

**ANALISIS KERENTANAN BANJIR TERHADAP INFRASTRUKTUR JALAN TOL
(STUDI KASUS RUAS JALAN TOL TANGERANG-MERAK KM 50)**

***ANALYSIS OF FLOOD VULNERABILITY IN TOLL ROAD INFRASTRUCTURE
(CASE STUDY OF THE TANGERANG-MERAK TOLL ROAD AT KM 50)***

Niko Abdian^{*1}, Sandy Riza Permana², Yudistira Wibowo³, Husein Triono⁴, Aditya Wibawa Mukti⁵

^{1,2,3,4,5} Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kabupaten Serang
Korespondensi: nikobdian@gmail.com

ABSTRAK

Banjir di Jalan Tol Tangerang-Merak KM 50+000–51+000, Cikande, pada Januari 2026 mengganggu koridor logistik nasional. Penelitian ini mengevaluasi penyebab genangan secara makro melalui analisis hidrologi terpadu menggunakan pendekatan Sistem Informasi Geografis (SIG) dengan teknik skoring, tumpang susun, dan pemodelan hidrologi pada 14.516 unit spasial di DAS Cidurian. Evaluasi mencakup kemampuan drainase spasial, *Digital Elevation Model* (DEM), akumulasi aliran, pemodelan SWAT+, serta keterkaitannya dengan RDTR Kawasan Industri Cikande. Hasil analisis menunjukkan 96,2% wilayah studi memiliki kemampuan drainase rendah, nilai *Curve Number* rata-rata 94,2, dan rasio limpasan permukaan 0,83. Mekanisme banjir teridentifikasi sebagai *compound flooding* melalui tiga proses simultan: *tailwater submergence* saluran lokal akibat tingginya muka air Sungai Cidurian, akumulasi air balik (*backwater*) pada cekungan hulu tol, serta limpasan (*overtopping*) yang memotong badan jalan. Analisis DEM mengonfirmasi Desa Bakung sebagai lintasan aliran dan Desa Songgom Jaya sebagai zona akumulasi akhir. Temuan menegaskan banjir bukan semata akibat keterbatasan drainase lokal, melainkan interaksi luapan sungai utama, hilangnya gradien hidrolis, dan keterbatasan kapasitas tampung DAS. Direkomendasikan tiga skenario penanganan: peninggian elevasi jalan, normalisasi sungai dengan tanggul, serta penambahan kapasitas *cross-drain* yang terintegrasi saluran gendong dan normalisasi hilir.

Kata Kunci: Banjir, Drainase, Jalan Tol, SIG

ABSTRACT

Flooding on the Tangerang-Merak Toll Road at KM 50+000–51+000, Cikande, in January 2026 disrupted the national logistics corridor. This study evaluates the macro-level causes of inundation through integrated hydrological analysis using a Geographic Information System (GIS) approach with scoring, overlay, and hydrological modeling techniques across 14,516 spatial units in the Cidurian Watershed. The evaluation covers spatial drainage capacity, Digital Elevation Model (DEM), flow accumulation, SWAT+ modeling, and its alignment with the Cikande Industrial Area Detailed Spatial Plan (RDTR). Analysis indicates that 96.2% of the study area has low drainage capacity, an average Curve Number of 94.2, and a surface runoff ratio of 0.83. The flooding mechanism is identified as compound flooding involving three simultaneous processes: local channel tailwater submergence driven by high Cidurian River levels, backwater accumulation in upstream toll road

depressions, and overtopping across the road body. DEM analysis confirms Bakung Village as the flow pathway and Songgom Jaya Village as the final accumulation zone. The findings confirm that the flood stems from the interaction of main river overflow, loss of hydraulic gradient, and watershed capacity limits rather than local drainage constraints alone. Three technical mitigation scenarios are recommended: elevating the road, river normalization with embankments, and expanding cross-drain capacity integrated with collector drains and downstream normalization.

Keywords: *Drainage, Flood, GIS, Toll Road*

PENDAHULUAN

Jalan Tol Tangerang-Merak merupakan infrastruktur transportasi strategis yang berfungsi sebagai tulang punggung konektivitas dan jalur logistik vital nasional penghubung Pulau Jawa dan Sumatera (Rodrigue, 2020). Namun, pada Januari 2026, terjadi anomali hidrologis berupa genangan setinggi 40–50 cm di segmen KM 50+000 hingga KM 51+000 (Cikande-Serang Timur) yang melumpuhkan lalu lintas. Lokasi ini secara historis relatif aman dibandingkan titik rawan rutin seperti KM 24 atau KM 38, sehingga fenomena ini mengindikasikan adanya perubahan karakteristik hidrologi atau kegagalan kapasitas tampung badan air penerima.

Secara hidrologis, lokasi tersebut berada di bawah pengelolaan Balai Besar Wilayah Sungai Cidanau-Ciujung-Cidurian (BBWS C3), di mana DAS Cidurian secara umum dikategorikan memiliki kinerja hidrologi buruk dari hulu ke hilir (Triasary dkk., 2021). Penelitian terdahulu telah memetakan kerawanan banjir di hilir DAS Cidurian menggunakan SIG (Kusumo & Nursari, 2016) serta menyimulasikan tata guna lahan menggunakan model SWAT (Triasary dkk., 2021). Kendati demikian, kajian spesifik mengenai mekanisme *compound flooding* yakni banjir akibat interaksi simultan berbagai proses hidrologis dan hidrodinamis (Zscheischler dkk., 2018; Green dkk., 2025) yang berdampak langsung pada kelumpuhan infrastruktur transportasi belum banyak diteliti (Pregnoiato dkk., 2017; Kasmalkar dkk., 2020).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan drainase spasial via SIG, mengidentifikasi pola aliran dan zona akumulasi berbasis DEM, menganalisis mekanisme *compound flooding* di KM 50, serta merumuskan skenario penanganan teknisnya. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pemecahan keterbatasan literatur ilmiah nasional mengenai identifikasi mekanisme *compound flooding* pada infrastruktur jalan tol di Indonesia.

TINJAUAN PUSTAKA

Banjir Sungai dan Dampaknya terhadap Infrastruktur Transportasi

Banjir sungai (*riverine flood*) terjadi ketika volume air yang mengalir dalam sistem sungai melampaui kapasitas tampung palung sungai (*bankfull capacity*), sehingga air melimpas ke dataran banjir di sekitarnya (Jafarzadegan dkk., 2023). Mekanisme ini sangat dipengaruhi oleh kondisi topografi, karakteristik hidrometeorologi, serta sifat fisik DAS seperti ukuran, bentuk, kemiringan, tutupan lahan, dan sifat tanah (Green dkk., 2025). Dampak banjir sungai terhadap infrastruktur transportasi telah dikaji secara luas. Johnston dkk. (2021) mengidentifikasi empat tipe banjir yang menyebabkan kerusakan pada timbunan transportasi, yaitu tekanan hidrostatik, limpasan (*overtopping*), banjir di kaki lereng, dan banjir di atas lereng. Kerusakan yang ditimbulkan meliputi penurunan cepat muka air (*rapid drawdown*), kelongsoran, gerusan, dan erosi internal.

Konsep *Compound Flooding*

Compound flooding didefinisikan sebagai kejadian banjir yang dihasilkan oleh interaksi simultan atau berurutan dari dua atau lebih proses hidrologis, meteorologis, atau oseanografis (Zscheischler dkk., 2018). Green dkk. (2025) dalam tinjauan komprehensif mereka mengklasifikasikan *compound flooding* berdasarkan mekanisme pemicunya, yang meliputi kombinasi antara curah hujan ekstrem, luapan sungai, pasang surut, dan gelombang badai. Dalam konteks sungai, *compound flooding* sering terjadi ketika curah hujan intensitas tinggi bertepatan dengan kondisi muka air sungai yang sudah tinggi, sehingga kapasitas saluran drainase lokal untuk membuang air ke sungai menjadi hilang.

Salah dkk. (2020) mengembangkan kerangka pemodelan *compound flooding* yang mengintegrasikan model gelombang badai dengan model hidrologi/hidrolika. Pendekatan serupa dapat

diadaptasi untuk konteks sungai di mana interaksi antara luapan sungai utama dan drainase lokal menghasilkan mekanisme banjir yang lebih kompleks dari sekadar genangan akibat hujan lokal.

Dalam konteks infrastruktur jalan, *compound flooding* menjadi perhatian khusus karena jalan yang melintasi dataran banjir sering kali berfungsi sebagai penghalang alami terhadap aliran air. Ketika muka air sungai meningkat, saluran drainase yang mengarah ke sungai kehilangan gradien hidroliknya, menyebabkan air terakumulasi di sisi hulu infrastruktur jalan.

METODE

Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada ruas Jalan Tol Tangerang-Merak segmen KM 50+000 hingga KM 51+000 yang terletak di Kecamatan Cikande, Kabupaten Serang, Provinsi Banten. Secara hidrologis, lokasi ini berada dalam DAS Cidurian yang merupakan bagian dari Wilayah Sungai Cidanau - Ciujung - Cidurian. DAS Cidurian melintasi dua provinsi dengan daerah hulu di Kabupaten Bogor (Provinsi Jawa Barat) meliputi Kecamatan Jasinga, Cigudeg, dan Sukajaya, serta daerah tengah dan hilir di Provinsi Banten meliputi Kabupaten Tangerang (Solear, Kresiek, Kronjo) dan Kabupaten Serang (Cikande, Tanara), dengan muara di Laut Jawa (Pantai Utara Banten). Periode kajian mencakup kejadian banjir Januari 2026 dengan data pendukung dari berbagai sumber.



Gambar 1. Peta Lokasi Studi: STA KM 50+000 s.d KM 51+000 (Ruas Cikande – Serang Timur)
Sumber: Peneliti (2026)

Analisis Kemampuan Drainase Berbasis SIG

Sistem Informasi Geografis (SIG) telah menjadi alat yang sangat penting dalam penilaian kerentanan banjir (Danso dkk., 2020). Pendekatan SIG memungkinkan integrasi berbagai parameter

fisik wilayah seperti elevasi, kemiringan lereng, densitas drainase, curah hujan, jenis tanah, dan tutupan lahan ke dalam satu kerangka analisis spasial (Ogato dkk., 2020). Teknik skoring dan tumpang susun (*overlay*) merupakan metode yang banyak digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat kerentanan banjir suatu wilayah ke dalam beberapa kelas berdasarkan kombinasi parameter fisik (Kusumo dan Nursari, 2016; Sebayang, 2022).

Analisis kemampuan drainase dilakukan dengan metode skoring dan tumpang susun (*overlay*) terhadap lima parameter utama, yaitu morfologi, kemiringan lereng, litologi, jenis tanah, dan curah hujan. Setiap parameter diberi skor berdasarkan tingkat kontribusinya terhadap kemampuan drainase, kemudian dilakukan inversi skor menggunakan rumus (6 - skor asli) untuk menyesuaikan arah kontribusi.

Metode SCS-CN untuk Estimasi Limpasan Permukaan

Metode *Soil Conservation Service-Curve Number* (SCS-CN) merupakan pendekatan empiris yang secara luas digunakan untuk mengestimasi kedalaman limpasan langsung dari hubungan antara curah hujan, penggunaan lahan, dan kelompok hidrologi tanah (USDA-NRCS, 2004). Nilai CN berkisar antara 1 (limpasan minimum) hingga 100 (limpasan maksimum) dan sangat dipengaruhi oleh kondisi kelembaban tanah anteseden (*Antecedent Moisture Condition/AMC*), tutupan lahan, serta kelompok hidrologi tanah (*Hydrologic Soil Group/HSG*) (Widiyati dan Fadlin dkk., 2024; Nageswara Rao, 2020).

Nilai CN yang tinggi mengindikasikan potensi limpasan permukaan yang besar. Penelitian Widiyati dan Fadlin dkk. (2024) di DAS Karangmumus menunjukkan hubungan linear yang kuat antara CN dan debit puncak ($R^2 = 0,996$), di mana setiap kenaikan satu unit CN menghasilkan peningkatan debit puncak sebesar 1,68 m³/detik. Temuan ini menegaskan sensitivitas respons hidrologi DAS terhadap perubahan nilai CN.

Analisis DEM dan Arah Aliran

Analisis *Digital Elevation Model* (DEM) dilakukan untuk mengidentifikasi variasi elevasi, pola kemiringan, dan arah aliran permukaan pada wilayah studi. Dari DEM diturunkan informasi mengenai arah aliran (*flow direction*) yang menunjukkan jalur pergerakan air permukaan mengikuti gradien topografi alami. Metode penentuan arah aliran menggunakan algoritma D8 (*deterministic eight-*

node), di mana setiap sel pada grid DEM dialokasikan satu arah aliran ke salah satu dari delapan sel tetangganya berdasarkan perbedaan elevasi terbesar.

DEM juga digunakan untuk mengidentifikasi area cekungan (*depression areas*) yang berpotensi menjadi zona penampungan air sementara. Area cekungan ini menjadi komponen penting dalam memahami mekanisme banjir, karena pada kondisi curah hujan tinggi, area cekungan akan terisi terlebih dahulu sebelum air melimpas ke area yang lebih tinggi, termasuk badan jalan tol.

Analisis Flow Accumulation

Analisis akumulasi aliran (*flow accumulation*) dilakukan untuk mengidentifikasi jalur-jalur konsentrasi aliran permukaan dan menentukan area dengan potensi akumulasi air yang tinggi. Nilai *flow accumulation* yang tinggi mengindikasikan konsentrasi aliran air yang besar pada suatu titik, yang pada umumnya membentuk alur sungai dan anak sungai. Analisis ini diturunkan dari hasil flow direction, di mana setiap sel dihitung jumlah sel di hulu yang mengalirkan airnya melewati sel tersebut. Semakin besar nilai akumulasi, semakin besar pula volume air yang melewati titik tersebut, yang berkorelasi langsung dengan potensi genangan dan banjir.

Pemodelan Hidrologi SWAT+

Pemodelan hidrologi dilakukan menggunakan SWAT+ (*Soil and Water Assessment Tool*) untuk mensimulasikan proses hidrologi DAS dan menghasilkan peta sebaran potensi genangan. Model ini mengintegrasikan data elevasi, tutupan lahan, jenis tanah, dan data iklim untuk menghasilkan simulasi debit aliran, limpasan permukaan, dan sebaran dataran banjir (*floodplain*). Parameter keluaran yang dianalisis meliputi rata-rata aliran keluar bulanan (*flow out monthly means*) dan sebaran area dataran banjir hasil inversi.

Dalam penelitian ini, hasil pemodelan SWAT+ digunakan untuk menghasilkan peta inversi dataran banjir yang merepresentasikan wilayah yang berpotensi tergenang saat debit sungai meningkat. Peta ini menjadi salah satu komponen kunci dalam memahami sebaran spasial risiko banjir dan merumuskan skenario penanganan yang tepat.

Analisis Neraca Air dan Mekanisme Banjir

Analisis neraca air hidrologis dilakukan untuk mengevaluasi keseimbangan antara masukan (curah hujan) dan keluaran (evapotranspirasi, infiltrasi, dan

limpasan) pada DAS Cidurian. Koefisien aliran permukaan dan nilai *Curve Number* (CN) dihitung untuk mengestimasi proporsi curah hujan yang berubah menjadi limpasan permukaan. Mekanisme banjir dianalisis berdasarkan integrasi hasil seluruh analisis di atas dengan mempertimbangkan data kronologis kejadian banjir dan kondisi eksisting lapangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kemampuan Drainase Spasial

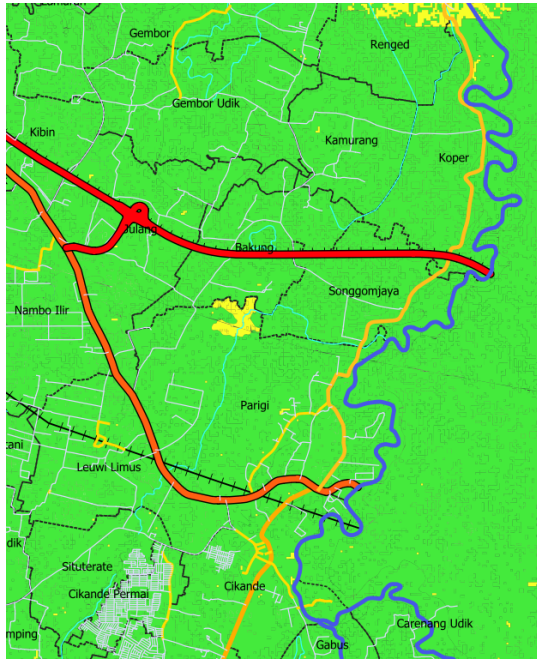
Analisis kemampuan drainase dilakukan terhadap 14.516 unit spasial yang merepresentasikan kondisi fisik wilayah secara rinci. Hasil klasifikasi menunjukkan distribusi kelas kemampuan drainase yang sangat timpang, dengan dominasi kelas Rendah yang mencapai 96,2% dari total unit spasial (Tabel 1).

Tabel 1. Distribusi Kelas Kemampuan Drainase

Kelas	Jumlah Unit	Persentase (%)
Sangat Rendah	0	0,0
Rendah	13.958	96,2
Sedang	554	3,8
Tinggi	4	0,03
Sangat Tinggi	0	0,0

Sumber: Analisis (2026)

Dominasi kelas kemampuan drainase Rendah mengindikasikan bahwa hampir seluruh wilayah studi memiliki keterbatasan dalam mengalirkan air permukaan secara alami. Kondisi ini konsisten dengan temuan Kusumo dan Nursari (2016) yang mengidentifikasi bahwa wilayah hilir DAS Cidurian di Kabupaten Serang tergolong sangat rawan banjir. Keberadaan kelas Sedang (3,8%) dan Tinggi (0,03%) yang sangat terbatas menunjukkan bahwa area dengan kemampuan drainase yang memadai hanya mencakup sebagian kecil wilayah dan tidak mampu memberikan pengaruh yang berarti terhadap pengurangan risiko genangan secara keseluruhan.



Gambar 2. Peta Kemampuan Drainase pada Areal Kawasan Sekitar Banjir di KM 50
Sumber: Analisis (2026)

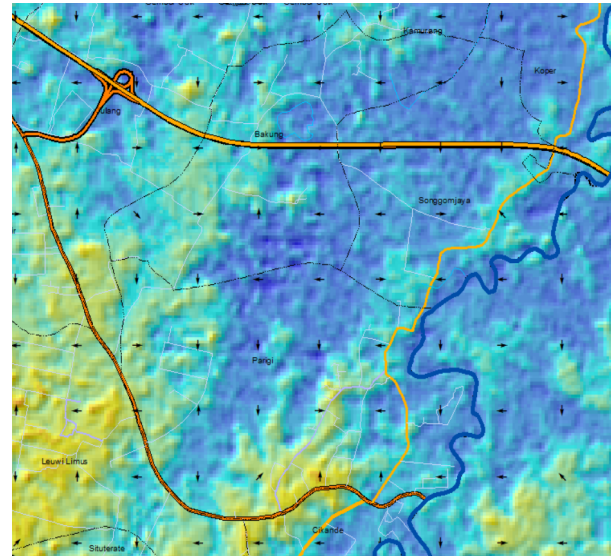
Implikasi dari kondisi ini adalah bahwa area dengan kemampuan drainase rendah memerlukan intervensi melalui upaya mitigasi aliran permukaan, seperti peningkatan kapasitas saluran drainase, pengendalian limpasan, serta penerapan infrastruktur hijau. Sementara itu, area dengan kemampuan drainase yang relatif baik perlu dijaga agar fungsi alaminya tidak mengalami degradasi akibat perubahan penggunaan lahan.

Distribusi kemampuan drainase yang sangat timpang ini juga memiliki implikasi terhadap perencanaan tata ruang. Pembangunan baru di wilayah dengan kemampuan drainase rendah harus memenuhi standar minimal sistem drainase yang lebih ketat, termasuk penyediaan kolam retensi atau detensi untuk menampung kelebihan air hujan sebelum dialirkan ke sistem drainase utama. Hal ini sejalan dengan prinsip pengendalian limpasan pada sumber (*source control*) yang direkomendasikan dalam berbagai pedoman pengelolaan air hujan perkotaan modern.

Analisis DEM dan Arah Aliran Permukaan

Hasil interpretasi DEM menunjukkan variasi elevasi yang jelas antara bagian barat-tengah dan bagian timur wilayah studi. Gradasi warna pada peta DEM mengindikasikan bahwa wilayah Desa Bakung dan Desa Songgom Jaya secara dominan berada pada zona elevasi rendah hingga sedang, membentuk area cekungan relatif (*local lowland*) dibandingkan wilayah di sekitarnya, terutama bagian selatan dan

barat daya yang memiliki elevasi lebih tinggi.



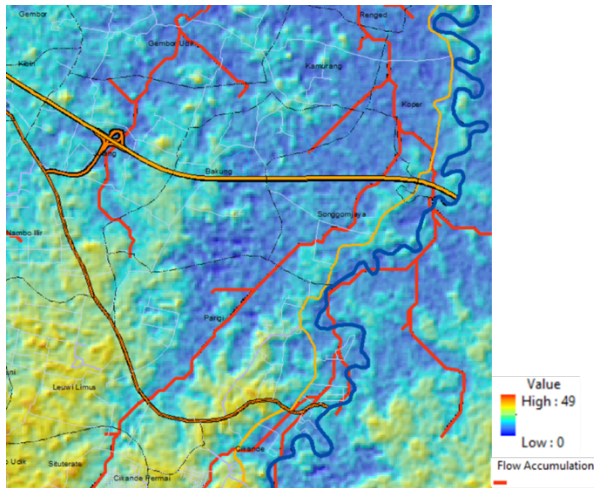
Gambar 3. Peta DEM dan Arah Aliran (*Flow Direction*)
Sumber: Analisis (2026)

Secara topografis, Desa Bakung berada tepat di jalur lintasan aliran dari wilayah yang lebih tinggi di bagian barat dan selatan. Desa Songgom Jaya terletak lebih ke timur dan berada pada dataran rendah yang berfungsi sebagai area lintasan sekaligus penerima aliran. Berdasarkan pola elevasi DEM, arah aliran permukaan dominan bergerak dari barat dan barat daya menuju ke timur dan timur laut, mengikuti kemiringan alami lahan dan bermuara pada alur sungai utama di sisi timur wilayah.

Karakteristik topografi ini menyebabkan Desa Bakung dan Desa Songgom Jaya memiliki kerentanan tinggi terhadap genangan dan banjir, terutama saat terjadi hujan dengan intensitas tinggi. Hal ini diperkuat oleh topografi landai yang memperlambat kecepatan aliran air, kapasitas drainase alami yang terbatas, serta kedekatan dengan jaringan sungai di bagian timur wilayah.

Akumulasi Aliran (*Flow Accumulation*)

Analisis *flow accumulation* mengonfirmasi pola aliran terpusat yang konsisten dengan hasil analisis DEM. Nilai *flow accumulation* tinggi terkonsentrasi pada jalur-jalur yang membentuk alur sungai dan anak sungai, sementara nilai rendah tersebar pada area punggung atau dataran relatif tinggi.



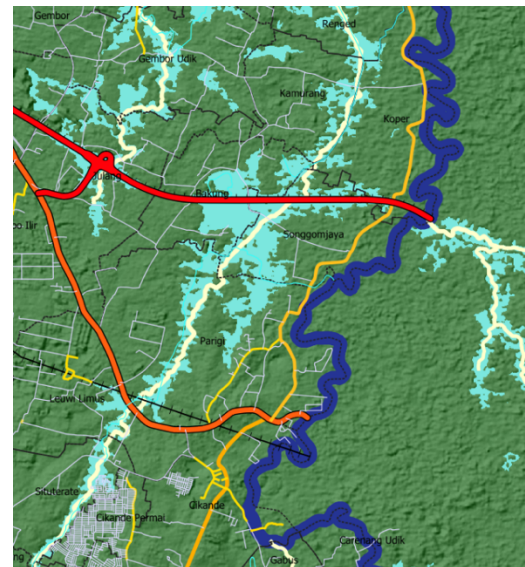
Gambar 4. Peta Flow Accumulation
Sumber: Analisis (2026)

Wilayah Desa Bakung berada pada zona lintasan aliran dengan nilai *flow accumulation* menengah hingga tinggi. Aliran permukaan dari area Gembor Udik dan sekitarnya terkonsentrasi dan melewati wilayah Bakung sebelum diteruskan ke wilayah yang lebih rendah di bagian timur. Desa Songgom Jaya menunjukkan karakteristik *flow accumulation* tinggi, terutama pada bagian wilayah yang berdekatan dengan alur sungai utama. Area ini berperan sebagai wilayah akumulasi akhir (*downstream area*), tempat bertemunya aliran dari berbagai arah.

Tingginya nilai *flow accumulation* pada Desa Songgom Jaya mengindikasikan konsentrasi aliran air yang besar, potensi genangan dan banjir yang lebih tinggi dibandingkan wilayah lain, serta ketergantungan besar terhadap kapasitas sungai utama dalam menyalurkan debit air. Pola ini konsisten dengan temuan Kusumo dan Nursari (2016) yang menunjukkan bahwa wilayah hilir DAS Cidurian pada dataran rendah merupakan zona paling rawan terhadap banjir.

Hasil Pemodelan SWAT+ dan Sebaran Genangan

Hasil pemodelan SWAT+ menunjukkan sebaran potensi genangan yang dipengaruhi oleh kombinasi debit aliran, kondisi topografi, serta kapasitas sungai dan dataran banjir. Genangan banjir terkonsentrasi mengikuti alur sungai utama dan anak sungai, terutama pada wilayah dengan nilai aliran keluar yang relatif tinggi. Sebaran dataran banjir (*floodplain*) terlihat meluas pada bagian tengah hingga timur wilayah studi, membentuk koridor banjir yang sejajar dengan alur sungai utama.



Gambar 5. Peta Pemodelan Banjir SWAT+ dan Sebaran Floodplain
Sumber: Analisis (2026)

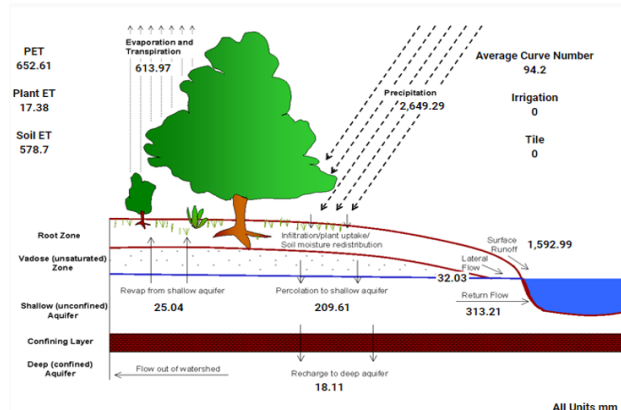
Desa Bakung berada pada zona dengan potensi genangan menengah dan secara hidrologis berfungsi sebagai wilayah lintasan aliran dari daerah hulu. Genangan di Desa Bakung cenderung bersifat lokal, mengikuti saluran alami, dan dipicu oleh limpasan dari anak sungai dan drainase permukaan. Sementara itu, Desa Songgom Jaya menunjukkan tingkat kerentanan yang lebih tinggi, ditandai dengan luasan *floodplain* yang lebih besar, kedekatan langsung dengan sungai utama, dan nilai aliran keluar yang lebih tinggi. Wilayah ini berperan sebagai zona akumulasi banjir di mana aliran dari Desa Bakung dan wilayah selatan (Parigi, Cikande) bertemu dan terkonsentrasi.

Secara umum, mekanisme banjir pada wilayah studi mengikuti arah aliran alami dari barat dan barat daya menuju ke timur dan tenggara. Ketika debit sungai meningkat, air meluap dari palung sungai ke dataran banjir di sekitarnya, terutama pada area dengan topografi landai dan elevasi rendah. Pola banjir yang terbentuk konsisten dengan hasil analisis DEM dan *flow accumulation*, sehingga memperkuat kesimpulan bahwa wilayah studi memiliki tingkat kerentanan banjir yang signifikan dan memerlukan penanganan terpadu.

Neraca Air Hidrologi DAS Cidurian

Analisis neraca air hidrologis pada DAS Cidurian menunjukkan ketidakseimbangan yang signifikan antara masukan dan kemampuan retensi lahan. Curah hujan tahunan yang tinggi tidak diimbangi oleh kemampuan infiltrasi yang memadai. Rasio limpasan permukaan mencapai 0,83 dan nilai *Curve Number* (CN) rata-rata sebesar 94,2, yang

menunjukkan bahwa sebagian besar air hujan berubah menjadi limpasan permukaan.



Warning:

- Rasio limpasan permukaan mungkin tinggi > 0,80 (0,83)
- Limpasan permukaan mungkin berlebihan
- Kelemahan: Data Modelling Hanya 1 tahun sehingga hasil yang lebih baik dilakukan 2-5 Tahun

Gambar 6. Neraca Air Hidrologi yang Terjadi pada DAS Cidurian
Sumber: Analisis (2026)

Mekanisme *Compound Flooding* di Ruas Tol KM 50

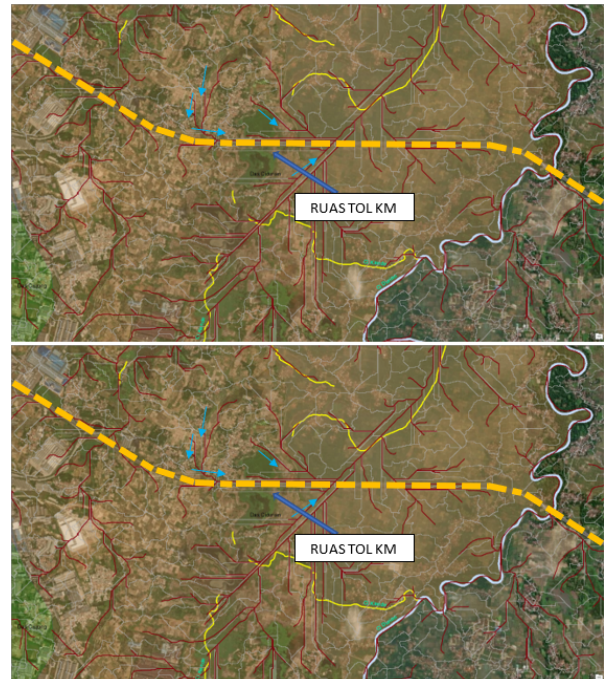
Berdasarkan integrasi seluruh hasil analisis dengan data kronologis kejadian banjir, mekanisme banjir di KM 50 teridentifikasi sebagai *compound flooding* yang melibatkan tiga proses simultan.

Proses pertama adalah kondisi *tailwater submergence*. Saat curah hujan ekstrem, elevasi Muka Air Banjir (MAB) Sungai Cidurian naik melampaui elevasi tebing sungai (*bankfull capacity*). Kondisi ini menyebabkan saluran drainase lokal, yaitu anak-anak sungai kecil yang mengalir ke arah Sungai Cidurian, mengalami kondisi *tailwater submergence*. Aliran dari daerah tangkapan lokal di sisi selatan tidak dapat membuang airnya secara gravitasi ke Sungai Cidurian karena elevasi muka air sungai sudah lebih tinggi dari elevasi saluran drainase.

Proses kedua adalah akumulasi air balik (*backwater accumulation*). Karena akses ke outlet utama (Sungai Cidurian) tertutup, aliran lokal berbalik arah atau stagnan, lalu bergabung dengan air yang melimpas dari bibir Sungai Cidurian. Massa air gabungan dari limpasan lokal dan luapan sungai ini terakumulasi di area cekungan (*depression area*) di sisi selatan jalan tol, yang berfungsi sebagai area penampungan air sementara.

Proses ketiga adalah limpasan badan jalan (*overtopping*). Ketika volume akumulasi air terus meningkat dan elevasinya melampaui elevasi terendah dari timbunan jalan tol, maka badan jalan tol KM 50 berubah fungsi menjadi pelimpah (*weir*). Air

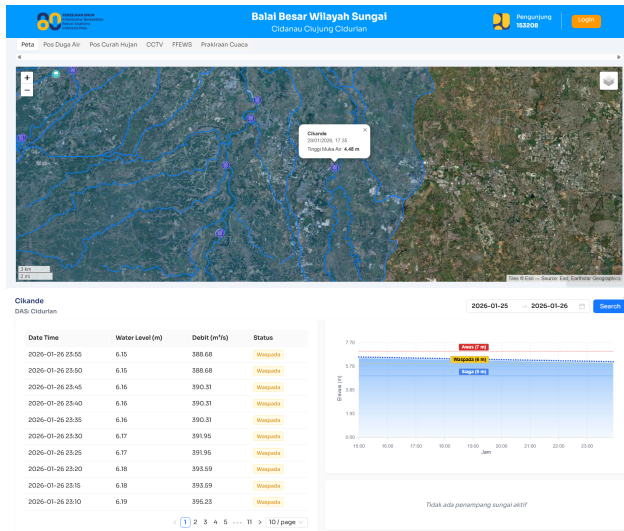
melimpas memotong jalan dari sisi selatan ke utara dengan energi yang cukup besar, menyeret material dan membahayakan lalu lintas.



Gambar 7. Diagram Mekanisme *Compound Flooding* di KM 50
Sumber: Analisis (2026)

Mekanisme *compound flooding* yang teridentifikasi di KM 50 memiliki implikasi penting terhadap pendekatan penanganan. Pendekatan konvensional yang berfokus pada peningkatan kapasitas drainase lokal (memperbesar dimensi gorong-gorong) tidak akan efektif selama kondisi *tailwater submergence* masih terjadi.

Data pos duga air Cikande menunjukkan bahwa pada puncak kejadian banjir (25 Januari 2026), TMA Sungai Cidurian mencapai 6,19 m dengan debit 395,23 m³/detik. Kondisi ini mengonfirmasi bahwa sungai telah melampaui *bankfull capacity*, yang menjadi pemicu utama terjadinya *tailwater submergence* pada sistem drainase lokal. Visualisasi elevasi jalan tol dibandingkan dengan elevasi bibir sungai menunjukkan bahwa pada kondisi banjir puncak, jalan tol berada sejajar atau lebih rendah dari muka air banjir tertinggi, sehingga drainase samping (*side ditch*) tergenang akibat efek air balik (*backwater*).



Gambar 8. Data Pos Duga Air Cikande pada Puncak Kejadian Banjir (25 Januari 2026)
Sumber: Analisis (2026)



Gambar 9. Visualisasi Elevasi Jalan Tol vs Elevasi Bibir Sungai pada Kondisi Banjir
Sumber: Analisis (2026)

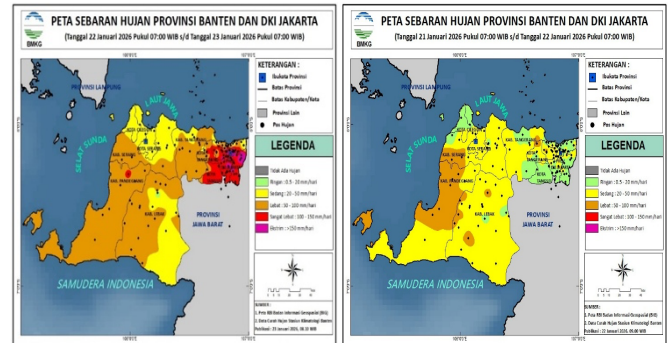
Analisis Curah Hujan Pemicu Banjir

Berdasarkan data spasial hujan harian dari BMKG, kejadian banjir dipicu oleh akumulasi curah hujan dengan intensitas tinggi yang mengguyur wilayah Banten secara persisten selama 48 jam sebelum puncak genangan. Mekanisme pemicu terbagi dalam dua fase.

Fase pertama (21-22 Januari 2026) merupakan fase kejenuhan tanah, di mana wilayah Kabupaten Serang dan Kabupaten Lebak (daerah tangkapan air hulu Sungai Cidurian) diguyur hujan dengan intensitas sedang (20-50 mm/hari) hingga lebat (50-100 mm/hari). Hujan pada fase ini berperan sebagai kelembaban anteseden (*antecedent moisture*) yang mengisi pori-pori tanah hingga jenuh, sehingga kapasitas infiltrasi menurun secara drastis.

Fase kedua (22-23 Januari 2026) merupakan fase puncak dengan intensitas ekstrem. Wilayah Kabupaten Serang (lokasi KM 50) menerima hujan

lebat (50-100 mm/hari), sementara Kabupaten Tangerang (sisi timur Sungai Cidurian) mengalami hujan sangat lebat (100-150 mm/hari) hingga ekstrem (lebih dari 150 mm/hari). Di hulu (Kabupaten Lebak), hujan dengan intensitas sedang hingga lebat terus berlanjut, mengirimkan debit kiriman (*flood routing*) yang besar ke arah hilir.



Gambar 10. Peta Sebaran Hujan Provinsi Banten (21-23 Januari 2026)
Sumber: Analisis (2026)

Kombinasi antara tanah yang sudah jenuh dan curah hujan intensitas tinggi memicu koefisien aliran permukaan mendekati angka maksimum. Volume air yang sangat besar bergerak secara serentak menuju Sungai Cidurian, melampaui kapasitas tampung sungai, dan melimpas ke area terendah di sekitarnya, yaitu badan jalan tol di KM 50. Mekanisme dua fase ini sesuai dengan konsep *Antecedent Moisture Condition* (AMC) III dalam metode SCS-CN (USDA-NRCS, 2004), di mana tanah yang sudah jenuh akibat hujan sebelumnya menghasilkan limpasan yang jauh lebih besar pada hujan berikutnya.

Keterkaitan dengan Rencana Tata Ruang

Berdasarkan arahan Rencana Detail Tata Ruang (RDTR) Sekitar Kawasan Industri Cikande Tahun 2024-2044, lokasi studi berada pada kawasan dengan intensitas pemanfaatan ruang yang relatif tinggi untuk peruntukan industri. Hasil analisis hidrologi menunjukkan bahwa wilayah kajian merupakan bagian dari sistem aliran permukaan dan jaringan drainase eksisting. Perubahan tutupan lahan akibat pengembangan kawasan industri berpotensi meningkatkan volume limpasan permukaan dan menurunkan kemampuan infiltrasi alami apabila tidak dikendalikan secara memadai.

Pengalaman dari kasus banjir KM 50 ini juga memberikan pelajaran penting mengenai perlunya koordinasi lintas sektor dalam pengelolaan banjir. Penanganan banjir pada infrastruktur jalan tol yang disebabkan oleh luapan sungai utama tidak dapat

dipandang sebagai masalah drainase lokal semata, melainkan memerlukan penanganan terintegrasi antara pengelola jalan tol dan pengelola sumber daya air (BBWS C3). Wang dkk. (2022) menekankan bahwa ketahanan banjir yang efektif memerlukan kolaborasi antar-pemangku kepentingan dan pendekatan yang menyeluruh dari hulu hingga hilir.

Skenario Penanganan Teknis

Berdasarkan hasil analisis hidrologi terpadu, dirumuskan tiga skenario penanganan teknis sebagai berikut.

Skenario pertama adalah peninggian elevasi jalan tol (*raising profile*). Konsep ini melibatkan rekonstruksi jalan dengan menimbun setinggi elevasi banjir tertinggi ditambah freeboard 50cm. Skenario ini memberikan jaminan keamanan tertinggi terhadap gangguan banjir, namun memerlukan biaya investasi yang besar, waktu konstruksi yang lama, dan berpotensi mengganggu lalu lintas selama pelaksanaan.

Skenario kedua adalah normalisasi dan tanggul sungai (*levee*). Konsep ini melibatkan pengerukan sedimentasi sungai dan pembangunan dinding penahan tanah (*sheet pile* atau tanggul tanah) di sisi tol. Biaya konstruksi relatif lebih rendah dibandingkan skenario pertama, namun memiliki ketergantungan pada pemeliharaan sungai dan risiko kegagalan tanggul.

Skenario ketiga adalah penambahan kapasitas saluran lintas (*cross-drain*). Konsep ini berfokus pada pembangunan box culvert baru atau duplikasi struktur eksisting yang melintang tegak lurus terhadap as jalan tol. Skenario ini mensyaratkan dua prasyarat teknis yang bersifat mutlak: pembangunan saluran gendong (*collector channel*) sejajar jalan tol di sisi hulu untuk menangkap dan mengarahkan aliran permukaan secara terpusat, serta normalisasi saluran hilir untuk menurunkan elevasi muka air di sisi hilir (*tailwater level*) agar tercipta gradien hidrolik yang memadai. Biaya konstruksi skenario ini paling efisien dan gangguan lalu lintas dapat diminimalkan, namun efektivitasnya sangat bergantung pada elevasi muka air Sungai Cidurian saat banjir dengan periode ulang tinggi.

KESIMPULAN

1. Analisis kemampuan drainase spasial menunjukkan bahwa 96,2% wilayah studi (13.958 dari 14.516 unit spasial) tergolong dalam kelas kemampuan drainase rendah. Kondisi ini mengindikasikan keterbatasan wilayah dalam mengalirkan air permukaan secara alami dan

konsisten dengan karakteristik fisik DAS Cidurian yang secara umum tergolong buruk.

2. Analisis DEM dan *flow accumulation* mengonfirmasi bahwa Desa Bakung berfungsi sebagai wilayah lintasan aliran, sedangkan Desa Songgom Jaya berperan sebagai zona akumulasi akhir. Arah aliran permukaan dominan bergerak dari barat dan barat daya menuju ke timur dan tenggara, mengikuti kemiringan alami lahan dan bermuara pada sungai utama di sisi timur wilayah studi.
3. Mekanisme banjir di ruas tol KM 50 teridentifikasi sebagai *compound flooding* yang melibatkan tiga proses simultan: kondisi tenggelam outlet pada saluran drainase lokal, akumulasi air balik pada cekungan di sisi hulu jalan tol, dan limpasan (*overtopping*) yang memotong badan jalan. Temuan ini menegaskan bahwa banjir bukan semata disebabkan oleh keterbatasan dimensi drainase tol, melainkan karena hilangnya gradien hidrolik menuju sungai utama.
4. Neraca air hidrologi DAS Cidurian menunjukkan nilai CN rata-rata 94,2 dan rasio limpasan permukaan 0,83, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar curah hujan berubah menjadi limpasan permukaan. Kondisi ini diperparah oleh curah hujan persisten selama 48 jam yang menyebabkan kejenuhan tanah dan memicu koefisien aliran permukaan mendekati angka maksimum.
5. Tiga skenario penanganan teknis dirumuskan dengan mempertimbangkan efektivitas, biaya, dan kendala teknis. Skenario peninggian elevasi jalan memberikan jaminan layanan tertinggi, sementara skenario penambahan *cross-drain* yang terintegrasi dengan saluran gendong dan normalisasi hilir menawarkan solusi yang lebih efisien secara biaya dengan catatan bahwa efektivitasnya bergantung pada kondisi muka air sungai.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, E., Maryono, M., Muhammad, F., Soeprbowati, T. R., & Maas, P. (2024). Comparison of SWAT-based ecohydrological modeling in the Rawa Pening Catchment Area, Indonesia. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 13(1), 45-58.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4),

1491-1508.

- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., Volk, M., & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the Soil and Water Assessment Tool. *Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 115-130.
- Johnston, I., Murphy, W., & Holden, J. (2021). A review of floodwater impacts on the stability of transportation embankments. *Earth-Science Reviews*, 215, 103553.
- Danso, S. Y., Ma, Y., & Bam, S. (2020). Spatio-temporal distribution of flood occurrence in Ghana. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100756.
- Fadlin, F., Widiyati, D. A., Sofyan, A. B., & Tahrir, M. (2024). Land use change and Soil Conservation Services Curve Number (SCS-CN) in Karangmumus Watershed Samarinda. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 72(10), 1-9.
- Green, J., Haigh, I. D., Quinn, N., Neal, J., Wahl, T., Wood, M., Eilander, D., de Ruyter, M., Ward, P., & Camus, P. (2025). Review article: A comprehensive review of compound flooding literature with a focus on coastal and estuarine regions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25, 747-816.
- Jafarzadegan, K., Moradkhani, H., Pappenberger, F., Moftakhari, H., Bates, P., Abbaszadeh, P., Marber, K., & Maruf, S. (2023). Recent advances and new frontiers in riverine and coastal flood modeling. *Reviews of Geophysics*, 61(2), e2022RG000788.
- Kasmalkar, I. G., Serafin, K. A., Miao, Y., Bick, I. A., Ortolano, L., Ouyang, D., & Suckale, J. (2020). When floods hit the road: Resilience to flood-related traffic disruption in the San Francisco Bay Area and beyond. *Science Advances*, 6(32), eaba2423.
- Kure, S., Farid, M., Fukutani, Y., Muhari, A., Bricker, J. D., Udo, K., & Mano, A. (2021). Flood inundation simulations based on GSMaP satellite rainfall data in Jakarta, Indonesia. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8, 34.
- Kusumo, P., & Nursari, E. (2016). Zonasi tingkat kerawanan banjir dengan Sistem Informasi Geografis pada DAS Cidurian Kab. Serang, Banten. *STRING (Satuan Tulisan Riset dan Inovasi Teknologi)*, 1(1), 29-38.
- Nageswara Rao, K. (2020). Analysis of surface runoff potential in ungauged basin using basin parameters and SCS-CN method. *Applied Water Science*, 10(1), 47.
- Nastiti, E. U., Asih, A. S., & Hermawan, A. (2024). Pengaruh perubahan tata guna lahan terhadap debit banjir pada DAS Cibanten. *5th CEEDRIMS*, 5(1), 10-20.
- Nurchayaningtyas, D., Suhartanto, E., & Harisuseno, D. (2024). Flood prone mapping based on surface runoff analysis using the SWAT model at the upstream side of Brantas. *Jurnal Teknik Pengairan*, 15(1), 37-49.
- Ogato, G. S., Bantider, A., Abebe, K., & Geneletti, D. (2020). Geographic information system (GIS)-based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West Shoa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100659.
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 04/PRT/M/2015 tentang Kriteria dan Penetapan Wilayah Sungai.
- Permatasari, R., Adityawan, M. B., Kuntoro, A. A., & Wigati, S. (2024). Projected Curve Number (CN) changes and surface runoff at the Citarum-Majalaya Watershed. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 19(5), 1411-1422.
- Pregolato, M., Ford, A., Wilkinson, S. M., & Dawson, R. J. (2017). The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 67-81.
- Rodrigue, J. P. (2020). *The Geography of Transport Systems* (5th ed.). Routledge.
- Saleh, F., Ramaswamy, V., Georgas, N., Blumberg, A. F., & Pullen, J. (2020). Developing a modeling framework to simulate compound flooding: When storm surge interacts with riverine flow. *Frontiers in Climate*, 2, 609610.
- Sebayang, I. S. (2022). Pemanfaatan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk analisis tingkat kerawanan banjir pada DAS Cisadane. *Rekayasa Sipil*, 11(1), 28-37.
- Suharyanto, A. (2021). Estimating flood inundation depth along the arterial road based on the rainfall intensity. *Civil and Environmental Engineering*, 17(1), 66-81.
- Triasary, K., Purwanto, M. Y. J., & Tarigan, S. D. (2021). Beberapa skenario penggunaan lahan untuk perbaikan kondisi hidrologi di Daerah Aliran Sungai Cidurian. *Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, 5(2), 121-140.
- USDA-NRCS. (2004). *National Engineering Handbook*, Chapter 9 and 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall, Part 630 Hydrology. USDA, Washington DC.
- Wang, L., Cui, S., Li, Y., Huang, H., Manandhar, B.,

Analisis Kerentanan Banjir.., Niko Abdian⁽¹⁾, Sandy Riza Permana⁽²⁾, Yudistira Wibowo⁽³⁾, Husein Triono⁽⁴⁾, Aditya Wibawa Mukti⁽⁵⁾

Nitivattananon, V., Fang, X., & Huang, W. (2022). A review of the flood management: From flood control to flood resilience. *Heliyon*, 8(11), e11763.

Zscheischler, J., Westra, S., van den Hurk, B. J. J. M., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., AghaKouchak, A., Bresch, D. N., Leonard, M., Wahl, T., & Zhang, X. (2018). Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 8, 469-477.