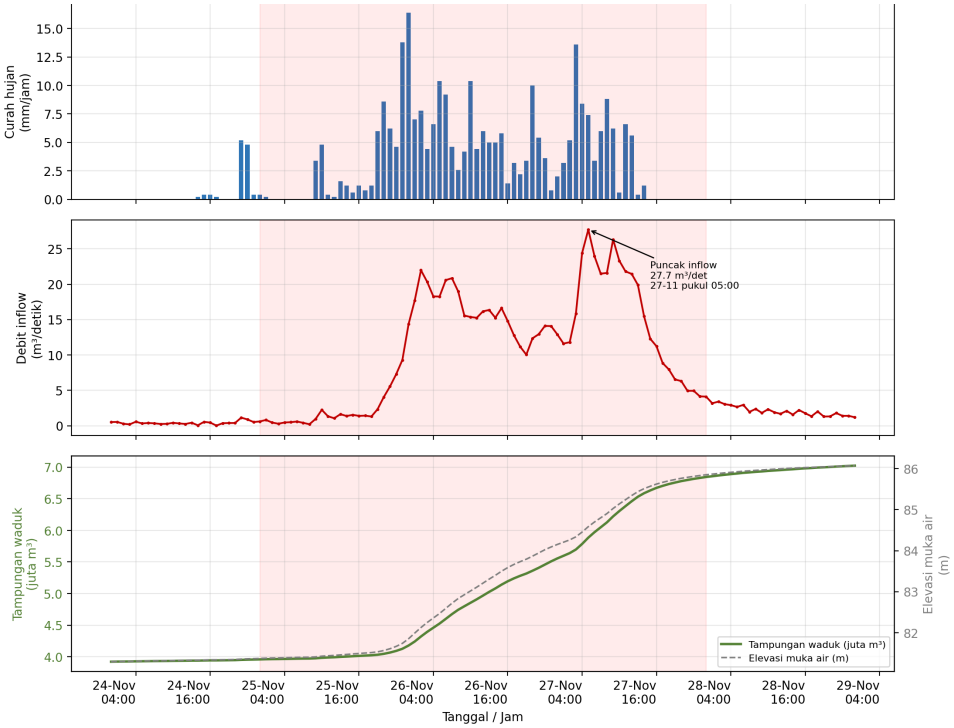
Selama periode 20 November–20 Desember 2025 (744 jam pengamatan), total curah hujan tercatat 429,0 mm dengan 130 jam (17,5%) mengalami hujan. Hujan ekstrem penyebab bencana terjadi pada 25–27 November 2025 dengan total 273,6 mm dalam tiga hari, atau sekitar 64% dari total curah hujan sebulan. Curah hujan harian tertinggi tercatat pada 26 November (139,8 mm), disusul 27 November (78,6 mm) dan 25 November (55,2 mm) (Tabel 3). Curah hujan jam-jaman tertinggi dalam periode pengamatan mencapai 21,6 mm/jam pada 6 Desember 2025 pukul 19.00, dengan intensitas tinggi juga terjadi pada 25–27 November 2025 (Gambar 1). Pola ini menunjukkan curah hujan terkonsentrasi pada beberapa kejadian hujan deras berdurasi pendek yang diselingi periode kering, konsisten dengan karakteristik hujan tropis di wilayah Sumatra bagian utara (Aldrian & Susanto, 2003; Iqbal, Fauzi, et al., 2023).



Gambar 1 Hubungan curah hujan, debit *inflow*, dan tampungan waduk Bendungan Rukoh, 20 November–20 Desember 2025 (area diarsir merah = periode hujan penyebab bencana, 25–27 November 2025)

Respons *Inflow* terhadap Curah Hujan

Debit *inflow* rerata harian meningkat dari di bawah 1,3 m^3/detik pada 20–24 November menjadi 16,0 m^3/detik pada 26 November dan 15,3 m^3/detik pada 27 November 2025. Selama periode pengamatan, *inflow* terhitung rata-rata 1,79 m^3/detik dengan median 0,56 m^3/detik, mengindikasikan distribusi *right-skewed*: nilai rendah pada kondisi *baseflow* namun melonjak tajam saat hujan. *Inflow* puncak jam-jaman tercatat 27,7 m^3/detik pada 27 November 2025 pukul 05.00 WIB, tidak lama setelah rangkaian hujan deras 26–27 November 2025 (Gambar 2), dengan pola *rising limb–falling limb* yang selaras dengan kejadian hujan.



Gambar 2 Detail kejadian hujan, debit *inflow*, dan tampungan waduk pada 24–29 November 2025

Uji korelasi Pearson pada *lag* nol menunjukkan hubungan positif kuat antara curah hujan dan *inflow* (r = 0,670; p < 0,001), dikonfirmasi oleh korelasi Spearman (ρ = 0,454; p < 0,001). Analisis *cross-correlation* pada rentang *lag* 0–12 jam menunjukkan koefisien korelasi meningkat menjadi maksimum r = 0,707 pada *lag* 1 jam, kemudian menurun gradual hingga r = 0,509 pada *lag* 12 jam. *Lag time* optimum 1 jam ini mengindikasikan DAS Rukoh memiliki waktu respons (*time of concentration*) yang relatif singkat, konsisten dengan karakteristik DAS berukuran kecil–menengah bertopografi curam (Ortiz-Lopez et al., 2023; Rizal et al., 2022).

Penambahan Tampungan Waduk

Sejalan dengan lonjakan *inflow*, elevasi muka air waduk naik dari 81,37 m (awal 25 November 2025) menjadi 85,83 m (akhir 27 November 2025), yaitu kenaikan 4,46 m hanya dalam tiga hari, dengan penambahan tampungan (ΔS) 2,87 juta m^3 (Tabel 3). Sepanjang periode pengamatan, elevasi naik dari 80,72 m menjadi 87,62 m (kenaikan 6,90 m) dan volume tampungan bertambah dari 3,66 juta m^3 menjadi 8,44 juta m^3 (penambahan 4,78 juta m^3), sehingga keterisian meningkat dari 2,84% menjadi 6,56%. Dengan demikian, sekitar 60% penambahan tampungan terjadi hanya dalam tiga hari kejadian bencana, yang menegaskan peran dominan hujan ekstrem dalam mempercepat pembentukan tampungan pada tahap *initial impounding*.

Tabel 3 Neraca hujan–*inflow*–tampungan harian Bendungan Rukoh, 20–30 November 2025

Tanggal	Curah hujan (mm/hari)	*Inflow* rerata (m³/detik)	*Inflow* puncak (m³/detik)	Elevasi akhir hari (m)	ΔS harian (juta m³)
20 Nov 2025	4,2	0,54	1,14	80,82	0,044
21 Nov 2025	10,4	0,75	3,09	80,96	0,064
22 Nov 2025	5,2	1,22	2,22	81,19	0,097
23 Nov 2025	6,6	0,55	1,29	81,29	0,045
24 Nov 2025	11,6	0,42	1,15	81,37	0,034
25 Nov 2025	**55,2**	**1,97**	**9,29**	**81,74**	**0,168**
26 Nov 2025	**139,8**	**16,01**	**21,98**	**84,09**	**1,332**
27 Nov 2025	**78,6**	**15,28**	**27,72**	**85,83**	**1,274**
28 Nov 2025	0,0	2,20	4,12	86,07	0,175
29 Nov 2025	0,0	0,91	1,34	86,15	0,074
30 Nov 2025	0,0	0,49	0,92	86,20	0,039

Catatan: *Baris tebal = periode hujan penyebab bencana (25–27 November 2025).*

Sumber: *Diolah dari data AWLR–ARR Bendungan Rukoh (BWS Sumatera I, 2025a)*

Retensi Banjir dan Kondisi Hilir

Temuan paling relevan bagi fungsi pengendalian banjir adalah bahwa seluruh volume *inflow* banjir sebesar 2,87 juta m³ selama 25–27 November 2025 tertahan di dalam waduk sebagai penambahan tampungan tanpa pelepasan ke hilir, karena bendungan berada pada mode *impounding* tertutup. Debit yang mengalir ke Krueng Rukoh di ruas hilir bendungan yang berasal dari DAS di atas bendungan pada periode puncak bencana dengan demikian praktis nihil. Kondisi ini secara konseptual konsisten dengan tidak terjadinya luapan berarti di Kecamatan Kota Bakti hingga Beureunuen.

Pasca-puncak *inflow* 27,7 m³/detik, debit mengalami resesi yang mengikuti pola eksponensial. Regresi linier terhadap ln(Q) menghasilkan konstanta resesi k = 0,059/jam dengan R^2 = 0,894, setara waktu paruh 11,7 jam, mengikuti pendekatan resesi eksponensial klasik yang lazim digunakan dalam analisis hidrograf (Singh & Stall, 1971; Hameed et al., 2023). Karena bukaan pelepasan tertutup, seluruh volume *inflow* tertahan sepenuhnya di dalam tampungan waduk sehingga rasio atenuasi banjir mendekati 1,0 (100% *inflow* tertampung). Kondisi ini menunjukkan bahwa tahap *initial impounding* secara alami berfungsi sebagai tampungan banjir sementara (*temporary flood storage*) yang signifikan meredam dampak hidrologi hilir, meskipun belum beroperasi sebagai sistem pengendalian banjir aktif dengan pengaturan bukaan (Roberts et al., 2023).

Mekanisme yang bekerja pada periode ini berbeda dari redaman banjir (*flood attenuation*) pada bendungan yang telah beroperasi penuh pada MAN. Pada operasi normal, pengendalian banjir bekerja melalui pengurangan puncak debit yang dilepaskan lewat pelimpah (redaman parsial), sedangkan pada kejadian November 2025 yang terjadi adalah retensi total (*total retention*) karena ruang tampungan kosong yang tersedia (sekitar 120 juta m³ dari kapasitas 128,66 juta m³) jauh lebih besar daripada volume banjir yang harus ditampung.

Atribusi kausal bahwa Bendungan Rukoh merupakan satu-satunya penyebab tidak terjadinya luapan di hilir tetap perlu kehati-hatian, karena debit sungai di ruas Kota Bakti–Beureunuen juga dipengaruhi hujan lokal pada bagian DAS di bawah bendungan yang tidak dikendalikan bendungan, kondisi tanggul dan kapasitas alur sungai eksisting, serta upaya penanganan darurat. Data debit sungai terukur di ruas hilir diperlukan untuk mengonfirmasi proporsi kontribusi bendungan terhadap pengurangan risiko banjir.

Keandalan Data dan Analisis Sensitivitas

Karena nilai *inflow* diturunkan dari neraca tampungan (ΔS/Δt) dengan asumsi *outflow* ≈ 0, keandalan hasil dievaluasi melalui tiga pertimbangan. Pertama, nilai *inflow* pada seluruh 743 interval jam-jaman konsisten dengan ΔS/Δt tanpa penyimpangan sistematis. Kedua, pada jendela 20 November–20 Desember 2025 tidak ditemukan catatan operasi pompa, sehingga hasil dapat diperlakukan sebagai respons hidrologi alami DAS. Ketiga, hubungan curah hujan–*inflow* diuji dengan dua metode korelasi (Pearson dan Spearman) yang menghasilkan kesimpulan konsisten, dengan pola *cross-correlation* yang stabil pada *lag* berdekatan (0–3 jam tetap menghasilkan r > 0,65). Berdasarkan ketiga pertimbangan tersebut hasil analisis dinilai robust, meskipun validitas nilai

inflow absolut tetap bergantung pada asumsi *outflow* terkendali nol — keterbatasan struktural yang perlu diperkuat melalui pemasangan alat ukur debit independen.

Implikasi ke Depan

Dengan keterisian waduk baru 6,56% pada akhir pengamatan, Bendungan Rukoh masih memiliki ruang tampungan kosong yang sangat besar untuk kejadian hujan ekstrem berikutnya selama tahap *impounding*. Namun, retensi total bersifat sementara dan akan berubah karakter setelah muka air mendekati MAN (+122 m), ketika pengendalian banjir bergantung pada kapasitas dan pola operasi pelimpah (redaman parsial). Evaluasi kinerja pengendalian banjir perlu dilakukan berkelanjutan, terutama setelah bendungan beroperasi normal pascaperesmian Juli 2026.

Mengingat *lag time* singkat (~1 jam), sistem peringatan dini berbasis ambang curah hujan jam-jaman perlu diintegrasikan dengan pemantauan elevasi AWLR secara *real-time*. Konstanta resesi (k = 0,059/jam) dapat menjadi parameter awal pemodelan hidrologi DAS Rukoh, misalnya melalui kalibrasi HEC-HMS sebagaimana diterapkan pada DAS lain di Indonesia (Rizal et al., 2022), dan simulasi operasi waduk pada tahap berikutnya, termasuk skema operasi multiwaduk berbasis terowongan interkoneksi yang telah dikembangkan untuk kawasan Aceh (Iqbal et al., 2020a, 2020b, 2021).

Kajian Keruntuhan Bendungan sebagai Pembanding Kesiapsiagaan

Selain kinerja operasional, BWS Sumatera I telah menyusun kajian DBA dan Draft RTD Bendungan Rukoh yang memberikan gambaran skenario terburuk hipotetis (BWS Sumatera I, t.t.-a). Analisis keruntuhan menggunakan program Zhong Xing HY21 pada dua kondisi hidrologi, yaitu keruntuhan cuaca cerah (*sunny-day breach*) dengan waduk terisi setinggi MAN tanpa *inflow* hujan, dan keruntuhan pada banjir desain dengan *inflow* hidrograf banjir maksimum boleh jadi (*Probable Maximum Flood*, PMF). Karena bendungan didesain aman terhadap PMF, skenario *overtopping* akibat kegagalan menahan PMF tidak wajib dianalisis. Simulasi dilakukan pada tiga lokasi rekahan (bagian atas, tengah, dan dasar tubuh bendungan) untuk setiap kondisi sehingga diperoleh enam skenario (Tabel 4).

Tabel 4 Waktu keruntuhan dan debit puncak *outflow* hasil DBA Bendungan Rukoh

Skenario	Waktu keruntuhan (detik)	Q_{out} (m³/detik)
MAN–Atas	21.060	13.756
MAN–Tengah	7.428	39.193
MAN–Dasar	4.122	65.678
MAB–Atas	21.236	13.732
MAB–Tengah	7.480	39.245
MAB–Dasar	4.210	64.181

Catatan: *MAN = muka air normal (*sunny-day*); MAB = muka air banjir desain dengan* inflow *PMF; Atas/Tengah/Dasar = lokasi rekahan.*

Sumber: *Draft RTD dan DBA Bendungan Rukoh, BWS Sumatera I (t.t.-a)*

Tabel 4 menunjukkan bahwa lokasi rekahan jauh lebih menentukan dampak dibandingkan kondisi muka air awal: untuk lokasi rekahan yang sama, waktu keruntuhan dan Q_{out} antara skenario MAN dan MAB hampir identik (misalnya MAN–Dasar 4.122 detik dan 65.678 m³/detik berbanding MAB–Dasar 4.210 detik dan 64.181 m³/detik). Semakin rendah posisi rekahan, semakin cepat keruntuhan dan semakin besar debit puncak: rekahan di dasar menghasilkan keruntuhan tercepat (sekitar 69–70 menit) dengan Q_{out} hingga 65.678 m³/detik, sedangkan rekahan di bagian atas menghasilkan keruntuhan paling lambat (sekitar 5,8–5,9 jam) dengan Q_{out} sekitar 13.700 m³/detik, yang tetap jauh melampaui debit banjir PMF sebesar 622,10 m³/detik.

Rambatan banjir hasil simulasi dipetakan ke 13 kecamatan di hilir Krueng Rukoh dalam bentuk peta genangan, zona bahaya, dan status pengungsian per desa, dengan penilaian risiko menggunakan metode FEMA (*Federal Emergency Management Agency*). Estimasi penduduk berisiko mencapai 104.015 jiwa, terbesar di Kecamatan Mutiara (17.561 jiwa), Sakti (15.003 jiwa), Simpang Tiga (12.070 jiwa), dan Mutiara Timur (11.685 jiwa). Kecamatan Sakti (ibu kota Kota Bakti) dan Mutiara Timur (ibu kota Beureunuen), yang tidak mengalami luapan pada November 2025, memiliki total 26.688 jiwa berisiko atau sekitar 25,7% dari total. Dengan demikian, meskipun kinerja operasional pada November 2025 sangat baik (retensi total tanpa luapan hilir), konsekuensi kegagalan struktural pada wilayah yang sama tetap sangat besar, sehingga RTD dan sistem peringatan dini bagi kedua kecamatan harus tetap menjadi prioritas. Desa Alue di Kecamatan Titeue, yang hanya berjarak 0,068 km dari bendungan, dikategorikan berisiko tinggi dengan status jadwal evakuasi Awas, sedangkan mayoritas desa lain pada sampel dokumen sumber berisiko rendah.

Dokumen sumber juga mengutip statistik penyebab keruntuhan bendungan: secara umum 34% akibat *overtopping*, 30% kegagalan pondasi, 28% rembesan (*piping*), dan 8% faktor lain; untuk bendungan urugan tanah seperti Bendungan Rukoh, proporsinya 35% *overtopping*, 38% *piping*, 21% kegagalan pondasi, dan 6% faktor lain. Dari 235 bendungan besar di Indonesia, dua pernah mengalami keruntuhan, dan kajian tersebut menyimpulkan bahwa pembangunan bendungan di Indonesia dilakukan dengan memperhatikan aspek keamanan. Kesimpulan ini bertumpu pada statistik nasional dan desain terhadap PMF, bukan pengukuran kondisi struktural aktual bendungan, dan angka tersebut merupakan frekuensi historis nasional, bukan probabilitas keruntuhan tahunan dalam pengertian keandalan teknik. Pemantauan instrumentasi yang berkelanjutan tetap menjadi dasar utama evaluasi keamanan bendungan.

Rencana Tanggap Darurat (RTD) Bendungan Rukoh

Penyusunan RTD mengacu pada Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air (Indonesia, 2019) dan hierarki peraturan keamanan bendungan lainnya yang tercantum dalam dokumen RTD, termasuk Peraturan Menteri PUPR Nomor 27/PRT/M/2015 tentang Bendungan beserta perubahannya dan Surat Keputusan Direktur Jenderal Pengairan Nomor 94/KPTS/A/1998 tentang pedoman penyiapan RTD (BWS Sumatera I, t.t.-a). RTD bertujuan menjadi pedoman pengelola bendungan dalam pencegahan keruntuhan serta menyamakan persepsi antara pengelola dan pemerintah daerah dalam evakuasi penduduk. Dokumen disusun dalam delapan bab, dari tujuan hingga pelaksanaan, dengan 10 lampiran.

RTD menetapkan tiga tahapan status keadaan darurat. WASPADA berarti tenaga ahli masih yakin bendungan dapat diamankan; SIAGA berarti tenaga ahli tidak yakin bendungan dapat diamankan sehingga dilakukan siaga penuh dan penduduk Zona Bahaya 1 mulai diungsikan bila perlu; AWAS berarti bendungan dinilai segera runtuh sehingga seluruh penduduk Zona Bahaya 1 dan 2 yang belum mengungsi harus segera diungsikan. Kriteria elevasi muka air waduk yang memicu setiap tahapan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 Kriteria elevasi muka air waduk dan tindakan pada setiap status keadaan darurat

Status	Kriteria elevasi muka air waduk	Tindakan
WASPADA I	Muka air di atas pelimpah naik cepat, mencapai +122,388 m (setara Q25 tahun)	Bukaan pintu air 50%
WASPADA II	Muka air mencapai +122,429 m (setara Q100 tahun)	Bukaan pintu air 75%
SIAGA	Muka air mencapai +122,485 m (setara Q1000 tahun)	Bukaan pintu air 100%; sirene keadaan darurat dibunyikan
AWAS	Muka air naik hingga melampaui +123,911 m (setara QPMF)	Bukaan pintu air 100%; sirene dibunyikan; imbauan evakuasi ke masyarakat hilir apabila muka air terus naik

Catatan: Kriteria merujuk pada contoh penerapan skema banjir rencana dalam dokumen RTD dan perlu dikonfirmasi dengan RTD final yang berlaku.

Sumber: Draft RTD dan DBA Bendungan Rukoh, BWS Sumatera I (t.t.-a)

Struktur organisasi pelaksana terdiri atas Penanggung Jawab RTD, Kepala Unit Pengelola Bendungan (UPB) atau Kepala Satuan Kerja Operasi dan Pemeliharaan (OP) BWS Sumatera I, koordinator operasi, koordinator pemeliharaan, serta petugas pemantauan dan petugas data dan evaluasi. Alur komunikasi berjenjang dari pelapor kondisi lapangan hingga Kepala Seksi Operasi dan Pemeliharaan BWS Sumatera I, dengan eskalasi Waspada I → Waspada II → Siaga → Awas. Pada status Siaga dan Awas, jalur komando diperluas hingga Bupati Pidie melalui Dinas PUPR, BPBD, Kapolres Pidie, BMKG Stasiun Meteorologi Kelas I Sultan Iskandar Muda, serta dinas sosial dan kesehatan setempat.

RTD juga memuat matriks indikasi problema keamanan bendungan sebagai acuan petugas OP mendeteksi tanda bahaya secara dini, meliputi didih pasir (*sand boil*), rembesan/*piping*, longsor atau erosi besar pada tubuh bendungan, lubang benam (*sinkhole*), penurunan (*settlement*), retakan tubuh dan struktur beton, serta pusaran air di hulu atau muka air naik cepat (*overtopping*), masing-masing dengan indikasi Waspada dan Siaga/Awas beserta tindak lanjutnya. Keadaan darurat bendungan dinyatakan berakhir apabila tidak ada gejala aliran air waduk yang membahayakan dan bendungan dinyatakan cukup aman oleh Balai Teknik Bendungan melalui BWS Sumatera I; di hilir, keadaan darurat berakhir apabila genangan telah surut hingga kedalaman kurang dari 0,50 m, perbaikan dan pembersihan telah dilakukan, dan

wilayah dinyatakan layak huni kembali oleh Bupati Pidie. Tindak lanjut pascadarurat mencakup perbaikan prasarana rusak, evaluasi prosedur RTD, penyusunan laporan kegiatan bencana, dan penyebaran hasil evaluasi kepada instansi terkait.

Berdasarkan hasil kajian, rekomendasi kesiapsiagaan meliputi (1) memutakhirkan RTD menjelang dan pascaoperasi penuh pada MAN +122 m, termasuk verifikasi kriteria Waspada/Siaga/Awas terhadap kondisi operasi pascaperesmian; (2) mempertahankan dan mengembangkan sistem pemantauan ARR–AWLR *real-time* serta mengintegrasikannya dengan kriteria status darurat sebagai sistem peringatan dini otomatis; (3) memprioritaskan Kecamatan Sakti dan Mutiara Timur dalam sosialisasi RTD, jalur evakuasi, dan gladi tanggap darurat berkala; (4) melengkapi data debit sungai hilir aktual untuk memvalidasi peta genangan hasil kajian keruntuhan terhadap kondisi riil operasi normal; dan (5) mendokumentasikan setiap kejadian hidrometeorologi ekstrem berikutnya dengan kerangka neraca air yang sama sebagai dasar evaluasi berkelanjutan.

KESIMPULAN

Kesimpulan Khusus

Hujan ekstrem 25–27 November 2025 dengan total 273,6 mm dalam tiga hari memicu *inflow* puncak 27,7 m^3/detik pada 27 November 2025 pukul 05.00 WIB, dengan *lag time* optimum sekitar 1 jam terhadap curah hujan (r maksimum = 0,707). Seluruh volume *inflow* banjir sebesar 2,87 juta m^3 tertahan sebagai penambahan tampungan (elevasi naik 4,46 m) tanpa pelepasan ke hilir, karena bendungan berada pada tahap *impounding* tertutup dengan ruang tampungan kosong sekitar 120 juta m^3 dari kapasitas 128,66 juta m^3. Kondisi retensi total ini (rasio atenuasi mendekati 1,0; waktu paruh resesi 11,7 jam) secara konseptual konsisten dengan tidak terjadinya luapan berarti di Kecamatan Kota Bakti hingga Beureunuen, meskipun pembuktian kuantitatif penuh memerlukan data debit sungai hilir dan data luas DAS kontribusi. Kajian keruntuhan hipotetis menunjukkan waktu keruntuhan 4.100–21.200 detik dan debit puncak 13.700–65.700 m^3/detik dengan 104.015 jiwa berisiko, termasuk 26.688 jiwa di Kecamatan Sakti dan Mutiara Timur, sehingga kinerja baik pada November 2025 tidak boleh mengurangi prioritas kesiapsiagaan RTD bagi kedua kecamatan tersebut.

Kesimpulan Umum

Tahap *initial impounding* merupakan periode strategis bagi evaluasi awal kesiapan fungsi pengendalian banjir bendungan dan secara alami berfungsi sebagai tampungan banjir sementara. Mekanisme retensi total ini berbeda karakter dari redaman parsial pada operasi normal, sehingga evaluasi kinerja perlu berlanjut pascaoperasi penuh, dan kerangka neraca air berbasis data ARR–AWLR dapat direplikasi pada bendungan lain dengan tahap pengisian serupa. Kesiapan menghadapi skenario ekstrem melalui RTD yang lengkap, teruji, dan tersosialisasi kepada masyarakat hilir sama pentingnya dengan keberhasilan fungsi pengendalian banjir. Penelitian lanjutan disarankan memperluas cakupan periode data serta melengkapi instrumentasi pengukuran debit independen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Wilayah Sungai Sumatera I dan pengelola Bendungan Rukoh atas dukungan data pemantauan dan dokumen teknis yang digunakan dalam makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

Aldrian, E., & Susanto, R. D. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology, 23(12)*, 1435–1452. https://doi.org/10.1002/joc.950

Aldrian, E., & Syamsudin, F. (2020). Climate change impacts on rainfall variability in Indonesia. *International Journal of Climatology, 40(13)*, 5521–5536.

Arebu, B. A., Alamri, N., & Elfeki, A. (2026). Hydrological modeling of reservoir sedimentation and evolution of elevation–capacity curve of the dam reservoir. *Hydrology, 13(3)*, 93. https://doi.org/10.3390/hydrology13030093

Balai Wilayah Sungai Sumatera I. (t.t.-a). *Draft Rencana Tindak Darurat (RTD) dan Dam Break Analysis Bendungan Rukoh Kabupaten Pidie*. Banda Aceh: Balai Wilayah Sungai Sumatera I.

Balai Wilayah Sungai Sumatera I. (t.t.-b). *Kurva Tampungan Kontrol Impounding Waduk Rukoh*. Banda Aceh: Balai Wilayah Sungai Sumatera I.

Balai Wilayah Sungai Sumatera I. (2025a). *Data Monitoring AWLR dan ARR Bendungan Rukoh, 20 November–20 Desember 2025* [Data internal]. Banda Aceh: Balai Wilayah Sungai Sumatera I.

Balai Wilayah Sungai Sumatera I. (2025b). *Data Monitoring Tinggi Muka Air Waduk Rukoh,*

November–Desember 2025 [Data internal]. Banda Aceh: Balai Wilayah Sungai Sumatera I.

Balai Wilayah Sungai Sumatera I. (2026). *Penanganan Terpadu Bencana Hidrometeorologi di Aceh Terus Dipercepat*. sda.pu.go.id (15 Januari 2026).

Hameed, M., Ahmadalipour, A., & Moradkhani, H. (2023). Event-based recession analysis for estimation of basin-wide characteristic drainage timescale and groundwater storage trends. *Water Resources Research, 59(12)*, e2023WR035829. https://doi.org/10.1029/2023WR035829

Indonesia. (2019). Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2019 Nomor 190. Sekretariat Negara. Jakarta.

Iqbal, K., Abduh, M., & Variadi. (2023). Simulation of multi reservoir operation rules with interconnected tunnel and water transfer. *Aceh International Journal of Science and Technology, 12(2)*, 227–236.

Iqbal, K., Fauzi, A., & Hasibuan, P. P. (2023). Applying tropical rainfall measuring mission (TRMM) rain data to determining rain design in the Jambo Balee sub-watershed. *AIP Conference Proceedings*.

Iqbal, K., & Kasuri, A. R. (2023). Analisis neraca air untuk alokasi air irigasi pada DAS Kedung Larangan Provinsi Jawa Timur. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil dan Perencanaan, 6(2)*.

Iqbal, K., Limantara, L. M., Soetopo, W., & Andawayanti, U. (2020a). Joint operation of parallel reservoir with interconnected tunnel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 933*, 012035.

Iqbal, K., Limantara, L. M., Soetopo, W., & Andawayanti, U. (2020b). Multi-reservoirs with inter-reservoir water transfer operation rules. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 437*, 012040.

Iqbal, K., Limantara, L. M., Soetopo, W., & Andawayanti, U. (2021). Multi reservoir operation rules with interconnected tunnel and water transfer. *Technology Reports of Kansai University, 63(3)*.

Kurniadi, A., Weller, E., Salmond, J., & Aldrian, E. (2024). Future projections of extreme rainfall events in Indonesia. *International Journal of Climatology, 44(6)*, 1–23. https://doi.org/10.1002/joc.8321

Kwak, J. (2021). An assessment of dam operation considering flood and low-flow control in the Han River Basin. *Water, 13(5)*, 733. https://doi.org/10.3390/w13050733

Luo, D., Lin, P., Li, Q., Zheng, D., & Liu, H. (2015). Effect of the impounding process on the overall stability of a high arch dam: A case study of the Xiluodu dam, China. *Arabian Journal of Geosciences, 8(11)*, 9023–9041. https://doi.org/10.1007/s12517-015-1868-6

Ortiz-Lopez, C., Torres, A., Bouchard, C., & Rodriguez, M. (2023). A methodology for integrating time-lagged rainfall and river flow data into machine learning models to improve prediction of quality parameters of raw water supplying a treatment plant. *Journal of Hydroinformatics, 25(6)*, 2406–2426. https://doi.org/10.2166/hydro.2023.122

Rashidi, M., & Haeri, S. M. (2017). Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 9(4)*, 709–725. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.12.003

Rizal, N. S., Ahmad, H. H., Iqbal, K., & Salim, N. (2022). Kalibrasi parameter hidrologi daerah aliran sungai bentuk radial dengan aplikasi HEC-HMS. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur Hexagon, 4(1)*.

Roberts, K., Boothroyd, R. J., & Macdonald, N. (2023). Mitigating floods and attenuating surface runoff with temporary storage areas in headwaters. *WIREs Water, 10(3)*, e1634. https://doi.org/10.1002/wat2.1634

Shrestha, B., & Kawasaki, A. (2020). Quantitative assessment of flood risk with evaluation of the effectiveness of dam operation for flood control: A case of the Bago River Basin of Myanmar. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 50*, 101707. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101707

Singh, V. P., & Stall, J. B. (1971). Derivation of base flow recession curves and parameters. *Water Resources Research, 7(2)*, 292–303. https://doi.org/10.1029/WR007i002p00292

Variadi, Iqbal, K., Fajarullah, M., & Ramzi, A. (2024). Keureuto Dam operation for flood control system. *E3S Web of Conferences*.