

---

## Analisis Kos Faedah dalam Kerangka Pembuat Keputusan bagi Pengurusan Tebatan Banjir

Zuriyati Yusof<sup>1</sup>, Siti Multazimah Mohamad Faudzi<sup>2</sup>, Noor Aida Saad<sup>2,\*</sup>, dan Herni Halim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jabatan Pengairan dan Saliran Daerah Batu Pahat,  
83000 Batu Pahat, Johor

<sup>2</sup>Pusat Penyelidikan Kejuruteraan Sungai dan Saliran Bandar (REDAC), Universiti Sains Malaysia,  
Nibong Tebal, Seberang Perai Selatan,  
143000 Pulau Pinang

<sup>3</sup>Pusat Pengajian Kejuruteraan Awam, Kampus Kejuruteraan, Universiti Sains Malaysia, Nibong  
Tebal, Seberang Perai Selatan,  
143000 Pulau Pinang

\*Pengarang Berurusan: aidaaad@usm.my

### Abstrak

Banjir di kawasan sosioekonomi menyebabkan kerosakan besar kepada infrastruktur, menjejaskan sumber pendapatan masyarakat serta memberi beban jangka panjang terhadap alam sekitar dan kewangan. Langkah tebatan banjir secara konvensional memerlukan pelaburan awam yang tinggi; oleh itu pendekatan yang sistematik dan telus diperlukan bagi memastikan pengagihan sumber yang terhad dapat dilaksanakan secara optimum. Kajian ini membentangkan satu kerangka pembuatan keputusan bersepadu bagi pengurusan tebatan banjir berasaskan Analisis Kos-Faedah (Cost-Benefit Analysis, CBA) dengan menggabungkan pemodelan hidrodinamik dan penilaian ekonomi bagi menyokong perancangan pelaburan. Peta bahaya banjir dan senario mitigasi dibangunkan melalui simulasi hidrodinamik untuk mengenal pasti keluasan dan kedalaman banjir serta kerosakan berkaitan. Output fizikal kemudiannya diterjemahkan kepada nilai monetari untuk menganggar faedah langsung dan tidak langsung seperti pengurangan kerugian, peningkatan sosioekonomi dan penambahbaikan alam sekitar. Nilai tersebut dibandingkan dengan kos modal serta kos operasi dan penyelenggaraan bagi menentukan petunjuk ekonomi utama seperti Nisbah Faedah-Kos. Kerangka ini membolehkan keutamaan langkah mitigasi ditentukan berdasarkan prestasi teknikal dan kecekapan ekonomi. Hasil kajian menunjukkan bahawa projek yang mempunyai faedah melebihi kos menyumbang kepada kesejahteraan masyarakat dan daya tahan ekonomi. Pendekatan bersepadu ini menyokong perancangan strategik dan keputusan pelaburan yang optimum ke arah ketahanan banjir jangka panjang.

**Kata kunci:** Analisis kos-faedah, kerangka pembuat keputusan, mitigasi banjir, pemodelan hidrodinamik, pengurusan tebatan banjir, penilaian ekonomi

## A Cost-Benefit Analysis Approach to Decision-Making in Flood Mitigation Management

### Abstract

Flooding in socio-economic areas causes severe damage to infrastructure, disrupts livelihoods, and imposes long-term environmental and financial burdens. Conventional flood mitigation measures require substantial public investment; therefore, a systematic and transparent approach is necessary to ensure the optimal allocation of limited resources. This study presents an integrated decision-making framework for flood mitigation management based on Cost-Benefit Analysis (CBA), combining hydrodynamic modelling and economic evaluation to support investment planning. Flood hazard maps and mitigation scenarios were developed through hydrodynamic simulations to determine flood extent, depth, and associated damages. The physical outputs were subsequently translated into monetary values to estimate direct and indirect benefits, including avoided damages, socio-economic improvements, and environmental enhancements. These values were compared with capital, operation, and maintenance costs to determine key economic indicators such as the Benefit-Cost Ratio. The proposed framework enables the prioritization of mitigation measures based on both technical performance and economic efficiency. The results indicate that projects with benefits exceeding costs contribute to societal welfare and economic resilience. This integrated engineering-economic approach provides a structured tool to support strategic planning and optimal investment decisions toward long-term flood resilience.

**Keywords:** Cost–benefit analysis, decision-making framework, economic evaluation, flood mitigation management, hydrodynamic modelling

**Article history:**

Submitted: 02/02/2026; Revised: 12/05/2026; Accepted: 30/06/2026; Online: 30/06/2026

## PENDAHULUAN

Banjir bukan sahaja bencana alam yang memberikan implikasi kewangan yang tinggi, malah turut meragut banyak nyawa dan harta benda. Banjir merupakan fenomena meteorologi dan hidrologi semula jadi yang memberi kesan kepada keseimbangan ekonomi dan sosial. Aktiviti ekonomi manusia yang sedia ada dan kerosakan ekologi bumi akan menimbulkan ancaman terhadap isu kelestarian. Kajian terdahulu menunjukkan bahawa untuk mencapai pembangunan mampan, pelaburan alam sekitar perlu dinilai berdasarkan kos dan manfaatnya. Pelaksanaan projek tebatan banjir memerlukan pihak pembuat keputusan, yang terdiri daripada pihak kerajaan, menggunakan kaedah yang sesuai untuk menentukan keutamaan projek tebatan banjir untuk dilaksanakan. Walaupun pelbagai kajian telah menilai keberkesanan langkah tebatan banjir menggunakan pemodelan hidrodinamik atau analisis ekonomi secara berasingan, integrasi kedua-dua pendekatan ini dalam satu kerangka membuat keputusan yang sistematik masih kurang diberi perhatian. Kebanyakan kajian menumpukan kepada analisis teknikal atau penilaian ekonomi secara terpisah tanpa menyediakan satu pendekatan bersepadu yang dapat menyokong proses pembuatan keputusan secara lebih komprehensif dalam pengurusan tebatan banjir. Apabila satu kawasan sosioekonomi yang berisiko banjir dimasukkan ke dalam analisis kos-faedah (CBA) untuk langkah tebatan banjir, adalah penting juga untuk menilai bagaimana cadangan penyelesaian tebatan banjir ini akan memberi kesan kepada pelbagai aspek sosial dan ekonomi masyarakat. Secara realiti, kebanyakan pelaburan dalam pencegahan banjir hanya dilakukan selepas kerugian berlaku (Akhter et al., 2025a; Department of Statistics Malaysia, 2025; X. Lai et al., 2023; Yusof et al., 2024). Oleh itu, amat penting bagi para pembuat keputusan memahami bahawa setiap pilihan yang tersedia untuk pembangunan kawasan banjir mempunyai kos peluang yang perlu dibelanjakan demi tujuan sosial dan alam sekitar. Oleh itu, CBA bertujuan membantu pembuat keputusan dalam pengurusan tebatan banjir sepanjang proses pemilihan langkah tebatan banjir yang paling optimum. Kajian ini juga menyumbang kepada penilaian dan pengurusan pelaburan tebatan banjir dengan menggabungkan pemodelan hidrodinamik serta penilaian ekonomi menggunakan CBA untuk menilai langkah tebatan banjir bagi menyelesaikan masalah kejuruteraan. Ini memastikan keputusan berkaitan projek tebatan banjir dibuat dengan lebih ekonomik dan holistik melalui penggunaan pemodelan hidrodinamik dan CBA sebagai alat membuat keputusan. Sehubungan itu, kajian ini mencadangkan satu kerangka pembuatan keputusan yang menggabungkan pemodelan hidrodinamik dan analisis kos-faedah bagi menilai serta menentukan langkah tebatan banjir yang paling optimum dari segi teknikal dan ekonomi.

## KAJIAN LITERATUR

Banjir semula jadi berlaku akibat hujan lebat dan limpahan air, menyebabkan sungai melimpah. Keadaan menjadi lebih buruk apabila hujan lebat berlaku serentak dengan kejadian air pasang besar. Kawasan bandar paling terkesan apabila permukaan telap semula jadi digantikan dengan permukaan tidak telap seperti jalan berturap, konkrit dan bahan atap seperti logam dan jubin. Hujan berintensiti tinggi boleh menyebabkan banjir apabila permukaan tidak telap ini meningkatkan jumlah limpahan kerana air tidak dapat meresap ke tanah. Ini menyebabkan jumlah limpahan lebih tinggi berbanding permukaan telap sehingga berlaku banjir (Yin et al., 2025; Zhou et al., 2024). Kejadian banjir boleh menjadi lebih kritikal apabila kapasiti hidraulik sungai semakin berkurangan akibat proses pemendapan sedimen yang menyebabkan pendangkalan dasar sungai. Perubahan morfologi sungai ini menjejaskan keupayaan saluran sungai untuk menyalurkan aliran air yang tinggi semasa kejadian hujan lebat dan seterusnya meningkatkan kebarangkalian limpahan banjir di kawasan sekitarnya (Juan-Diego et al., 2025; Thapa et al., 2024). Perubahan iklim telah meningkatkan kekerapan dan kesan kejadian banjir di Malaysia. Keadaan geografi negara yang menerima hujan lebat semasa musim monsun serta hujan perolakan ketika cuaca panas dan lembap menjadikan Malaysia terdedah kepada kejadian banjir hampir setiap tahun, terutamanya antara bulan November hingga Februari. Sejarah menunjukkan bahawa kejadian banjir besar telah direkodkan sejak tahun 1926 dan terus berulang pada beberapa dekad berikutnya, termasuk pada tahun 1963, 1965, 1967, 1969, 1971, 1973, 1979, 1983, 1988, 1993 dan 1998. Pada abad ke-21, beberapa kejadian banjir besar turut dilaporkan seperti di Johor pada tahun 2006–2007, Kedah dan Perlis pada tahun 2009–2010, negeri-negeri Pantai Timur pada tahun 2014 serta Pulau Pinang pada tahun 2017 (N. Ahmad et al., 2025; Saad et al., 2024).

Bagi menangani isu ini, kerajaan Malaysia telah memperuntukkan perbelanjaan yang besar melalui Rancangan Malaysia Lima Tahun bagi melaksanakan pelbagai projek tebatan banjir di kawasan

bandar dan luar bandar. Pelaburan yang signifikan telah diperuntukkan bagi meningkatkan keupayaan infrastruktur pengurusan banjir dan sistem saliran sebagai usaha meningkatkan daya tahan negara terhadap kesan perubahan iklim (Azimi et al., 2019; Bank Negara Malaysia, 2024; Department of Statistics Malaysia, 2023; EPU, 2010, 2015; Ilyas et al., 2024; Mazura Nor Zulkifli, 2021). Selain itu, kerajaan turut memperkenalkan pelbagai dasar dan pelan strategik berkaitan pengurusan banjir, termasuk pelaksanaan Pelan Tebatan Banjir bernilai RM15 bilion sehingga tahun 2030 serta pengukuhan pengurusan risiko bencana melalui mekanisme seperti Arahan Majlis Keselamatan Negara No. 20 yang diselaraskan oleh Agensi Pengurusan Bencana Negara (BERNAMA, 2022).

Walau bagaimanapun, pelaksanaan projek tebatan banjir melibatkan kos yang tinggi, termasuk kos pengambilan tanah, kos pembinaan infrastruktur serta potensi kesan terhadap alam sekitar (Josephson et al., 2024; Ruangpan et al., 2024). Oleh itu, sebelum sesuatu projek dilaksanakan, penilaian yang menyeluruh terhadap kos dan faedah yang melibatkan aspek sosial, ekonomi dan alam sekitar adalah amat penting. Dengan peningkatan kejadian banjir serta kekangan peruntukan kewangan kerajaan, keutamaan projek tebatan banjir perlu ditentukan secara lebih sistematik dan berasaskan analisis yang menyeluruh. Justeru, pengukuhan proses membuat keputusan yang mengambil kira keseimbangan antara kos dan manfaat adalah penting bagi memastikan pelaksanaan langkah tebatan banjir yang lebih efektif, berdaya tahan dan mampan dalam jangka masa panjang (Lo et al., 2025; Rosmadi et al., 2024).

Tebatan banjir merujuk kepada strategi dan langkah yang diambil untuk mengurangkan atau mencegah kesan banjir terhadap manusia, harta benda serta alam sekitar. Langkah tebatan banjir adalah seperti sistem pertahanan struktur seperti benteng, kolam takungan, kerja menaiktaraf saluran sungai, terowong atau saluran lencongan banjir dan sistem pam serta pintu air (Department of Irrigation and Drainage, 2009a; Ginige et al., 2022; Kundzewicz et al., 2023; Ro & Garfin, 2023; Yazdan et al., 2022; Zhang et al., 2024). Oleh itu, langkah tebatan banjir bukan sekadar mengurangkan risiko banjir tetapi turut memperkukuh nilai alam sekitar, sosial dan ekonomi kawasan berisiko banjir. Cadangan langkah tebatan banjir pula dimodelkan melalui pemodelan hidrodinamik. Pemodelan hidrodinamik di dalam langkah tebatan banjir merupakan pendekatan analisis berasaskan model matematik yang digunakan untuk mensimulasikan ciri-ciri aliran air seperti paras air, halaju aliran dan keluasan kawasan limpahan banjir. Model ini menilai kesan pelbagai cadangan langkah tebatan banjir, seperti pelebaran sungai, pembinaan kolam takungan, benteng atau sistem saliran, terhadap pengurangan risiko banjir di sesuatu kawasan (R. Ahmad et al., 2025; Annis et al., 2020; Chen et al., 2024; Dhanapala et al., 2022; Sidek et al., 2021).

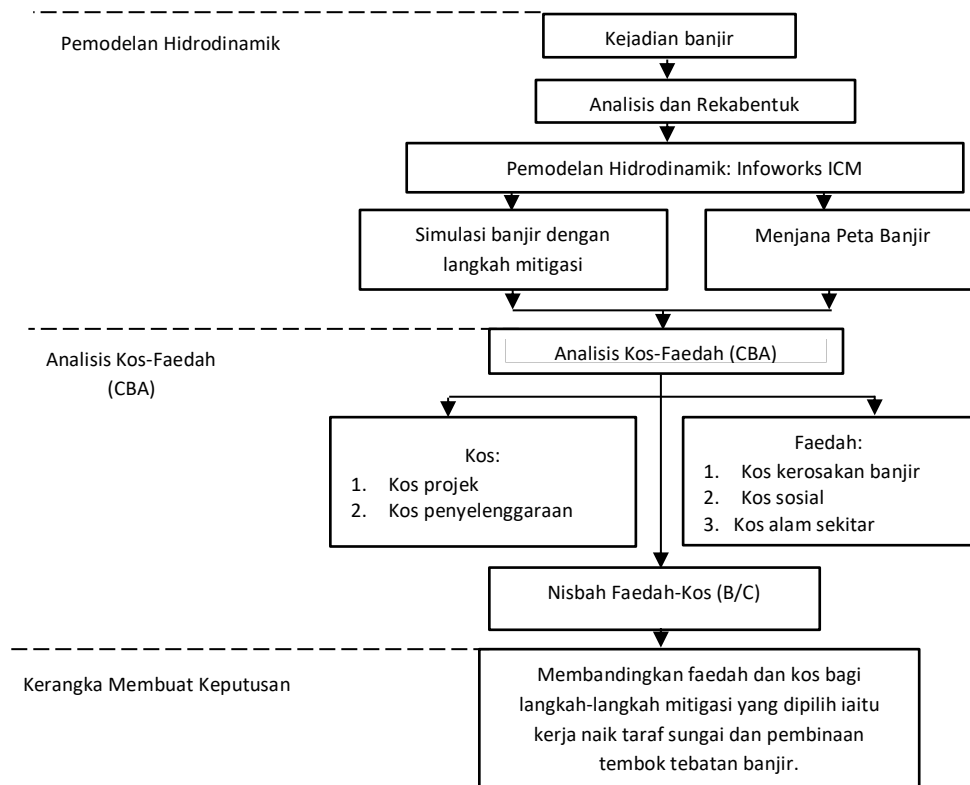
Pendekatan CBA menilai peruntukan sumber dan pelaburan dalam pengurusan tebatan banjir. Ini adalah untuk memastikan sumber terhad yang diperuntukkan untuk projek dapat menghasilkan keputusan terbaik dari segi keberkesanan operasi dan kelangsungan jangka. Projek tebatan banjir yang ekonomik perlu diberi keutamaan, dan penjimatan kos daripada perbelanjaan modal serta operasi dapat membantu pembuat keputusan menilai keupayaan kewangan bagi langkah dan strategi tebatan banjir panjang (Akhter et al., 2025b; Hattum et al., 2021; Jonkman & Kok, 2004; Lucia & Claudia, 2020; Wadumestriga Dona et al., 2025; Zeng et al., 2023). Dalam perancangan projek tebatan banjir, langkah mitigasi yang berdaya maju dari segi ekonomi perlu diberikan keutamaan bagi memastikan penggunaan peruntukan awam yang lebih efisien. Penilaian terhadap kos pelaburan, kos operasi serta potensi penjimatan kos dapat membantu pembuat keputusan menilai kemampuan kewangan bagi pelaksanaan strategi tebatan banjir yang dicadangkan. Justeru, penggunaan CBA menyediakan satu pendekatan yang sistematik bagi menyokong proses membuat keputusan dengan menilai keseimbangan antara kos dan manfaat sesuatu projek, sekali gus memaksimumkan nilai kepada pihak berkepentingan serta kerajaan. Dalam konteks pengurusan banjir, CBA digunakan untuk menentukan tahap pelaburan yang wajar dalam projek tebatan banjir berdasarkan penilaian sama ada manfaat projek tersebut melebihi kos yang terlibat. Kos yang dinilai merangkumi kos pelaksanaan projek, kos operasi dan penyelenggaraan. Manakala manfaat pula termasuk pengurangan kerosakan akibat banjir, pengurangan kos sosial kepada komuniti terjejas serta manfaat alam sekitar yang terhasil daripada pelaksanaan langkah mitigasi banjir. Sekiranya jumlah manfaat yang diperolehi melebihi kos yang ditanggung, projek tersebut dianggap berdaya maju untuk dilaksanakan kerana ia berpotensi meningkatkan kesejahteraan ekonomi dan keselamatan masyarakat (Alvarez et al., 2025; Davis et al., 2023; Molinari et al., 2021; Radhakrishnan et al., 2025; Zen et al., 2023).

Dalam membuat keputusan untuk melabur dalam projek tebatan banjir, Kerajaan perlu memastikan bahawa risiko kehilangan nyawa serta kerosakan harta benda akibat bencana banjir dapat dikurangkan secara berkesan, di samping meminimumkan kos yang dijangka terlibat. Sehubungan itu, penggunaan alat bantuan keputusan adalah penting bagi menyokong proses pembuatan keputusan yang lebih sistematik dan berasaskan bukti dalam mencapai objektif sesuatu projek mitigasi banjir (Chabot & Bertrand, 2025; Harding, 1998; Sibandze et al., 2025; Zheng et al.,

2025). Dalam konteks ini, penggunaan pemodelan hidrodinamik yang digabungkan dengan CBA dapat membantu menilai keberkesanan dan kecekapan pelbagai langkah mitigasi banjir yang dicadangkan, selain menunjukkan nilai ekonomi langkah-langkah tersebut dari perspektif pengurusan risiko banjir. Pendekatan ini membolehkan analisis kejuruteraan dan ekonomi digabungkan bagi membentuk satu rangka kerja yang komprehensif dalam menyokong proses pembuatan keputusan bagi pengurusan mitigasi banjir. Dalam kajian ini, pemodelan hidrodinamik menggunakan perisian InfoWorks ICM digabungkan dengan CBA bagi mengenal pasti langkah tebatan banjir yang paling berkesan dan menjimatkan kos. Integrasi kedua-dua pendekatan ini membolehkan simulasi keadaan aliran banjir dilakukan untuk menilai keberkesanan langkah mitigasi yang dicadangkan, seterusnya menyediakan asas yang lebih kukuh bagi pemilihan alternatif projek tebatan banjir yang optimum.

## METODOLOGI

Kajian ini dijalankan bagi membangunkan satu rangka kerja pembuatan keputusan yang mengintegrasikan pemodelan hidrodinamik dan analisis kos-faedah bagi menyokong pemilihan langkah tebatan banjir yang optimum dari segi keberkesanan teknikal dan kecekapan ekonomi. Metodologi kajian ini merangkumi tiga komponen utama iaitu pemodelan hidrodinamik, analisis kos-faedah (CBA) dan pembangunan kerangka membuat keputusan. Rajah 1 menunjukkan aliran metodologi kajian yang menggabungkan pemodelan hidrodinamik dan analisis ekonomi. Rajah ini menunjukkan proses utama kajian yang bermula dengan pengumpulan data kawasan kajian, diikuti pembangunan model hidrodinamik, CBA dan seterusnya pembangunan kerangka membuat keputusan.



Rajah 1: Aliran metodologi kajian

## Kawasan Kajian

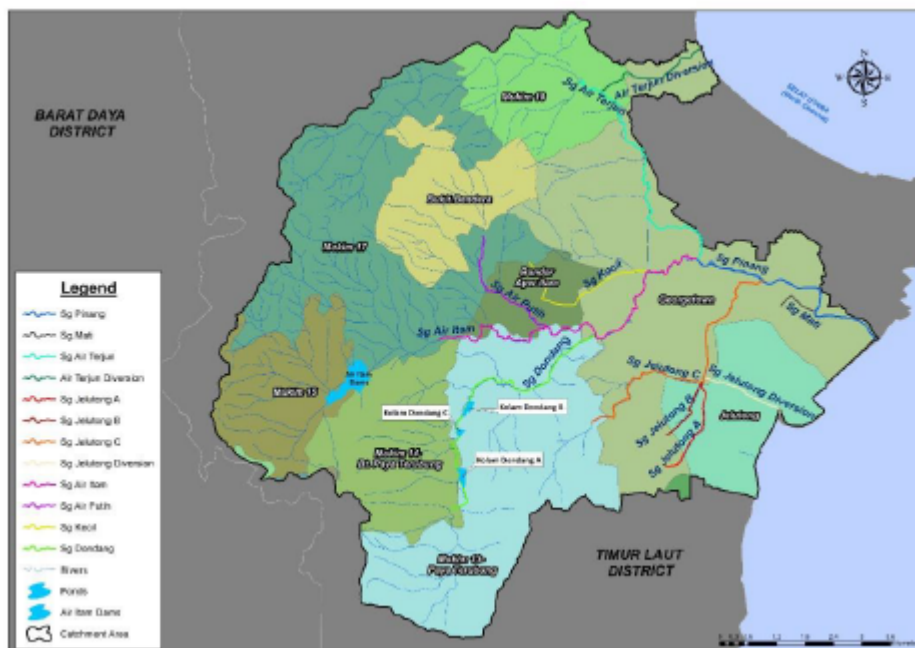
Kawasan kajian ini terletak dalam lembangan Sungai Pinang, yang berada di Georgetown, Daerah Timur Laut, Pulau Pinang, Malaysia. Zon ini membangun pesat di sepanjang pesisir timur Pulau Pinang. Semenanjung Malaysia pernah mengalami banjir paling buruk pada tahun 2017, dengan sekurang-kurangnya tujuh kematian di negeri-negeri utara iaitu Pulau Pinang dan Kedah (Abdul Mohit & Mohamed Sellu, 2017; Saleh et al., 2020). Di Pulau Pinang, daerah Barat Daya dan Timur Laut mencatatkan hujan lebat dari 4 November 2017 hingga 5 November 2017, dengan jumlah taburan hujan 296 mm dalam masa 24 jam dan kedalaman banjir antara 0.3m hingga 2.4m (Department of Irrigation and Drainage, 2018). Banjir yang melanda negeri Pulau Pinang pada tahun 2017 dianggarkan menyebabkan kerugian sebanyak RM 200 juta. Rajah 2 menunjukkan bandar Georgetown yang dilanda banjir besar pada 5 November 2017. Dilaporkan seramai 7,412 orang dipindahkan dari kediaman

mereka di Pulau Pinang semasa kejadian itu. Banjir dan ribut ini dianggap antara yang terburuk dalam sejarah negeri tersebut (Davies, 2017). Jabatan Pengairan dan Saliran bertindak segera, membawa kepada peruntukan yang diluluskan oleh Kerajaan Persekutuan bagi menangani isu banjir. Projek Tebatan Banjir Sungai Pinang yang diluluskan oleh Kementerian Peralihan Tenaga dan Transformasi Air pada 2017, memberi tumpuan utama kepada langkah-langkah tebatan banjir di bahagian hilir Sungai Pinang.



Rajah 1: Bandar Georgetown yang dilanda banjir besar pada 3 hingga 6 November 2017 (Wong, 2017)

Lembangan Sungai Pinang mempunyai keluasan kira-kira 51 km<sup>2</sup> dan merupakan sistem sungai yang paling besar serta paling pesat dibangunkan di pulau tersebut. Sungai Pinang berpunca dari kawasan berbukit hingga beralun di bahagian tengah lembangan. Rajah 3 menunjukkan peta sungai bagi lembangan Sungai Pinang. Panjang Sungai Pinang dianggarkan kira-kira 3.6 km, manakala anak sungainya terdiri daripada Sungai Jelutong, Sungai Air Hitam, Sungai Air Terjun, Sungai Dondang, Sungai Air Putih, Sungai Kecil dan Sungai Mati. Antara anak sungai tersebut, Sungai Air Hitam merupakan anak sungai yang terbesar manakala Sungai Mati merupakan yang paling pendek. Rajah 3 menunjukkan rangkaian sistem sungai dalam lembangan Sungai Pinang yang terdiri daripada beberapa anak sungai utama seperti Sungai Air Hitam, Sungai Jelutong dan Sungai Dondang.



Rajah 2: Peta lembangan Sungai Pinang

Kejadian banjir di kawasan ini berlaku akibat pembangunan pesat serta perubahan ciri-ciri kawasan tadahan dari semasa ke semasa, di samping peningkatan intensiti hujan di kawasan lembangan tersebut. Kejadian banjir berulang telah dilaporkan di kawasan ini dan keadaan banjir menjadi lebih teruk apabila ia berlaku semasa air pasang besar. Kesan pasang surut laut telah menghalang atau melambatkan pelepasan aliran air dari Sungai Pinang ke laut. Sebahagian besar Sungai Pinang dan anak-anak sungainya telah dinaiktaraf dengan saliran konkrit semasa

pembangunan kawasan sekitarnya. Ia adalah bertujuan untuk menampung peningkatan aliran permukaan akibat daripada pembangunan pesat di kawasan tersebut sepanjang tempoh masa tertentu (Misnan & Rindam, 2012; Sabdul Hakim et al., 2020)(Misnan & Rindam, 2012; Saad et al., 2008; Sabdul Hakim et al., 2020; Chan et al., 2022; Tan et al., 2024). Kawasan tadahan Sungai Pinang menerima purata hujan tahunan sebanyak 2,540 mm, namun jumlah ini berbeza mengikut tahun. Purata hujan bulanan paling rendah adalah sekitar 60 mm bagi bulan Januari dan Februari, manakala purata hujan bulanan paling tinggi adalah sekitar 220 mm bagi bulan Ogos, September, Oktober dan November (DID, 2018, 2019; Chan et al., 2021; Tan et al., 2023).

### Pemodelan Hidrodinamik

Pemodelan hidrodinamik dijalankan menggunakan perisian InfoWorks Integrated Catchment Modelling (ICM). Model ini digunakan bagi mensimulasikan aliran air dalam sistem sungai serta menilai potensi kejadian banjir di kawasan kajian. Model yang dibangunkan mengambil kira beberapa parameter penting termasuk data hujan, data topografi, data guna tanah serta ciri-ciri hidrologi lembangan sungai seperti di Jadual 1. Parameter-parameter ini memainkan peranan penting dalam menentukan ketepatan simulasi aliran dan ramalan kawasan limpahan banjir dalam sesuatu sistem lembangan sungai. Model hidrodinamik kemudiannya dikalibrasi menggunakan data kejadian banjir sebenar bagi memastikan model tersebut dapat mewakili keadaan sebenar sistem sungai dengan tepat (Cea & Costabile, 2022; Department of Irrigation and Drainage, 2009b; Kumar et al., 2023; Li et al., 2024; Stammel et al., 2021)

Jadual 1: Komponen hidrologi Lembangan Sungai Pinang

Lembangan Sungai	Kawasan Lembangan (km <sup>2</sup> )	Hujan (mm)	Evapotranspirasi (mm)	Aliran permukaan (mm)	Runoff / Nisbah hujan	Kadar alir sungai (m <sup>3</sup> /s)
Sungai Pinang	51	2,540	1,235	1,102	0.47	1.99

### Elemen dalam CBA

Projek Tebatan Banjir Sungai Pinang direka bentuk untuk ARI 50 tahun, dengan langkah tebatan ialah kerja menaiktaraf sungai dan pembinaan tembok banjir. Kerja menaiktaraf sungai melibatkan kerja mendalam dan melebarkan sungai. Kos dan manfaat dinyatakan dalam Ringgit Malaysia (RM) dengan kadar diskaun 4%. Nisbah manfaat-kos (B/C) ialah nisbah antara faedah yang diperolehi daripada langkah tebatan kepada jumlah kos pembinaannya.

Kos merupakan jumlah pelaburan yang diperlukan untuk memastikan langkah tebatan banjir yang diambil, dapat berfungsi sepenuhnya. Ia termasuk kos pembinaan dan penyelenggaraan. Kos pembinaan dan penyelenggaraan bagi Projek Tebatan Banjir Sungai Pinang adalah diperolehi daripada JPS. Dalam kajian ini, komponen kos yang diambil kira dalam analisis kos-faedah adalah merangkumi kos pelaksanaan projek dan kos penyelenggaraan.

Manfaat yang diambil kira dalam pengurusan risiko banjir adalah penilaian kerosakan banjir, sosial dan alam sekitar. Penetapan nilai kerosakan banjir adalah merujuk kepada Laporan Penilaian Kerosakan Banjir 2012 yang dilaksanakan untuk Lembangan Sungai Pinang oleh JPS. Manfaat sosial dan alam sekitar dinilai sebagai faedah dalam bentuk manfaat iaitu perbelanjaan yang berjaya dielakkan hasil pelaksanaan projek pengurusan banjir (Forman & Selly, 2010; Hudson & Botzen, 2019; Ratnaweera et al., 2021; Stoffers et al., 2026). Manfaat sosial dalam kajian ini memberi tumpuan kepada jumlah potensi pampasan dan dana bantuan banjir yang dibayar kepada mangsa banjir oleh pihak kerajaan (Forman & Selly, 2010; Ratnaweera et al., 2021; Stoffers et al., 2026).Kebajikan sosial merupakan bentuk bantuan kerajaan kepada mangsa banjir untuk meringankan beban kewangan akibat bencana. Manfaat alam sekitar dianggarkan dengan membandingkan kos projek pemulihan sungai terdahulu. Anggaran ini dibuat berdasarkan panjang sungai dan dinyatakan dalam kos setiap kilometer pemulihan sungai. Jadual 2 menunjukkan pelbagai impak projek mitigasi banjir yang boleh dikira sebagai kos atau faedah. Ia memberi gambaran umum tentang pembolehubah yang boleh digunakan untuk mengenal pasti kriteria utama manfaat dan kos.

Jadual 2: Faedah dan kos yang diambil kira bagi projek tebatan banjir

	Faedah	Kos
Penilaian kerosakan akibat banjir	Pengurangan kerosakan banjir dan aktiviti ekonomi. Kerosakan banjir diukur berdasarkan nilai purata kerugian bagi setiap jenis kerosakan.	Kos projek Kos penyelenggaraan
Faedah sosial	Pengurangan jumlah pampasan dan dana bantuan banjir yang dibayar oleh kerajaan kepada mangsa banjir.	

Faedah alam sekitar	Mengurangkan kos pemulihan sungai yang boleh memberi kesan negatif terhadap kualiti air dan flora serta fauna Sungai Pinang.	
---------------------	--	--

### Kriteria CBA

Pendekatan kaedah yang digunakan dalam kajian ini adalah melalui pemodelan hidrodinamik sebagai input untuk proses pembuatan keputusan yang menilai kos dan faedah menggunakan CBA. Analisis CBA digunakan untuk mengira nilai semasa bagi faedah dan kos dengan kadar diskaun yang ditetapkan. Kadar diskaun yang digunakan untuk CBA mitigasi kerosakan banjir ialah 4% (Joseph et al., 2020; F. W. Lai et al., 2016; Lucia & Claudia, 2020; Rai et al., 2020; Raihan & Said, 2021). Analisis ekonomi ke atas faedah dan kos bagi langkah mitigasi yang dipilih dilakukan dengan membandingkan perbezaan kerosakan akibat banjir, impak kepada masyarakat, dan alam sekitar. Kos terdiri daripada kos projek dan penyelenggaraan manakala faedah meliputi pengurangan kos kerosakan banjir, kesan kepada masyarakat, serta kos alam sekitar.

*Net Present Value (NPV)* merupakan kaedah penilaian ekonomi yang digunakan untuk menentukan manfaat dan daya maju sesuatu projek dengan membandingkan nilai semasa keseluruhan faedah dan kos sepanjang tempoh projek. Sesuatu projek dianggap bermanfaat dan berdaya maju sekiranya nilai NPV adalah positif, yang menunjukkan bahawa faedah yang diperoleh melebihi kos yang ditanggung selepas mengambil kira kadar diskaun. NPV di dalam CBA ialah nilai semasa bagi semua faedah dan kos yang akan berlaku pada masa hadapan, selepas mengambil kira nilai masa wang (*time value of money*) melalui kadar diskaun (*discount rate*). Kadar diskaun yang digunakan bagi projek tebatan banjir ialah 4% (Jonkman & Kok, 2004). Nisbah faedah-kos (B/C) akan dianalisis untuk langkah mitigasi banjir yang dipilih. Sesebuah projek dianggap berfaedah sekiranya faedah (B) melebihi kos (C). Persamaan berikut mewakili faedah dan kos pelaksanaan langkah tebatan banjir (Hudson & Botzen, 2019):

$$CBA = \begin{cases} \text{Ya jika } \frac{B}{C} > 1 \\ \text{Tidak jika } \frac{B}{C} \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$NPV_B = \sum_{t=0}^T \left( \frac{1}{1+r} \right)^t b \quad (2)$$

$$NPV_C = \sum_{t=0}^T \left( \frac{1}{1+r} \right)^t c \quad (3)$$

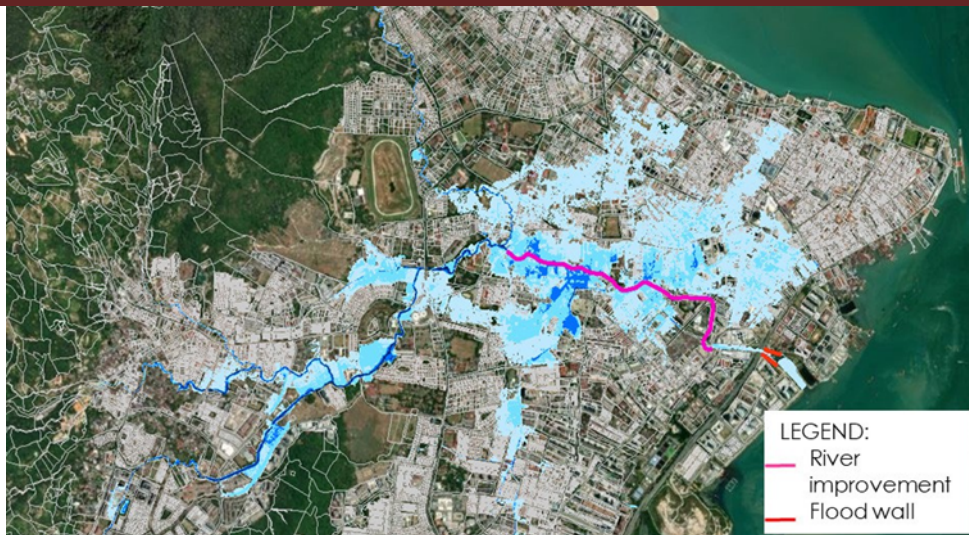
Persamaan 1 menyatakan bahawa sesuatu projek itu memberi manfaat sekiranya faedah sepanjang hayat (B) yang telah didiskaunkan lebih besar daripada kos sepanjang hayat (C) yang telah didiskaunkan. Persamaan 2 dan Persamaan 3 pula menunjukkan nilai semasa dikira dengan mendarabkan faedah dan kos pada tahun tertentu dengan kadar diskaun  $(1/(1+r))^t$  di mana  $t$  ialah fungsi masa dan  $r$  ialah kadar diskaun.

### PENEMUAN DAN ANALISIS KAJIAN

Dalam kajian ini, dapatan kajian digunakan untuk menilai keberkesanan pemodelan hidraulik dan analisis faedah-kos dalam membantu proses pembuatan keputusan bagi memilih langkah tebatan banjir yang optimum di sub-lembangan Sungai Pinang.

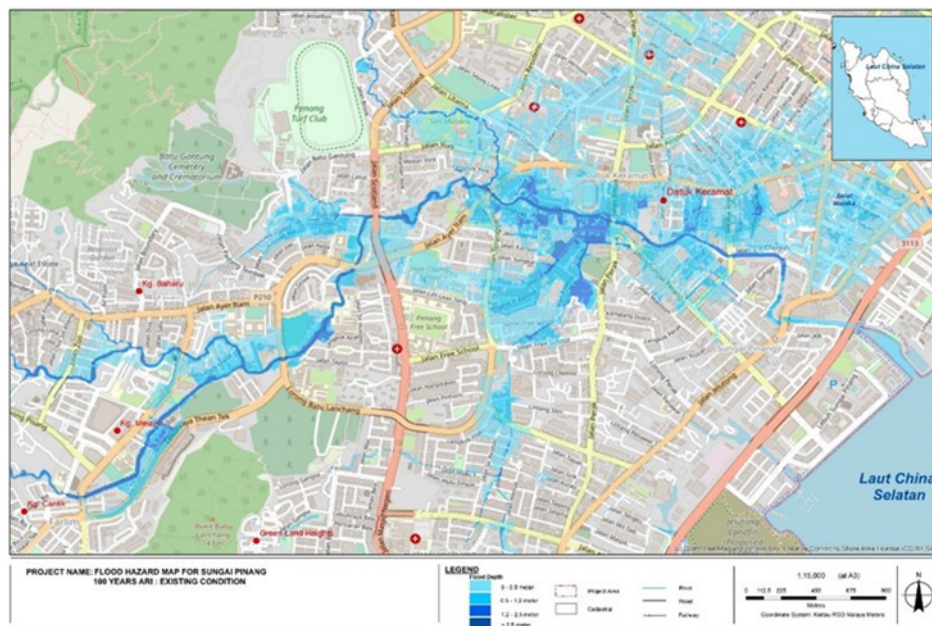
#### Peta Banjir

Langkah tebatan banjir dilaksanakan bagi mencapai tahap keselamatan yang ditetapkan melalui strategi penambahbaikan Sungai Pinang. Rajah 4 memaparkan peta bahaya banjir Sungai Pinang untuk ARI 50 tahun dengan pilihan mitigasi banjir melalui penaiktarafan sungai dan pembinaan tembok banjir.

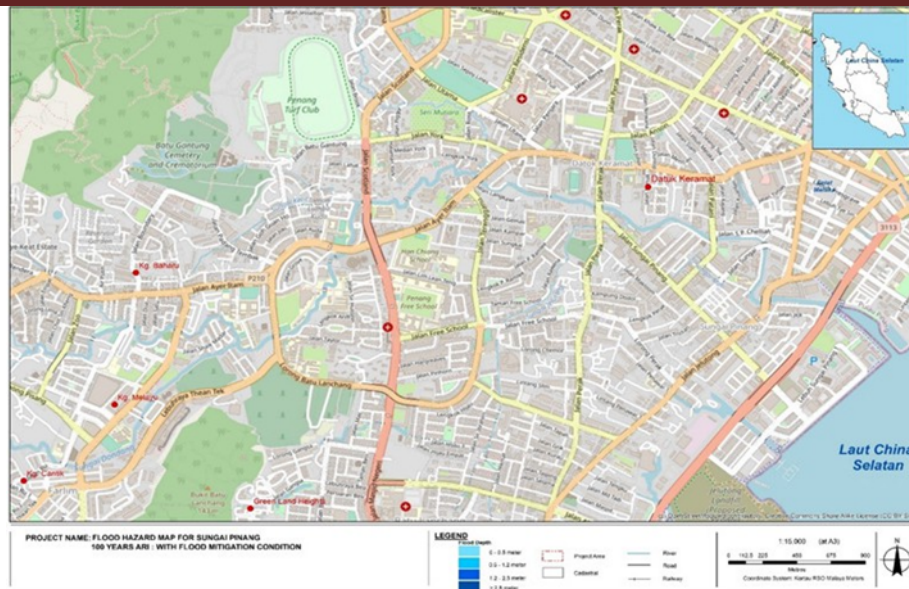


Rajah 4: Peta Banjir Sungai Pinang bagi ARI 50 tahun dengan pilihan tebatan banjir melalui menaiktaraf sungai dan pembinaan tembok banjir

Simulasi pemodelan hidrodinamik menunjukkan bahawa cadangan penaiktarafan sungai dan pembinaan tembok banjir berjaya menurunkan paras air sungai serta mengurangkan risiko banjir. Berdasarkan simulasi bagi ARI 50 tahun, kawasan banjir didapati berkurang secara signifikan daripada 6.11 km<sup>2</sup> kepada 0.00 km<sup>2</sup>, menunjukkan bahawa langkah tebatan yang dicadangkan mampu mengurangkan kejadian banjir di kawasan kajian. Selain itu, peta banjir yang dihasilkan oleh model turut menunjukkan keupayaan model dalam mensimulasikan kedalaman banjir dengan baik. Rajah 5 dan Rajah 6 menunjukkan perbandingan peta banjir sebelum dan selepas mitigasi menunjukkan bahawa kawasan limpahan banjir yang luas sebelum pelaksanaan mitigasi telah berjaya dikurangkan dengan ketara selepas langkah penambahbaikan sungai dan pembinaan tembok banjir, di mana paras banjir berkurang daripada 1.2 m kepada 0.0 m.



Rajah 5: Peta Banjir Sungai Pinang ARI 50 tahun sebelum mitigasi banjir



Rajah 6: Peta Banjir Sungai Pinang ARI 50 tahun selepas mitigasi banjir

### CBA dalam Pengurusan Banjir

Peristiwa banjir yang dirujuk dalam kajian ini berlaku antara 3 November 2017 hingga 6 November 2017, melibatkan kawasan banjir seluas 6.11 km<sup>2</sup> dengan kedalaman banjir 1.2m. Berdasarkan data kos kerosakan banjir yang disediakan oleh JPS pada tahun 2012, anggaran kerugian akibat kejadian banjir tahun 2017 adalah berjumlah RM131,113,298.00 (Jabatan Pengairan dan Saliran, 2012). Nilai ini digunakan sebagai asas dalam penilaian manfaat ekonomi bagi pelaksanaan langkah-langkah mitigasi banjir dalam kajian ini. Kos pembinaan dan penyelenggaraan projek diperoleh daripada JPS. Kos pembinaan dianggarkan sebanyak RM150,000,000.00, manakala kos penyelenggaraan adalah RM3,000,000.00. Anggaran kos dalam kajian ini melibatkan pelaksanaan kerja-kerja menaiktaraf sungai dan pembinaan tembok tebatan banjir. Manfaat sosial diwakili oleh pengurangan perbelanjaan Kerajaan bagi bantuan dan pampasan kepada mangsa banjir, yang dianggarkan sebanyak RM7,000,000.00. Manfaat alam sekitar pula dinilai menggunakan pendekatan *avoided restoration cost*, iaitu berdasarkan kos projek pemulihan sungai yang pernah dilaksanakan oleh JPS. Projek Pemulihan Koridor Sungai di Seksyen Betong, Sarawak yang menelan kos RM4,953,272.40 bagi panjang sungai 1.1 km dijadikan sebagai asas pengiraan (Jabatan Pengairan dan Saliran, 2020). Berdasarkan kos pemulihan per kilometer sungai, manfaat alam sekitar bagi Sungai Pinang yang mempunyai panjang 3.65 km dianggarkan berjumlah RM16,435,858.40.

Keputusan CBA dipaparkan dalam Jadual 2. Ia menunjukkan jumlah kos dan manfaat keseluruhan langkah tebatan banjir seperti kerja menaiktaraf sungai dan pembinaan tembok banjir. NPV manfaat dan kos dikira dengan kadar diskaun,  $r$  sebanyak 4% selama 50 tahun berdasarkan fungsi masa,  $t$ , menggunakan formula (2) dan (3). Jadual skor menunjukkan nisbah B/C adalah 1.00. Nilai nisbah faedah-kos iaitu 1.007 menunjukkan bahawa projek tebatan banjir yang dicadangkan berada pada tahap ambang kebolehlaksanaan ekonomi. Hasil analisis ini menunjukkan bahawa pelaksanaan projek adalah berdaya maju apabila mengambil kira manfaat yang lebih luas seperti pengurangan risiko banjir, perlindungan terhadap aset awam, serta peningkatan kesejahteraan sosial masyarakat setempat. Tambahan pula, manfaat jangka panjang yang berkaitan dengan pengurangan kerugian akibat banjir dan peningkatan ketahanan komuniti terhadap bencana turut menyumbang kepada justifikasi pelaksanaan projek tebatan banjir ini. Hasil kajian ini juga menyokong pandangan (Jonkman & Kok, 2004) bahawa langkah mitigasi yang dipilih perlu mengoptimalkan keperluan masyarakat dan alam sekitar. Sesuatu projek dianggap bermanfaat jika manfaat melebihi kos kerana ia meningkatkan kesejahteraan ekonomi. Oleh itu, jika keputusan Kerajaan untuk meneruskan projek berdasarkan analisis kos-manfaat, langkah mitigasi banjir hasil daripada pemodelan hidrodinamik boleh diterima pakai.

Jadual 2: Kos dan manfaat bagi langkah tebatan banjir melalui kerja menaiktaraf sungai dan tembok banjir

Jumlah kos (Juta RM)	Jumlah manfaat (Juta RM)	Nisbah B/C
153	Kerosakan banjir: 131 Sosial: 7 Alam sekitar: 16	$3.61 / 3.59 = 1.00$

Kadar diskaun 4% selama 50 tahun

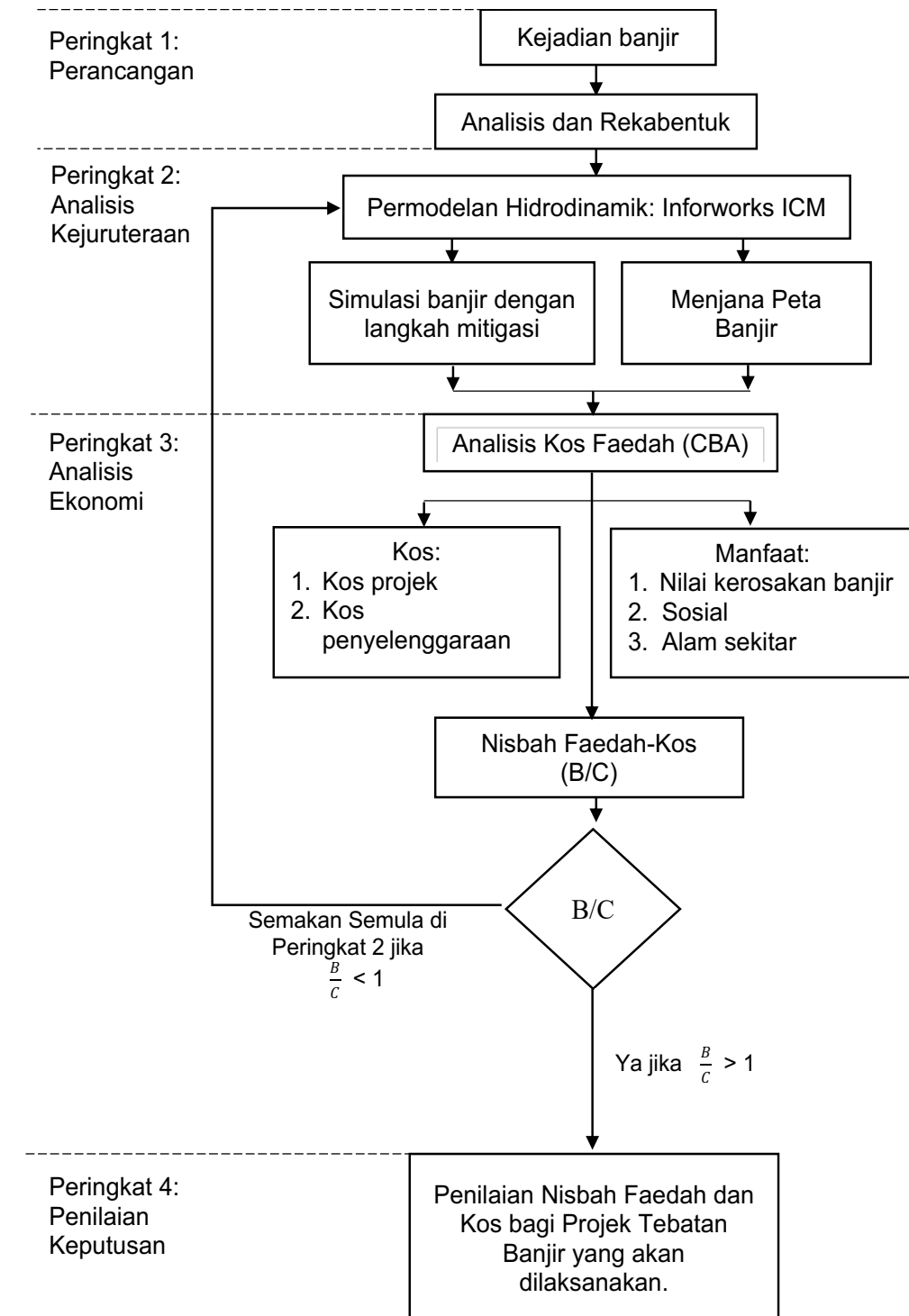
Analisis kejuruteraan yang dijalankan juga menunjukkan bahawa pemodelan hidrodinamik merupakan teknik yang berkesan dalam memahami ciri-ciri aliran sungai serta memainkan peranan penting dalam perancangan dan reka bentuk pengurusan banjir. Kaedah ini juga dapat menentukan keberkesanan pelbagai pilihan mitigasi banjir. Hasil simulasi pemodelan hidrodinamik bagi pilihan mitigasi penambahbaikan sungai dan pembinaan tembok banjir mendapati bahawa langkah-langkah tersebut mencukupi dan berjaya mengurangkan kawasan banjir daripada 6.11 km<sup>2</sup> kepada 0 km<sup>2</sup>, iaitu tiada lagi kawasan yang mengalami banjir.

Dari sudut ekonomi, pembuat keputusan boleh memilih pilihan perlindungan banjir yang memberikan pengurangan risiko yang paling tinggi pada kos yang paling rendah. Walau bagaimanapun, keputusan akhir mengenai langkah mitigasi banjir yang dikehendaki bukan sahaja mengambil kira aspek ekonomi, malah turut melibatkan perbandingan terhadap semua alternatif yang berkaitan. Pengoptimuman ekonomi dan analisis faedah-kos memberikan maklumat yang penting dan rasional dalam proses pembuatan keputusan ini.

### **Kerangka Pembuat Keputusan bagi Pengurusan Tebatan Banjir**

Kerangka pembuat keputusan ini dibangunkan dengan menggabungkan pemodelan hidrodinamik dan CBA. Kerangka ini terdiri daripada 4 peringkat: Perancangan, Analisis kejuruteraan, Analisis ekonomi dan Penilaian hasil. Peringkat pertama, iaitu perancangan akan mengenal pasti data kerosakan banjir selaps satu kejadian banjir. Data banjir diperlukan untuk menentukan tahap banjir sedia ada dan kedalaman air di kawasan terjejas. Selepas data dianalisis, ia akan digunakan dalam peringkat reka bentuk. Model hidrodinamik akan mensimulasikan situasi banjir dengan tahap perlindungan banjir yang dipilih. Peringkat kedua ialah analisis kejuruteraan untuk menghasilkan kesan daripada analisis hidrologi bagi kajian ini. Analisis ini melibatkan pemodelan dan pengiraan paras serta aliran banjir, seterusnya menghasilkan peta banjir untuk langkah mitigasi yang dipilih. Selepas selesai analisis hidrologi dan hidraulik, manfaat projek tebatan banjir dikira berdasarkan nilai kerosakan daripada banjir, sosial dan alam sekitar. Peringkat ketiga, analisis ekonomi akan mengira nilai semasa manfaat dan kos menggunakan kadar diskaun. Nilai semasa ialah nilai masa depan yang telah dianggarkan, menjadikan titik rujukan yang seragam untuk membandingkan kos dan manfaat. Ia menggambarkan jumlah wang yang berbaloi dilaburkan untuk mendapatkan manfaat tahunan di masa depan. Peringkat terakhir, iaitu peringkat keempat, ialah penilaian hasil dengan membandingkan kos dan manfaat bagi langkah tebatan banjir yang dipilih. Manfaat projek tebatan banjir yang dicadangkan adalah dinilai menggunakan Nisbah Faedah-Kos ( B/C). Sesuatu projek dianggap bermanfaat dan berdaya maju dari segi ekonomi apabila nilai B/C melebihi 1.0, yang menunjukkan bahawa nilai kini faedah yang diperolehi adalah lebih tinggi daripada nilai kini kos yang ditanggung. Sebaliknya, sekiranya nilai B/C adalah kurang daripada 1.0, projek tersebut dianggap tidak berdaya maju dari segi ekonomi berdasarkan andaian dan parameter yang digunakan. Oleh itu, langkah mitigasi alternatif, pengubahsuaian skop projek atau penambahbaikan reka bentuk perlu dipertimbangkan dan dianalisis semula melalui analisis kos-faedah yang baharu. Pendekatan ini membolehkan pilihan mitigasi yang paling cekap dan berkesan dikenal pasti bagi memaksimumkan manfaat ekonomi, sosial dan alam sekitar. Pendekatan asas kerangka ini bermula dari Peringkat 1 hingga Peringkat 4, adalah seperti dalam Rajah 7. Oleh itu, penilaian bersepadu antara analisis hidrodinamik dan analisis ekonomi menghasilkan satu analisis yang menyeluruh dalam menilai langkah-langkah tebatan banjir serta pembangunan ekonomi melalui kerja-kerja penambahbaikan sungai dan pembinaan tembok banjir, sekali gus membentuk kerangka pembuatan keputusan dalam pengurusan risiko banjir.

Kerangka ini bukan sahaja membantu menilai keberkesanan teknikal sesuatu langkah mitigasi, malah menyediakan asas yang lebih sistematik kepada pihak Kerajaan untuk perancangan pelaburan awam dalam pengurusan risiko banjir. Melalui pendekatan ini, pihak pembuat keputusan dapat menilai alternatif langkah tebatan banjir secara lebih menyeluruh dengan mengambil kira keseimbangan antara prestasi teknikal, kecekapan ekonomi serta kepentingan sosial dan alam sekitar. Oleh itu, kerangka yang dicadangkan berpotensi berfungsi sebagai alat sokongan keputusan dalam membantu pihak berkepentingan menentukan keutamaan pelaksanaan projek tebatan banjir secara lebih telus dan berasaskan bukti.



Rajah 7: Kerangka Pembuat Keputusan bagi Pengurusan Tebatan Banjir

## KESIMPULAN

Kajian ini menunjukkan bahawa penggunaan Analisis Faedah-Kos (CBA) dapat membantu proses pembuatan keputusan dalam memilih langkah mitigasi banjir yang optimum bagi projek tebatan banjir di sub-lembangan Sungai Pinang. Hasil analisis menunjukkan bahawa langkah menaiktaraf sungai dan pembinaan tembok banjir menghasilkan nisbah Faedah-Kos (B/C) sebanyak 1.00, yang membuktikan bahawa projek ini adalah berdaya maju dari segi ekonomi. Selain itu, keputusan daripada pemodelan hidraulik menunjukkan bahawa langkah mitigasi yang dicadangkan adalah berkesan bagi mengurangkan risiko banjir secara signifikan. Oleh itu, analisis pemodelan hidraulik dan CBA digunakan bagi menilai keberkesanan langkah mitigasi banjir yang dicadangkan. Kajian ini juga

memperlihatkan kerangka kerja membuat keputusan dibangunkan dengan menggabungkan analisis kejuruteraan melalui Infoworks Integrated Catchment Modelling (ICM) bersama Analisis Kos-Faedah (CBA). Tiga komponen utama yang telah dinyatakan di dalam Metodologi, telah dipecahkan kepada 4 Peringkat seperti yang digambarkan dalam Rajah 7. Ia telah membentuk satu kerangka pengurusan tebatan banjir yang komprehensif. Hasilnya, keputusan berkaitan projek tebatan banjir dapat dibuat secara lestari, ekonomik dan menyeluruh. Pendekatan sistematik amat penting untuk menghasilkan anggaran ekonomi banjir yang konsisten dan boleh dipercayai bagi tujuan membuat keputusan yang kritikal. Bagi negara membangun seperti Malaysia, kerosakan akibat banjir adalah serius. Risiko banjir semakin meningkat dari segi kekerapan, keluasan dan bilangan penduduk terkesan. Setiap keputusan utama berkaitan bencana banjir perlu disokong oleh analisis kos-faedah yang teliti dan mencerminkan situasi nasional serta setempat. Strategi yang menyeluruh dan terperinci amat diperlukan untuk menilai ekonomi banjir dengan tepat. Ini juga akan membantu kerajaan Persekutuan dan Negeri dalam menganalisis serta mengagihkan sumber demi kebaikan masyarakat.

### Penghargaan

Penulis merakamkan penghargaan kepada Jabatan Perkhidmatan Awam (JPA) atas tajaan yang diberikan sepanjang tempoh pengajian. Penulis juga merakamkan penghargaan kepada Universiti Sains Malaysia (USM) atas kemudahan penyelidikan yang disediakan bagi menjayakan kajian ini.

### Rujukan

- Abdul Mohit, M., & Mohamed Sellu, G. (2017). Development of Non-structural Flood Mitigation Policies and Measures for Pekan town, Malaysia. *Asian Journal of Behavioural Studies*, 2(6), 9. <https://doi.org/10.21834/ajbes.v2i6.33>
- Ahmad, N., Ng, C. P., Ismail, N., Wong, M. M. R., Abbas, F., Law, T. H., Bahari, A. N., 'Azam Z., & Rofi, M. F. M. (2025). A Review of Major Flood Events in Malaysia Between 1970-2024. *Jurnal Kejuruteraan*, 37(2), 909–921. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37\(2\)-28](https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37(2)-28)
- Ahmad, R., Abdul Maulud, K. N., Bin Zamir, U., Mohd Razali, S. F., Yaseen, Z. M., Pradhan, B., Khan, M. N., & Eshquvvatov, B. (2025). A systematic literature review of digital elevation models and hydrological models integration for advanced flood risk management. In *Geomatics, Natural Hazards and Risk* (Vol. 16, Number 1). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/19475705.2025.2549487>
- Akhter, F., Bastola, S., Penn, J., & Douthat, T. (2025a). A review of flood mitigation benefit-cost analyses' inclusiveness of environmental watershed effects and environmental vulnerability: gaps in progress towards more resilient flood hazard decision-making. In *Frontiers in Built Environment* (Vol. 11). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1531265>
- Akhter, F., Bastola, S., Penn, J., & Douthat, T. (2025b). A review of flood mitigation benefit-cost analyses' inclusiveness of environmental watershed effects and environmental vulnerability: gaps in progress towards more resilient flood hazard decision-making. In *Frontiers in Built Environment* (Vol. 11). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1531265>
- Alvarez, G. G., Botzen, W. J. W., Tesselaar, M., Aerts, J. C. J. H., Staccione, A., Mysiak, J., & Bockarjova, M. (2025). The Economic Benefits of Nature-Based Solutions for Climate Risk. *Land Economics*, 110824-0105R1. <https://doi.org/10.3368/le.102.2.110824-0105r1>
- Annis, A., Nardi, F., Volpi, E., & Fiori, A. (2020). Quantifying the relative impact of hydrological and hydraulic modelling parameterizations on uncertainty of inundation maps. *Hydrological Sciences Journal*, 65(4), 507–523. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1709640>
- Azimi, M. A., Syed Zakaria, S. A., & Majid, T. A. (2019). Disaster risks from economic perspective: Malaysian scenario. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 244(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/244/1/012009>
- Bank Negara Malaysia. (2024). *MANAGING FLOOD RISKS - Leveraging Finance for Business Resilience in Malaysia*. [http://bit.ly/WB\\_blogsMY](http://bit.ly/WB_blogsMY)
- BERNAMA. (2022, October 7). *Budget 2023: RM15 billion Flood Mitigation Plan until 2030 in facing climate change*.
- Cea, L., & Costabile, P. (2022). Flood Risk in Urban Areas: Modelling, Management and Adaptation to Climate Change: A Review. In *Hydrology* (Vol. 9, Number 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/hydrology9030050>
- Chabot, M., & Bertrand, J. L. (2025). Adaptive flood risk management: A decision support system integrating deep learning, digital twins, and economic risk assessment. *Global Environmental Change*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2025.103069>
- Chen, Y., Kuang, Y., & Zhang, X. (2024). Construction, Analysis, and Verification of a Hydrodynamic Model for Flood Risk Map in the Fuyang Section of the Fuchun River. *ACM International Conference Proceeding Series*, 191–197. <https://doi.org/10.1145/3685088.3685124>
- Davies, R. (2017, November). *Malaysia – Severe Storm and Floods Leave 7 Dead, 10,000 Displaced*. FloodList. <https://floodlist.com/asia/malaysia-penang-kedah-floods-november-2017>
- Davis, L., Larionova, T., Patel, D., Tse, D., Baquedano Juliá, P., Pinto Santos, P., & Ferreira, T. M. (2023). Flood vulnerability and risk assessment of historic urban areas: Vulnerability evaluation, derivation of depth-damage curves and cost–benefit analysis of flood adaptation measures applied to the historic city centre of Tomar, Portugal. *Journal of Flood Risk Management*, 16(3). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12908>
- Department of Irrigation and Drainage. (2009a). *DID MANUAL: Volume 1 – Flood Management*. 1.

- Department of Irrigation and Drainage. (2009b). DID Manual: Volume 7 – Engineering Modelling. *Department of Irrigation and Drainage, Malaysia*, 7.
- Department of Irrigation and Drainage. (2018). *Laporan Tahunan Banjir 2017/2018*.
- Department of Statistics Malaysia. (2023). *SPECIAL REPORT ON IMPACT OF FLOODS IN MALAYSIA, 2023*.
- Dhanapala, L., Gunarathna, M. H. J. P., Kumari, M. K. N., Ranagalage, M., Sakai, K., & Meegastenna, T. J. (2022). Towards Coupling of 1D and 2D Models for Flood Simulation—A Case Study of Nilwala River Basin, Sri Lanka. *Hydrology*, 9(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/hydrology9020017>
- EPU, E. P. U. M. (2010). Tenth Malaysia Plan. In *Percetakan Nasional Malaysia Berhad* (Vol. 53, Number 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- EPU, E. P. U. M. (2015). Eleventh Malaysia Plan. In *Percetakan Nasional Malaysia Berhad*.
- Forman, E. H., & Selly, M. A. (2010). Decision by Objectives. *Decision by Objectives*. <https://doi.org/10.1142/9789812810694>
- Ginige, K., Mendis, K., & Thayaparan, M. (2022). An assessment of structural measures for risk reduction of hydrometeorological disasters in Sri Lanka. *Progress in Disaster Science*, 14(May), 100232. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2022.100232>
- Harding, R. (1998). *Environmental Decision-making the roles of scientists, engineers and the public*. (January 1998), 163–191.
- Hattum, K. C. van, de Ruig, L. T., Bos, M. F. M., Kind, J., & Moel, H. de. (2021). Shifting away from asset damage and toward well-being loss within flood risk management. *Prepared for Water Economics and Policy*.
- Hudson, P., & Botzen, W. J. W. (2019). Cost-benefit analysis of flood-zoning policies: A review of current practice. *WIREs Water*, 6(6), 1–21. <https://doi.org/10.1002/wat2.1387>
- Illyas, M., Balkish, S. &, & Naidu, M. (2024). *The Impacts of Losses and Damages by Floods: A Case Study in Klang, Selangor*. Jabatan Pengairan dan Saliran. (2012). *FLOOD DAMAGE ASSESSMENT REPORT FOR PULAU PINANG*.
- Jabatan Pengairan dan Saliran. (2020). *Outcome Assessment Report of Ministry of Natural Resources, Environment and Climate Change*.
- Jonkman, S. N., & Kok, M. (2004). *Cost benefit analysis and flood damage mitigation in the Netherlands*. 49(1), 95–111.
- Joseph, C., Gunton, T., Knowler, D., & Broadbent, S. (2020). The Role of Cost-benefit Analysis and Economic Impact Analysis in Environmental Assessment: The Case for Reform. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 38(6), 491–501. <https://doi.org/10.1080/14615517.2020.1767954>
- Josephson, A., Guerra Su, R., Collins, G., & Jacobs, K. (2024). *The Economics of Climate Adaptation: An Assessment*.
- Juan-Diego, E., Mendoza, A., Arganis-Juárez, M. L., & Berezowsky-Verduzco, M. (2025). Alteration of Catchments and Rivers, and the Effect on Floods: An Overview of Processes and Restoration Actions. In *Water (Switzerland)* (Vol. 17, Number 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/w17081177>
- Kumar, V., Sharma, K. V., Caloiero, T., Mehta, D. J., & Singh, K. (2023). Comprehensive Overview of Flood Modeling Approaches: A Review of Recent Advances. In *Hydrology* (Vol. 10, Number 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/hydrology10070141>
- Kundzewicz, Z. W., Januchta-Szostak, A., Nachlik, E., Pińskwar, I., & Zaleski, J. (2023). Challenges for Flood Risk Reduction in Poland's Changing Climate. *Water (Switzerland)*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/w15162912>
- Lai, F. W., Shad, M. K., & Md Nordin, S. (2016). Cost-benefit analysis for green fertilizer technology development: A case in Malaysia. *Proceedings of the 27th International Business Information Management Association Conference - Innovation Management and Education Excellence Vision 2020: From Regional Development Sustainability to Global Economic Growth, IBIMA 2016*, (October 2018), 326–332.
- Lai, X., Wen, J., Shan, X., Shen, L., Wan, C., Shao, L., Wu, Y., Chen, B., & Li, W. (2023). Cost-benefit analysis of local knowledge-based flood adaptation measures: A case study of Datian community in Zhejiang Province, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103573>
- Li, X., Li, Y., Zheng, S., Chen, G., Zhao, P., & Wang, C. (2024). High efficiency integrated urban flood inundation simulation based on the urban hydrologic unit. *Journal of Hydrology*, 630. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130724>
- Lo, W.-C., Wu, M.-H., Wu, J.-Y., & Huang, Y. S. (2025). *Assessing the Effectiveness of Nature-based Solutions in Urban 3 Inundation Mitigation Under Climate Change Scenarios from A River Basin Perspective*. <https://ssrn.com/abstract=5236548>
- Lucia, M. D., & Claudia, G. I. (2020). COST-BENEFIT ANALYSIS - BETWEEN OPPORTUNITY AND LIMITS. *Ecoforum Journal*, 9(2).
- Mazura Nor Zulkifli, K. A. R. N. G. M. N. M. Y. (2021). *A Review of Flood Resilience Implementation in Malaysia*.
- Misnan, N., & Rindam, M. (2012). Morfometri lembangan sungai-sungai utama di Pulau Pinang (Morphometry of major river basins in the Island of Penang). *Geografia - Malaysian Journal of Society and Space*, 8(3), 71–81.
- Molinari, D., Dazzi, S., Gattai, E., Minucci, G., Pesaro, G., Radice, A., & Vacondio, R. (2021). Cost-benefit analysis of flood mitigation measures: a case study employing high-performance hydraulic and damage modelling. *Natural Hazards*, 108(3), 3061–3084. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04814-6>
- Mucherera, B., & Spiegel, S. (2021). Forced displacement: critical lessons in the protracted aftermath of a flood disaster. *GeoJournal*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10708-021-10471-w>
- Pesaro, G., Mendoza, M. T., Minucci, G., & Menoni, S. (2018). Cost-benefit analysis for non-structural flood risk mitigation measures: Insights and lessons learnt from a real case study. *Safety and Reliability - Safe Societies in a Changing World - Proceedings of the 28th International European Safety and Reliability Conference, ESREL 2018*, 109–118. <https://doi.org/10.1201/9781351174664-14>
- Radhakrishnan, V., Selvapathy, P., Garvin, M., Khan, A., Perera, C., Rehman, F., & Hansa, R. (2025). Integrating environmental impacts into Cost-Benefit Analysis using emergy. *Cleaner Energy Systems*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100170>

- Rai, R. K., van den Homberg, M. J. C., Ghimire, G. P., & McQuistan, C. (2020). Cost-benefit analysis of flood early warning system in the Karnali River Basin of Nepal. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 47(August 2019), 101534. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101534>
- Raihan, A., & Said, M. N. M. (2021). Cost-Benefit Analysis of Climate Change Mitigation Measures in the Forestry Sector of Peninsular Malaysia. *Earth Systems and Environment*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00241-6>
- Ratnaweera, D., Heistad, A., & Navrud, S. (2021). The current use and potential of cost benefit analysis in water sector projects. *Water Supply*, 21(4), 1438–1449. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.364>
- Ro, B., & Garfin, G. (2023). Building urban flood resilience through institutional adaptive capacity: A case study of Seoul, South Korea. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 85(December 2022), 103474. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103474>
- Rosmadi, H. S. Bin, Ahmed, M. F., Mokhtar, M. Bin, Halder, B., & Scholz, M. (2024). Nature-Based Solutions (NbS) for Flood Management in Malaysia. In *Water (Switzerland)* (Vol. 16, Number 24). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/w16243606>
- Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Plavšić, J., Curran, A., Rosic, N., Pudar, R., Savic, D., & Brdjanovic, D. (2024). Economic assessment of nature-based solutions to reduce flood risk and enhance co-benefits. *Journal of Environmental Management*, 352. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119985>
- Saad, M. S. H., Ali, M. I., Razi, P. Z., & Ramli, N. I. (2024). Flood Risk Management in Development Projects: A Review of Malaysian Perspective within the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. In *CONSTRUCTION* (Vol. 4, Number 2, pp. 103–117). Universiti Malaysia Pahang. <https://doi.org/10.15282/construction.v4i2.10592>
- Sabdu Hakim, A., Azma Adila, H. N., Farah Liyana, Z., Mu'izzah, M., Chong Joon, C., & Omar Fatehah, M. (2020). Assessment of Heavy Metal Contamination in Sediments in Sungai Pinang River Basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 498(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/498/1/012059>
- Saleh, A., Yuzir, A., & Abustan, I. (2020). Flood mapping using Sentinel-1 SAR Imagery: Case study of the November 2017 flood in Penang. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 479(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/479/1/012013>
- Sibandze, P., Kalumba, A. M., H. Aljaddani, A., Zhou, L., & Afuye, G. A. (2025). Geospatial Mapping and Meteorological Flood Risk Assessment: A Global Research Trend Analysis. *Environmental Management*, 75(1), 137–154. <https://doi.org/10.1007/s00267-024-02059-0>
- Sidek, L. M., Hock, L., Chua, C., Syasya, A., Azizi, M., Basri, H., Jaafar, A. S., & Moon, W. C. (2021). *applied sciences Application of PCSWMM for the 1-D and 1-D – 2-D Modeling of Urban Flooding in Damansara Catchment , Malaysia*. 1–16.
- Department of Statistics Malaysia. (2025). *SPECIAL REPORT ON IMPACT OF FLOODS IN MALAYSIA*. <https://www.dosm.gov.my/portal-main/release-content/special-report-on-impact-of-floods-in-malaysia2025>
- Stammel, B., Fischer, C., Cyffka, B., Albert, C., Damm, C., Dehnhardt, A., Fischer, H., Foeckler, F., Gerstner, L., Hoffmann, T. G., Iwanowski, J., Kasperidus, H. D., Linnemann, K., Mehl, D., Podschun, S. A., Rayanov, M., Ritz, S., Rumm, A., Scholz, M., ... Gelhaus, M. (2021). Assessing land use and flood management impacts on ecosystem services in a river landscape (Upper Danube, Germany). *River Research and Applications*, 37(2), 209–220. <https://doi.org/10.1002/rra.3669>
- Stoffers, T., Schultze, A.-K., Ehlert, T., Kaiser, L., Scholz, M., & Nagelkerke, L. A. J. (2026). Challenges and opportunities in restoring European free-flowing rivers. *Nature Conservation*, 62, 355–381. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.62.173762>
- Thapa, S., Sinclair, H. D., Creed, M. J., Borthwick, A. G. L., Watson, C. S., & Muthusamy, M. (2024). Sediment Transport and Flood Risk: Impact of Newly Constructed Embankments on River Morphology and Flood Dynamics in Kathmandu, Nepal. *Water Resources Research*, 60(10). <https://doi.org/10.1029/2024WR037742>
- Wadumestrige Dona, C. G., Mohan, G., Fukushi, K., & Dissanayaka, N. (2025). Exploring the economic and environmental benefits of Colombo wetlands in urban planning with nature-based solutions. *Societal Impacts*, 5, 100106. <https://doi.org/10.1016/j.socimp.2025.100106>
- Wong, E. L. (2017). *RM200m losses seen, as SMEs badly hit by Penang floods*. The Edge Malaysia. <https://theedgemaalaysia.com/article/rm200m-losses-seen-smes-badly-hit-penang-floods>
- Yazdan, M. M. S., Ahad, M. T., Kumar, R., & Mehedi, M. A. Al. (2022). Estimating Flooding at River Spree Floodplain Using HEC-RAS Simulation. *J*, 5(4), 410–426. <https://doi.org/10.3390/j5040028>
- Yin, Z., Liu, G., Zheng, Z., & Li, X. (2025). Sustainable Stormwater Management: Runoff Impact of Urban Land Layout with Multi-Level Impervious Surface Coverage. *Sustainability (Switzerland)*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/su17083511>
- Yusof, Z., Saad, N. A., Rahmat, S. R., Mohamad Razi, M. A., & Wan Abdul Majid, W. H. A. (2024). Decision-Making Framework With the Application of Cost-Benefit Analysis for Flood Mitigation Management. *Journal of Water Resources Management*, 2(2).
- Zen, F., Saputra Zen, W., & Saputra, W. (2023). *Enhancing Climate-Resilient Infrastructure Development in Indonesia* (Vol. 1). [https://www.imf.org/external/datamapper/GGXWDG\\_NGDP@WEO/](https://www.imf.org/external/datamapper/GGXWDG_NGDP@WEO/)
- Zeng, P., Fang, W., Zhang, H., & Liang, Z. (2023). Cost-Benefit Analysis of the Wuxikou Integrated Flood Management Project Considering the Effects of Flood Risk Reduction and Resettlement. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14(5), 795–812. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00520-y>
- Zhang, Y., Wang, E., & Gong, Y. (2024). A Structural Optimization of Urban Drainage Systems: An Optimization Approach for Mitigating Urban Floods. *Water (Switzerland)*, 16(12). <https://doi.org/10.3390/w16121696>
- Zheng, Z., Zhang, X., Qiao, W., & Zhao, R. (2025). Emergency Response to Urban Flooding: An Assessment of Mitigation Performance and Cost-Effectiveness in Sponge City Construction. *Water Resources Management*, 39(5), 1993–2007. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04139-0>

Zhou, H., Liu, J., Ou, S., Gao, C., Zhou, Y., Shi, L., & Zhou, K. (2024). Impact of effective impervious surface disconnection on urban hydrographs: A multi-scenario modeling study at the catchment scale. *Journal of Hydrology*, 630. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130656>