

# Integrasi model Pentaksiran Risiko Banjir pasca gempa bumi untuk Kota Belud, Sabah

## Integrated post-earthquake Flood Risk Assessment model for Kota Belud, Sabah

KAMILIA SHARIR<sup>1</sup>, RODEANO ROSLEE<sup>2,3,\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering (FKJ), Universiti Malaysia Sabah, 88400 Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia

<sup>2</sup> Faculty of Science & Natural Resources (FSSA), Universiti Malaysia Sabah, 88400 Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia

<sup>3</sup> Natural Disaster Research Center (NDRC), Universiti Malaysia Sabah, 88400 Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia

\* Corresponding author email address: [rodeano@ums.edu.my](mailto:rodeano@ums.edu.my)

**Abstrak:** Tujuan kajian ini dibuat adalah untuk membangunkan model Pentaksiran Risiko Banjir (FRM) pasca gempa bumi menggunakan pendekatan bersepadu yang komprehensif di Kota Belud, Sabah. Kawasan ini menghadapi peningkatan risiko banjir akibat aktiviti pembangunan dan impak bencana alam seperti Gempa Bumi Ranau 2015. Kekejangan kejadian banjir yang berlaku saban tahun di kawasan ini ditambah pula dengan peningkatan bencana lain seperti tanah runtuh, hakisan, dan aliran debris terutamanya selepas gempa bumi menunjukkan perlunya pendekatan pengurusan risiko yang lebih sistematik. Kajian di Malaysia kurang meneliti hubungan antara gempa bumi dan risiko banjir, maka model ini mempertimbangkan faktor gempa bumi dan faktor seperti kawasan bertopografi rendah, monsun serta taufan dalam pengurusan banjir. FRM yang dicadangkan menggabungkan lima komponen utama: pentaksiran bahaya banjir (FHAs) menggunakan model hidrodinamik *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS) dan indeks kerentanan banjir, pengenalanpastian elemen berisiko banjir (FREI), pentaksiran kemudahterancaman banjir (FVAs), analisis risiko banjir (FRAn), dan panganggaran risiko banjir (FREv). Dapatan kajian menunjukkan bahawa hasil peta FHAs mempunyai nilai validasi dalam kategori baik iaitu 88.4% dengan mengintegrasikan antara model hidrodinamik dengan model statistik-bivariat (nisbah kekerapan). Bagi hasil FREI pula, ketumpatan elemen berisiko tinggi terletak berhampiran dengan sungai utama iaitu Sg. Kadamaian, Sg. Wariu, Sg. Tempasuk, Sg. Abai dan Sg. Gurong-Gurong. Hasil peta FVAs menunjukkan sebahagian besar dari kawasan kajian dalam kategori kemudahterancaman sangat sederhana iaitu 55.07% (~108.49 km<sup>2</sup>) dan tiada kawasan mempunyai nilai kemudahterancaman dalam kategori sangat tinggi. Hasil FRAn menunjukkan bahawa kawasan-kawasan dalam darjah bahaya dan kemudahterancaman banjir yang tinggi turut mempunyai darjah risiko banjir yang tinggi seperti di Padang Pekan, Kg Lilud, Kg Sangkir, Kg Jawi-jawi, Kg Kota Bunga, Kg Limatok dan Kg Tamau dan begitu juga sebaliknya. FREv mendedahkan tahap kesiapsiagaan dan kedayatahan penduduk perlu ditingkatkan.

**Kata kunci:** Pentaksiran risiko banjir, impak pasca gempa bumi, model hidrodinamik, elemen berisiko, kemudahterancaman

**Abstract:** This study has developed a comprehensive integrated post-earthquake Flood Risk Assessment (FRM) model for Kota Belud, Sabah. The area faces increased risk of floods due to rapid development activities and natural disasters, such as the 2015 Ranau Earthquake. The frequent occurrence of floods, compounded by events such as landslides, erosion, and debris flows, particularly after the earthquake, calls for a more systematic risk management approach. Research on the relationship between earthquakes and flood risk is limited in Malaysia. This model considers earthquakes and other external factors in flood management. The proposed FRM involves five key components: Flood Hazard Assessment (FHA) using the Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) hydrodynamic model and flood vulnerability indices; identification of Flood Risk Elements (FREI); Flood Vulnerability Assessment (FVA); Flood Risk Analysis (FRAn); and Flood Risk Evaluation and Mitigation (FREv). Results of the FHA map has been validated with an Area Under Curve value of 88% (0.88). The highest density of flood risk elements (FREI) is found near the main rivers, namely Sg. Kadamaian, Sg. Wariu, Sg. Tempasuk, Sg. Abai, and Sg. Gurong-Gurong. The FVAs map shows that a large part of the study area falls under the moderately vulnerable category at 55% (~108.49 km<sup>2</sup>), with minimal areas in the highly vulnerable category. The FRAn results indicate that areas with high flood hazard and vulnerability levels also have high flood risk levels, such as in Padang Pekan, Kg Lilud, Kg Sangkir, Kg Jawi-jawi, Kg Kota Bunga, Kg Limatok and Kg Tamau, and vice versa. The FREv reveals that the preparedness and resilience levels of residents need to be improved.

**Keywords:** Flood risk assessment, post-earthquake impact, hydrodynamic modeling, element at risk, vulnerability

## PENGENALAN

Banjir merupakan fenomena alam yang kompleks dan sering dikaitkan dengan perubahan iklim serta musim monsun (Vojtek & Vojteková, 2016). Menurut *World Bank's Global Subnational Atlas of Poverty*, sekitar 1.47 bilion orang di seluruh dunia berisiko terdedah kepada banjir besar (Rentschler & Salhab, 2020). Di Malaysia, banjir sering berlaku di kawasan tanah rendah dan di dataran banjir (Department of Irrigation and Drainage, 2018). Selain faktor cuaca dan geografi, impak bencana alam seperti gempa bumi juga boleh meningkatkan risiko banjir. Hal ini dapat dilihat jelas selepas kejadian Gempa Bumi Ranau, Sabah pada tahun 2015, terdapat peningkatan kejadian banjir di kawasan sekitar pusat gempa bumi khususnya di kawasan Kota Belud. Ini menunjukkan terdapat hubungan antara gempa bumi dan perubahan hidrologi yang menyumbang kepada risiko banjir. Kejadian multi-bencana atau bencana berangkai seperti tanah runtuh, hakisan, dan aliran debris kesan dari gempa bumi juga mendorong kepada alur sungai menjadi cetek dan menyumbang kepada kejadian banjir (Tongkul, 2017; Roslee *et al.*, 2018; Rosli *et al.*, 2021). Hal ini menekankan pentingnya pendekatan pengurusan risiko banjir yang mengambil kira faktor pasca gempa bumi.

Usaha menangani risiko banjir yang semakin kompleks ini memerlukan model pengurusan risiko yang bersepadu dan holistik. Antaranya seperti *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030* yang adaptasi dari Persidangan Ketiga Persatuan Bangsa-Bangsa Bersatu bagi mengurangkan dan mengurus risiko bencana secara global serta Pelan Strategik Agensi Pengurusan Bencana Negara 2019-2023 oleh NADMA di Malaysia, bertujuan untuk mewujudkan masyarakat yang lebih berdaya tahan terhadap bencana.

Walaupun pelbagai kajian telah dijalankan berkaitan penilaian risiko banjir di Malaysia (cth: Ahamad *et al.*, 2009; Tam *et al.*, 2014; Roslee *et al.*, 2017; Siti Nurul Annisa & Azahan, 2017; Bhuiyan *et al.*, 2018; Lee Siew Len *et al.*, 2018; Mariappan *et al.*, 2019; Sharir *et al.*, 2019; Usman Kaoje *et al.*, 2020), kajian menghubungkan gempa bumi dan banjir hendaklah perlu diteliti secara mendalam. Kajian ini bertujuan membangunkan Model Penilaian Risiko Banjir (FRM) pasca gempa bumi yang komprehensif di Kota Belud, Sabah. Model ini akan menggabungkan lima komponen utama: (a) Pentaksiran Bahaya Banjir (FHAs), (b) Pengenalpastian Elemen Berisiko (FREI), (c) Pentaksiran Kemudahterancaman Banjir (FVAs), (d) Analisis Risiko Banjir (FRAn), dan (e) Penganggaran Risiko Banjir (FREv). Dengan mengambil kira faktor pasca gempa bumi, model ini dapat memberikan panduan lebih tepat dalam pengurusan risiko banjir dan langkah mitigasi di kawasan berisiko tinggi.

## KAWASAN KAJIAN

Kawasan kajian terletak di daerah Kota Belud, di pantai barat Sabah yang menghadap Laut China Selatan, kira-kira

70 km dari Kota Kinabalu. Daerah ini terdiri daripada tiga lembangan sungai utama: Lembangan Sungai Tempasuk seluas 122 km<sup>2</sup>, Lembangan Sungai Kedamaian seluas 445 km<sup>2</sup>, dan Lembangan Sungai Wariu seluas 343 km<sup>2</sup>. Secara geografi, kawasan ini berada antara latitud 6°18'32.655"U hingga 6°25'49.605"U dan longitud 116°28'37.631"T hingga 116°18'47.156"T, meliputi keluasan sekitar 200 km<sup>2</sup>.

Kota Belud sering mengalami banjir sejak awal 1960-an, terutama jenis banjir monsun dan kilat (Ujang, 2021). Namun, kejadian banjir semakin kerap selepas Gempa Bumi Ranau pada 5 Jun 2015, dengan magnitud 6.0 skala Richter, berpusat di sekitar Gunung Kinabalu (Jabatan Meteorologi Malaysia, 2021; Rosli *et al.*, 2021). Kesan gempa bumi ini telah mengubah pola bencana di kawasan berdekatan, mencetuskan bencana sekunder seperti tanah runtuh, aliran debris, dan banjir kilat (Sharir & Roslee, 2022, 2023a).

Runtuhan tanah yang berlaku akibat gempa bumi tersebut memberi impak besar kepada lembangan-lembangan sungai di sekitar kaki Gunung Kinabalu, termasuk Lembangan Sungai Kadamaian. Hampir 1,500 hektar tanah runtuh dikenal pasti, menyebabkan beberapa sungai terjejas oleh runtuhan ini (Tongkul, 2021). Runtuhan tanah ini mengakibatkan kemusnahan kawasan tadahan air dan mengubah aliran air, yang boleh menyebabkan aliran puing atau banjir kilat (Yusoff *et al.*, 2016; Sharir *et al.*, 2022). Sungai Kadamaian dan Sungai Wariu, yang berpunca dari Gunung Kinabalu dan mengalir ke arah Kota Belud, adalah antara sungai yang terjejas teruk (Sharir & Roslee, 2023b). Aliran debris yang terbentuk dari runtuhan tanah menyebabkan sungai-sungai di kawasan ini mengalami pelebaran dan perubahan aliran, menjadikan dasar sungai cetek akibat endapan sedimen (Sharir *et al.*, 2022). Keadaan ini memburukkan lagi risiko banjir lumpur, yang berlaku dengan sangat pantas, mengakibatkan kerugian dan kerosakan kepada penduduk kampung (Angkatan Pertahanan Awam Malaysia, 2017).

## METODOLOGI KAJIAN

Kajian ini dijalankan melalui lima komponen utama yang melibatkan pendekatan sistematik untuk menilai kerentanan, bahaya dan risiko banjir di kawasan kajian. Metodologi ini disusun untuk menyediakan gambaran yang menyeluruh mengenai risiko banjir di Kota Belud, Sabah. Model ini akan menggabungkan lima komponen utama: i) Pentaksiran Kerentanan dan Bahaya Banjir (FHAs), ii) Pengenalpastian Elemen Berisiko (FREI), iii) Pentaksiran Kemudahterancaman Banjir (FVAs), iv) Analisis Risiko Banjir (FRAn), v) Penganggaran Risiko Banjir (FREv).

### Pentaksiran Kerentanan dan Bahaya Banjir (FHAs)

Pentaksiran Kerentanan dan Bahaya Banjir (FHAs) dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan utama: model hidrodinamik HEC-RAS dan model statistik. Model hidrodinamik HEC-RAS digunakan untuk menghasilkan

peta limpahan banjir yang menggambarkan kawasan yang berpotensi terjejas oleh limpahan air berdasarkan tempoh ulangan banjir. Di samping itu, model statistik-bivariat (nisbah kekerapan) dan pendekatan heuristik seperti *Analytic Hierarchy Process* (AHP) digunakan untuk menentukan indeks kerentanan banjir. Gabungan kedua-dua pendekatan ini bertujuan untuk menghasilkan peta bahaya banjir yang lebih komprehensif, yang seterusnya memudahkan perancangan mitigasi yang lebih berkesan.

### Pengenalpastian Elemen Berisiko (FREI)

Pengenalpastian elemen berisiko banjir dilakukan melalui dua kaedah utama, iaitu secara nyata (melalui jejak bangunan dan jaringan jalan raya) dan secara tidak nyata (melalui soal selidik lapangan). Peta Ketumpatan Fizikal (PKF) dihasilkan dengan mendigitalkan data jejak bangunan dan jaringan jalan raya, menggambarkan elemen-elemen fizikal yang berisiko terhadap banjir pada skala rantau. Kajian ini merujuk kepada metodologi yang diperincikan dalam kajian oleh Sharir & Roslee (2023b). Peta ini menyediakan asas yang kukuh untuk menilai pendedahan elemen-elemen berisiko terhadap banjir.

### Pentaksiran Kemudahterancaman Banjir (FVAs)

Kemudahterancaman banjir dinilai melalui penggabungan tiga aspek utama: fizikal, sosial, dan persekitaran. Data diperoleh melalui soal selidik dan kajian lapangan, yang kemudiannya dianalisis untuk membina indeks kemudahterancaman. Kajian ini juga merujuk kepada pendekatan yang digunakan oleh Sharir & Roslee (2023a), di mana mereka menekankan pentingnya memahami persepsi, kesedaran, dan kesiapsiagaan penduduk terhadap risiko banjir. Indeks kemudahterancaman yang dihasilkan membantu dalam mengenal pasti kawasan yang paling terdedah kepada impak banjir, khususnya kawasan yang mempunyai ketumpatan penduduk dan infrastruktur yang tinggi.

### Analisis Risiko Banjir (FRAn)

Analisis Risiko Banjir (FRAn) melibatkan gabungan hasil daripada peta bahaya banjir (FHAs), elemen berisiko (FREI), dan kemudahterancaman (FVAs) untuk menghasilkan Peta Risiko Banjir. Peta ini menunjukkan kawasan yang mempunyai risiko banjir tertinggi berdasarkan kombinasi bahaya, kemudahterancaman, dan elemen berisiko terhadap banjir. Analisis ini membantu mengenal pasti kawasan-kawasan kritikal yang memerlukan tindakan mitigasi segera dan menjadi panduan untuk pelaksanaan langkah-langkah pengurangan risiko banjir.

### Penganggaran Risiko Banjir (FREv)

Komponen terakhir dalam kajian ini adalah penganggaran risiko banjir, di mana hasil daripada peta risiko banjir (FRAn) digunakan untuk menilai keupayaan kawasan dan penduduk dalam menghadapi kejadian banjir. Hasil penganggaran

ini juga menjadi panduan dalam mencadangkan langkah-langkah mitigasi yang sesuai, sama ada melalui pendekatan struktur atau bukan struktur, bagi mengurangkan impak banjir di kawasan terjejas.

## HASIL DAN PERBINCANGAN

### Pentaksiran Kerentanan dan Bahaya Banjir (FHAs)

Kajian ini telah menjalankan pentaksiran bahaya banjir di kawasan Kota Belud dengan menggunakan pendekatan model hidrodinamik (HEC-RAS) dan model statistik-bivariat (Nisbah Kekerapan). Model ini mengintegrasikan data luahan sungai yang diperoleh daripada dua stesen hidrologi utama iaitu Stesen Sungai Kadamaian dan Stesen Sungai Wariu. Analisis kekerapan banjir telah dijalankan menggunakan data siri maksimum tahunan (*Annual Maximum Series*, AMS) dari tahun 1969 hingga 2018, yang melibatkan 50 tahun data rekod banjir maksimum.

### Model hidrodinamik

Kajian ini menggunakan model hidrodinamik HEC-RAS untuk menganalisis kekerapan banjir dan meramalkan kawasan limpahan banjir di daerah Kota Belud. Data luahan sungai dari dua stesen hidrologi utama, iaitu Stesen Sungai Kadamaian dan Stesen Sungai Wariu, telah digunakan dalam analisis ini. Data yang digunakan merangkumi tempoh 50 tahun (1969-2018), dengan purata luahan maksimum masing-masing 759.36 m<sup>3</sup>/s untuk Sungai Kadamaian dan 442.06 m<sup>3</sup>/s untuk Sungai Wariu (Jadual 1).

Analisis kekerapan banjir dijalankan menggunakan data Siri Maksimum Tahunan (*Annual Maximum Series*, AMS) yang diperoleh daripada rekod luahan sungai di kedua-dua stesen hidrologi. AMS ini terdiri daripada data maksimum tertinggi yang dicatatkan setiap tahun sepanjang tempoh kajian. Dalam kajian ini, analisis kekerapan banjir bertujuan

**Jadual 1:** Analisis deskriptif data luahan sungai di kedua-dua stesen hidrologi.

| Penerangan                         | Sungai Kadamaian              |                       | Sungai Wariu                  |                       |
|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|
|                                    | Data luahan sungai setiap jam | Siri maksimum tahunan | Data luahan sungai setiap jam | Siri maksimum tahunan |
| Minimum (m <sup>3</sup> /s)        | 0.71                          | 248.05                | 0.63                          | 127.55                |
| Purata (m <sup>3</sup> /s)         | 34.82                         | 759.36                | 19.06                         | 442.06                |
| Maksimum (m <sup>3</sup> /s)       | 1362.05                       | 1362.05               | 891.48                        | 891.48                |
| Sisihan piawai (m <sup>3</sup> /s) | 10.05                         | 291.39                | 5.45                          | 166.87                |

untuk menganggarkan magnitud banjir bagi tempoh ulangan yang berbeza (ARI).

Kaedah taburan kebarangkalian Gumbel digunakan untuk menentukan magnitud banjir bagi tempoh ulangan 10, 20, 50, dan 100 tahun. Dalam analisis ini, formula kedudukan Weibull digunakan untuk menentukan 'rank' atau pangkat taburan. Hasil analisis ini menunjukkan bahawa magnitud banjir bagi tempoh ulangan 10 tahun di Sungai Kadamaian adalah 1175.50 m<sup>3</sup>/s, manakala bagi tempoh ulangan 100 tahun, magnitud banjir meningkat kepada 1750.08 m<sup>3</sup>/s. Di Sungai Wariu pula, magnitud banjir bagi tempoh ulangan 10 tahun ialah 683.14 m<sup>3</sup>/s dan bagi tempoh ulangan 100 tahun pula, ia meningkat kepada 1016.01 m<sup>3</sup>/s.

Ujian *Kolmogorov-Smirnov* (KS) dan korelasi koefisien ( $R^2$ ) digunakan untuk menilai kesesuaian model taburan kebarangkalian yang digunakan. Nilai  $R^2$  yang diperoleh adalah 0.97 untuk Sungai Kadamaian dan 0.99 untuk Sungai Wariu, menunjukkan bahawa model taburan kebarangkalian Gumbel adalah sangat sesuai untuk meramalkan magnitud banjir di kawasan ini. Hasil analisis ini juga menunjukkan bahawa nilai  $p$  yang diperoleh dari ujian KS bagi kedua-dua stesen hidrologi adalah lebih kecil dari nilai signifikan alfa ( $p < 0.05$ ), yang menandakan bahawa data yang diuji mengikuti taburan yang ditetapkan.

Hidrograf yang dijana menggunakan data cerapan dari tahun 2010 dijadikan asas bagi mensimulasikan hidrograf sintetik untuk tempoh ulangan yang berbeza. Hidrograf ini digunakan sebagai input sempadan dalam model HEC-RAS untuk mensimulasikan peta limpahan banjir bagi tempoh ulangan 10, 20, 50, dan 100 tahun (Jadual 2). Luahan maksimum bagi kejadian banjir tahun 2010 mencatatkan nilai hampir dengan tempoh ulangan 30 tahun bagi kedua-dua stesen hidrologi, iaitu 1362.05 m<sup>3</sup>/s untuk Sungai Kadamaian dan 891.48 m<sup>3</sup>/s untuk Sungai Wariu (Jadual 3). Data ini digunakan sebagai penentuan sempadan di bahagian hulu sungai dalam simulasi banjir.

**Jadual 2:** Tempoh ulangan banjir bagi kedua-dua stesen hidrologi.

| Tempoh Ulangan Banjir, ARI (Tahun) | Kebarangkalian Melebihi | Luahan Puncak Banjir (m <sup>3</sup> /s) |              |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------|--------------|
|                                    |                         | Sungai Kadamaian                         | Sungai Wariu |
| 2                                  | 0.500                   | 714.85                                   | 416.28       |
| 5                                  | 0.200                   | 992.01                                   | 576.84       |
| 10                                 | 0.100                   | 1175.50                                  | 683.14       |
| 20                                 | 0.050                   | 1351.52                                  | 785.11       |
| 30                                 | 0.033                   | 1452.78                                  | 843.77       |
| 50                                 | 0.020                   | 1579.35                                  | 917.10       |
| 100                                | 0.010                   | 1750.08                                  | 1016.01      |
| 150                                | 0.007                   | 1849.64                                  | 1073.69      |
| 200                                | 0.005                   | 1920.19                                  | 1114.56      |

Model ini telah ditentu ukur dan disahkan berdasarkan peristiwa banjir yang berlaku pada tahun 2010 menggunakan nilai Manning N. Nilai Manning N diselaraskan mengikut jenis guna tanah dan ciri-ciri aliran untuk memastikan hasil simulasi mendekati nilai data cerapan. Manning N digunakan kerana ia secara langsung mempengaruhi kelajuan aliran dan aras air, serta mudah disesuaikan tanpa perubahan besar pada geometri model. Pendekatan ini sesuai untuk menangkap variasi kekasaran permukaan dan merupakan amalan lazim dalam hidraulik saluran terbuka. Penentuan model ini dilakukan dengan beberapa kali percubaan sehingga tahap ketinggian air dan luahan yang disimulasikan hampir menyerupai data cerapan.

Hasil penentuan menunjukkan bahawa simulasi model banjir dapat diterima dengan ketepatan lebih daripada 85% apabila dibandingkan dengan tahap banjir yang dicerap. Pengesanan model juga menunjukkan bahawa sempadan kawasan banjir yang disimulasikan adalah hampir 80% tepat berbanding dengan kawasan banjir sebenar. Model ini kemudiannya digunakan untuk mensimulasikan limpahan banjir bagi tempoh ulangan yang berbeza iaitu 10, 20, 50, dan 100 tahun.

Limpahan banjir yang dihasilkan daripada simulasi model HEC-RAS menunjukkan bahawa tahap kedalaman banjir dan keluasan kawasan limpahan meningkat secara linear dengan peningkatan tempoh ulangan banjir masing-masing dengan 15.61 m, 16.14 m dan 17.20 m dari paras normal sungai. Untuk tempoh ulangan 100 tahun, keluasan kawasan limpahan banjir mencapai 29.15 km<sup>2</sup> dengan kedalaman maksimum 13.88 m. Kedalaman maksimum yang dicerap bagi kejadian banjir pada tahun 2010 pula ialah 8.17 m.

Simulasi ini menunjukkan bahawa kawasan yang paling terdedah kepada banjir adalah di kawasan pertembungan antara Sungai Kadamaian dan Sungai Wariu. Di kawasan ini, halaju air boleh mencapai sehingga 15 m/s, yang menunjukkan risiko tinggi untuk limpahan banjir yang cepat dan ganas. Keadaan ini menunjukkan bahawa kawasan sekitar pertembungan sungai perlu diberikan perhatian khusus dalam perancangan mitigasi banjir.

**Jadual 3:** Puncak luahan banjir di kedua-dua stesen hidrologi.

| Tempoh Ulangan (Tahun)            | Puncak Luahan Banjir (m <sup>3</sup> /s) |              |
|-----------------------------------|------------------------------------------|--------------|
|                                   | Sungai Kadamaian                         | Sungai Wariu |
| 10                                | 1362.05                                  | 891          |
| 20                                | 1171.36                                  | 683.14       |
| Data cerapan kejadian banjir 2010 | 1348.43                                  | 785.11       |
| 50                                | 1579.98                                  | 917.10       |
| 100                               | 1743.42                                  | 1016.01      |

Seperti yang disarankan dalam kajian-kajian sebelum ini, kajian ini juga memilih tempoh ulangan 100 tahun sebagai penanda aras banjir berskala ekstrem. Lapisan limpahan banjir untuk tempoh ulangan 100 tahun akan digunakan untuk digabungkan dengan indeks kerentanan banjir untuk mendapatkan pentaksiran bahaya banjir bagi keseluruhan kawasan kajian. Dengan gabungan data luahan sungai, hidrograf tempoh ulangan, dan nilai Manning N, model HEC-RAS yang digunakan dalam kajian ini telah berjaya menghasilkan peta limpahan banjir yang komprehensif dan boleh dijadikan asas dalam perancangan mitigasi banjir di masa hadapan.

#### Indeks bahaya banjir

Kajian ini telah menghasilkan indeks bahaya banjir bagi kawasan Kota Belud dengan menggunakan gabungan pendekatan heuristik (*Analytic Hierarchy Process*, AHP) dan statistik-bivariat (*Frequency Ratio*, FR). Indeks ini dibangunkan dengan mengambil kira pelbagai faktor penyebab banjir yang diintegrasikan melalui model-model tertentu bagi menentukan tahap kerentanan setiap kawasan terhadap banjir.

Pemilihan faktor penyebab banjir adalah langkah penting dalam membina indeks kerentanan banjir. Sepuluh faktor utama telah dikenalpasti berdasarkan kajian literatur, analisis data setempat, dan kajian korelasi statistik. Faktor-faktor tersebut ditunjukkan dalam Jadual 4.

Setiap faktor ini diuji menggunakan analisis Khi-Kuasa Dua untuk menentukan korelasinya dengan kejadian banjir.

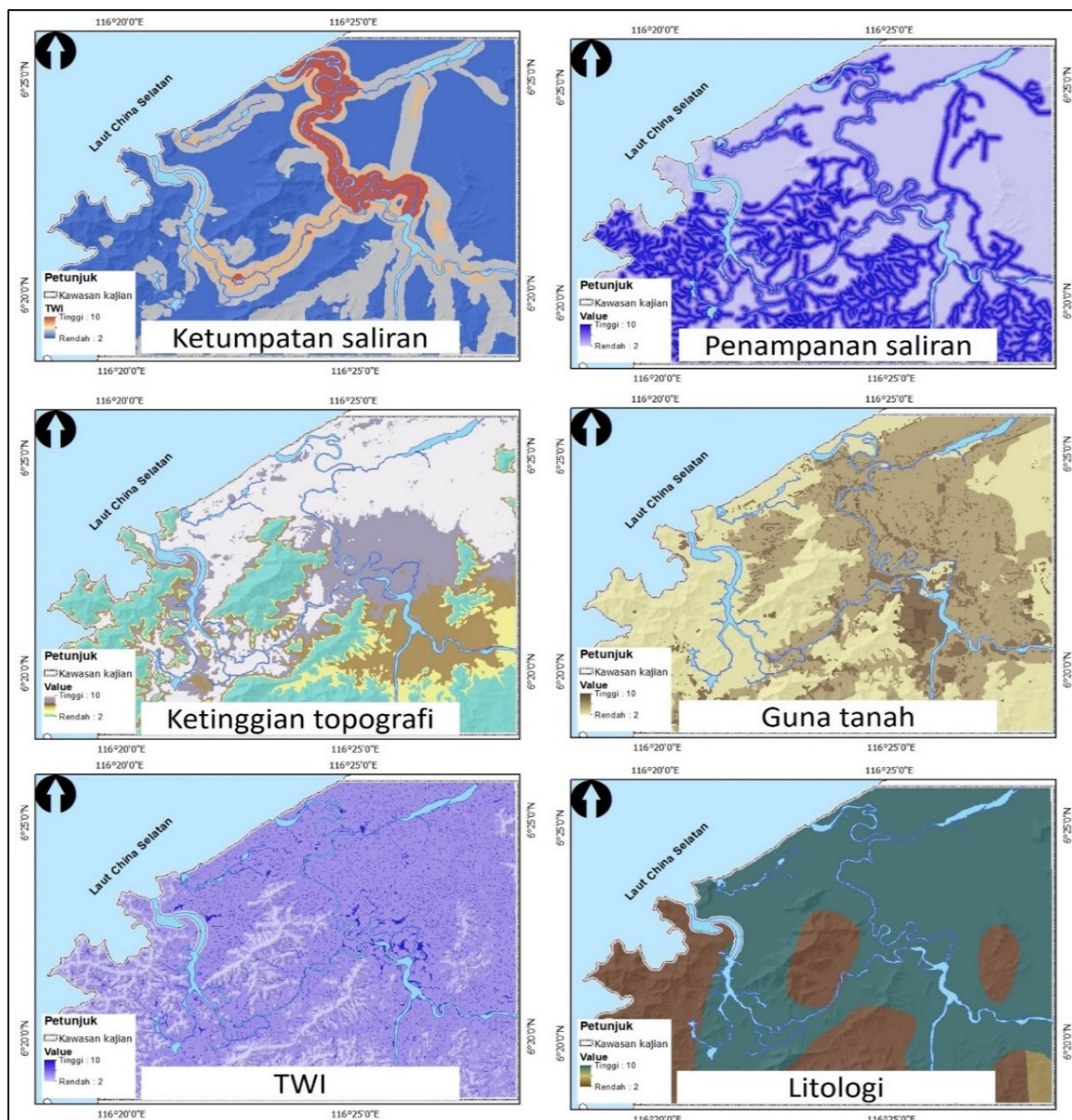
Hasil analisis menunjukkan bahawa enam faktor utama yang mempunyai korelasi signifikan dengan kejadian banjir ialah ketumpatan saliran, penampungan saliran, ketinggian topografi, indeks kelembapan topografi, litologi, dan guna tanah (Rajah 1). Faktor-faktor ini dipilih sebagai parameter utama dalam menjana model kerentanan banjir.

Dua model digunakan untuk menghasilkan peta indeks bahaya banjir, iaitu model AHP dan model FR. Model AHP digunakan untuk memberikan pemberat kepada setiap faktor berdasarkan tahap kepentingan dan pengaruhnya terhadap kejadian banjir. Nilai pemberat ini diperoleh melalui proses perbandingan berpasangan dan pengiraan nilai eigen. Hasil analisis menunjukkan bahawa faktor ketumpatan saliran dan ketinggian topografi memainkan peranan penting dalam mempengaruhi kejadian banjir di kawasan kajian dengan nilai pemberat masing-masing sebanyak 0.2901 dan 0.2490. Faktor lain seperti guna tanah, penampungan saliran, dan indeks kelembapan topografi turut mempunyai pengaruh yang ketara dalam menentukan tahap kerentanan banjir.

Peta indeks kerentanan banjir yang dijana oleh model AHP menunjukkan bahawa 35.4% (70 km<sup>2</sup>) kawasan kajian berada dalam kategori kerentanan sangat rendah, 34.3% (68 km<sup>2</sup>) dalam kategori rendah, 18.4% (36 km<sup>2</sup>) dalam kategori sederhana, 9.8% (19 km<sup>2</sup>) dalam kategori tinggi, dan 2.1% (4 km<sup>2</sup>) dalam kategori sangat tinggi (Rajah 2). Kawasan berkerentanan tinggi dan sangat tinggi terletak di sekitar Pekan Kota Belud dan sepanjang Sungai Tempasuk dan Sungai Gurong-gurong.

**Jadual 4:** Faktor penyebab banjir.

| Faktor Penyebab Banjir            | Keterangan                                                                        |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Ketumpatan Saliran                | Jumlah panjang sungai dalam satu kilometer persegi.                               |
| Penampungan Saliran               | Jarak zon penampungan dari saliran utama.                                         |
| Ketinggian Topografi              | Tahap ketinggian permukaan tanah dari aras laut.                                  |
| Sudut Kecuraman Cerun             | Sudut kecerunan permukaan tanah yang boleh mempengaruhi aliran air permukaan.     |
| Kelengkungan Cerun                | Bentuk cerun sama ada cekung atau cembung yang memberi kesan kepada aliran air.   |
| Indeks Kelembapan Topografi (TWI) | Indeks yang menggambarkan keupayaan kawasan untuk menampung air.                  |
| Litologi                          | Jenis batuan yang meliputi kawasan kajian.                                        |
| Jenis Tanah                       | Kepelbagaian siri tanah yang menunjukkan ciri-ciri pengaliran dan penyerapan air. |
| Guna Tanah                        | Penggunaan tanah sama ada pertanian, penempatan, hutan, atau tanah kosong.        |
| Taburan Hujan Tahunan             | Jumlah purata hujan yang diterima di kawasan tersebut.                            |



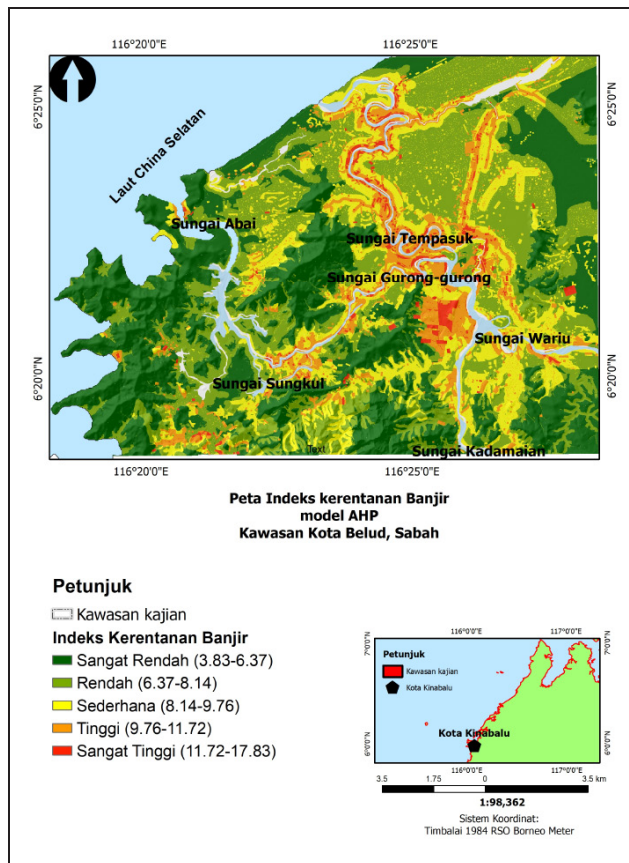
Rajah 1: Peta-peta tematik yang terbitan sebagai parameter model.

Model FR pula menggunakan nilai nisbah kekerapan untuk menentukan hubungan antara parameter penyumbang banjir dengan kejadian banjir. Semakin tinggi nilai FR, semakin tinggi korelasi antara parameter tersebut dengan kejadian banjir. Contohnya, kawasan yang mempunyai ketumpatan saliran tinggi (lebih daripada 30 km/km<sup>2</sup>) menunjukkan nilai FR sebanyak 4.18, yang menandakan kawasan ini mempunyai kerentanan banjir yang sangat tinggi.

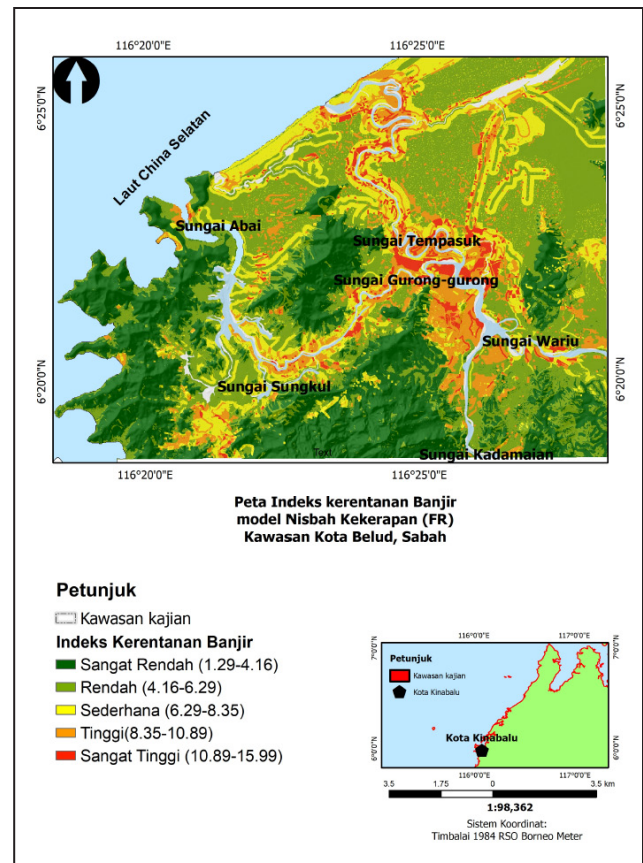
Peta kerentanan banjir yang dihasilkan oleh model FR menunjukkan bahawa 29.98% (59 km<sup>2</sup>) kawasan kajian

berada dalam kategori kerentanan sangat rendah, 38.89% (77 km<sup>2</sup>) dalam kategori rendah, 16.8% (33 km<sup>2</sup>) dalam kategori sederhana, 10.95% (22 km<sup>2</sup>) dalam kategori tinggi, dan 3.38% (7 km<sup>2</sup>) dalam kategori sangat tinggi (Rajah 3). Zon yang mempunyai kerentanan sangat tinggi terletak di sepanjang sungai utama iaitu Sungai Tempasuk, Sungai Gurong-gurong, dan kawasan tengah Pekan Kota Belud.

Pengesahan model dilakukan dengan membandingkan peta-peta kerentanan banjir yang dijana dengan data taburan banjir sebenar. Lengkung kadar ramalan (ROC)



Rajah 2: Peta Kerentanan Banjir menggunakan model AHP.



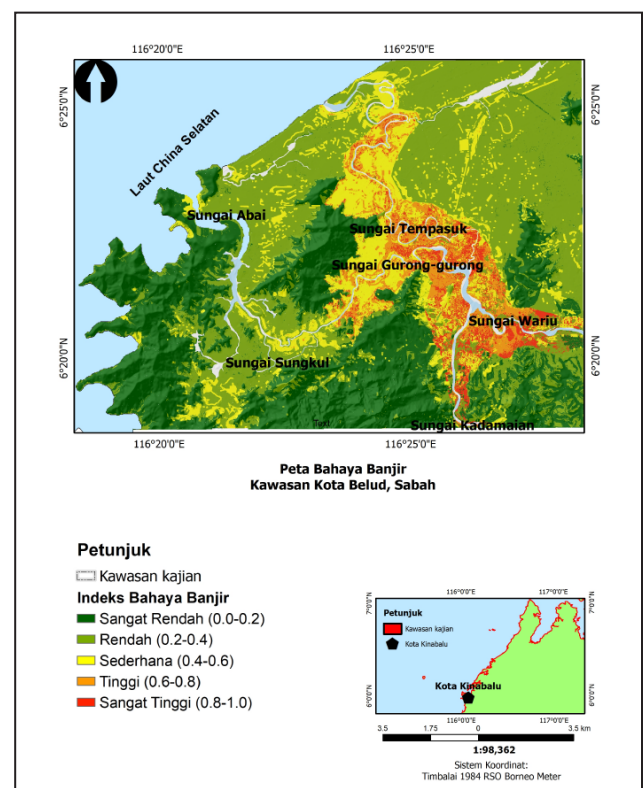
Rajah 3: Peta Kerentanan Banjir menggunakan model FR.

digunakan untuk menilai ketepatan model. Hasil pengesahan menunjukkan bahawa model FR mempunyai nilai kawasan bawah lengkungan (AUC) sebanyak 0.864, menandakan bahawa model ini berada dalam kategori baik untuk meramalkan kejadian banjir. Manakala model AHP pula menunjukkan nilai AUC sebanyak 0.774, menunjukkan bahawa model ini adalah sederhana dalam kebolehpercayaannya.

Oleh itu, model FR dipilih sebagai model utama untuk mewakili indeks kerentanan banjir di kawasan ini. Model ini akan digunakan dalam penggabungan dengan peta limpahan banjir yang dijana menggunakan model hidrodinamik HEC-RAS bagi menghasilkan peta bahaya banjir yang komprehensif dan lebih tepat bagi kawasan Kota Belud (Rajah 4).

#### Integrasi peta bahaya dan model hidrodinamik

Langkah terakhir dalam pentaksiran bahaya banjir adalah dengan mengintegrasikan peta bahaya banjir yang dihasilkan dari model AHP dan FR dengan model hidrodinamik (HEC-RAS). Peta limpahan banjir yang dijana menggunakan model hidrodinamik berdasarkan tempoh ulangan 100 tahun digabungkan dengan indeks kerentanan banjir untuk menghasilkan peta bahaya banjir yang lebih komprehensif dan terperinci. Integrasi ini penting untuk memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai



Rajah 4: Peta Bahaya Banjir bagi kawasan Kota Belud, Sabah.

tahap bahaya di kawasan kajian. Peta bahaya banjir yang dihasilkan ini telah divalidasi menggunakan kaedah *Area Under Curve* (AUC) dan memperoleh nilai pengesahan yang baik iaitu 88% (0.88). Ini menunjukkan bahawa gabungan antara model hidrodinamik (HEC-RAS 2D) dan model statistik-bivariat (Nisbah Kekekapan) dapat memberikan hasil yang lebih tepat dalam mengintegrasikan analisis limpahan banjir dan kerentanan banjir untuk menilai tahap bahaya banjir di kawasan kajian.

Hasil integrasi menunjukkan bahawa kawasan pertanian dan penempatan yang terletak di sepanjang Sungai Tempasuk, Sungai Kadamaian, dan Sungai Gurong-gurong terdedah kepada kedalaman banjir melebihi 4 meter, terutama di kawasan pertembungan sungai. Selain itu, kawasan dengan halaju air yang tinggi juga dikenal pasti sebagai zon bahaya yang memerlukan perhatian khusus dalam perancangan langkah mitigasi banjir bagi mengurangkan risiko dan kerosakan yang berpotensi berlaku.

### Pengenalpastian Elemen Berisiko (FREI)

Pengenalpastian elemen berisiko di kawasan kajian melibatkan dua pendekatan: nyata (kajian rantau) dan tidak nyata (kajian kes). Elemen berisiko nyata merujuk kepada inventori jejak bangunan dan jaringan jalan raya yang digunakan untuk menghasilkan Peta Ketumpatan Fizikal

(PKF) (Sharir & Roslee, 2023b). Data ini melibatkan pelbagai jenis bangunan seperti penempatan, komersial, industri, institusi, fasiliti awam, dan pertanian. Sebanyak 15,182 data bangunan telah dikumpul di kawasan kajian, dengan majoriti bangunan terdiri daripada penempatan (12,869 buah), diikuti dengan institusi, komersial, industri, dan lain-lain.

Jalan raya di kawasan ini dibahagikan kepada dua jenis: jalan utama (jalan persekutuan dan negeri) sepanjang 26 km yang merupakan sebahagian daripada Lebuhraya Pan Borneo, dan jalan sekunder (jalan kampung dan persendirian) sepanjang 512 km. Peta ketumpatan bangunan yang dihasilkan menggunakan teknik interpolasi menunjukkan kawasan dengan ketumpatan bangunan yang tinggi terletak berhampiran sungai-sungai utama, seperti Sungai Kadamaian, Sungai Wariu, dan Sungai Tempasuk. Hasil ini menunjukkan bahawa kawasan yang mempunyai ketumpatan elemen fizikal yang tinggi adalah lebih berisiko terhadap banjir (Rajah 5).

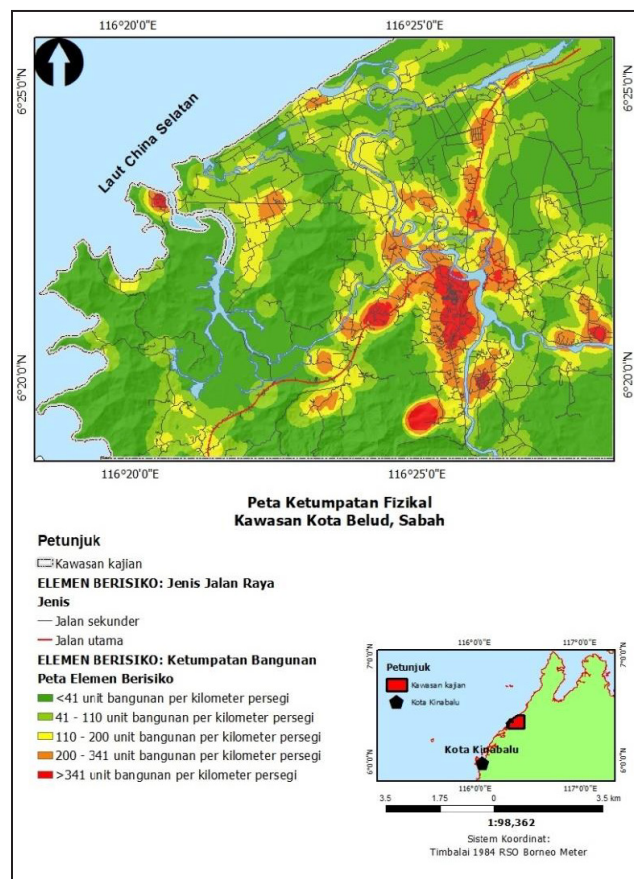
Elemen berisiko tidak nyata pula dikenalpasti melalui soal selidik yang melibatkan 490 responden di sekitar kawasan kajian. Hasil soal selidik menunjukkan bahawa majoriti responden memahami risiko banjir dan bersedia menghadapi bencana dengan bantuan dan sokongan dari agensi tempatan seperti Agensi Pengurusan Bencana Negara (NADMA) dan pihak berkuasa tempatan (Sharir & Roslee, 2023b). Hasil pengenalpastian elemen berisiko ini menjadi asas penting untuk penilaian risiko banjir dan penggubalan strategi mitigasi yang lebih berkesan.

### Pentaksiran Kemudahterancaman Banjir (FVAs)

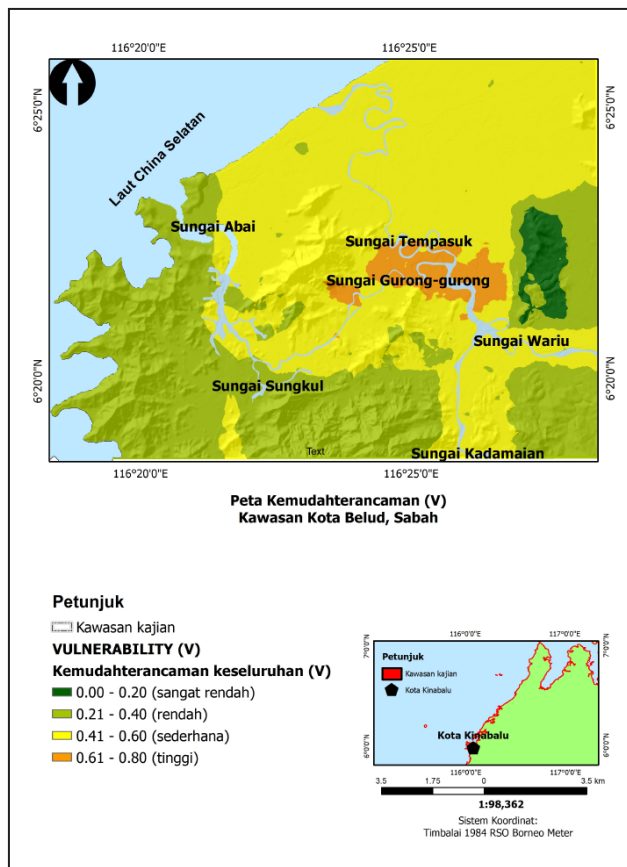
Pentaksiran kemudahterancaman banjir di kawasan kajian dijalankan berdasarkan tiga parameter utama: fizikal, sosial, dan persekitaran. Kemudahterancaman fizikal merangkumi faktor-faktor seperti struktur bangunan, kelengkapan dalaman, keadaan jalan raya, dan tindakan penstabilan yang diambil di sekitar kawasan bangunan. Hasil analisis menunjukkan bahawa kebanyakan bangunan berada dalam kategori kemudahterancaman sederhana (66.54%) dan rendah (23.51%), manakala hanya sebilangan kecil berada dalam kategori sangat tinggi (0.27%) (Rajah 6).

Kemudahterancaman sosial pula dinilai berdasarkan faktor seperti kecederaan dan kematian, kehilangan tempat tinggal, dan kesedaran awam mengenai bahaya banjir. Hasil analisis menunjukkan bahawa kebanyakan bangunan berada dalam kategori rendah (47.10%) dan sangat rendah (20.99%), manakala kawasan yang mempunyai kemudahterancaman tinggi adalah terhad (10.82%).

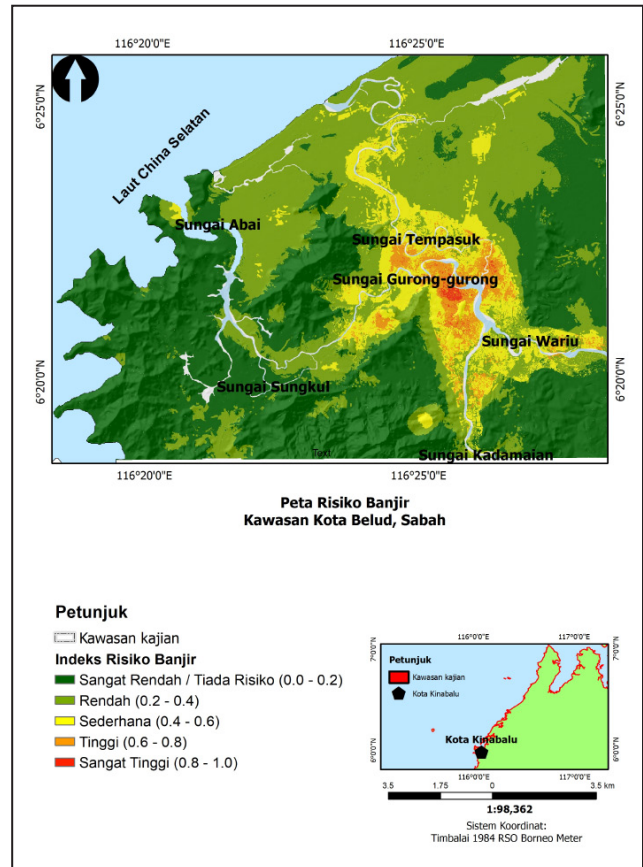
Kemudahterancaman persekitaran menilai aspek seperti tempoh masa pembaikpulihan, operasi harian, dan diversiti yang terdedah kepada banjir. Kebanyakan bangunan dalam kategori kemudahterancaman tinggi (42.39%) dan sederhana (27.77%), manakala 11.60% berada dalam kategori sangat tinggi. Gabungan ketiga-tiga parameter ini menghasilkan



Rajah 5: Peta Ketumpatan Fizikal.



Rajah 6: Peta Kemudahterancaman Banjir.



Rajah 7: Peta Risiko Banjir di kawasan Kota Belud, Sabah.

peta kemudahterancaman banjir yang menunjukkan bahawa kawasan dengan tahap kemudahterancaman yang tinggi terletak berhampiran sungai-sungai utama dan kawasan rendah.

Secara keseluruhan, hasil pentaksiran kemudahterancaman ini memberikan gambaran yang jelas mengenai kawasan yang paling terdedah kepada risiko banjir di Kota Belud. Indeks kemudahterancaman yang dihasilkan menunjukkan bahawa kebanyakan kawasan berada dalam kategori kemudahterancaman tinggi (0.61 - 0.80), sementara tiada kawasan yang tergolong dalam kategori sangat tinggi (0.81-1.00). Hal ini mungkin berkaitan dengan tahap kesedaran awam yang tinggi dan kesiapsiagaan penduduk dalam menghadapi banjir, terutamanya selepas Gempa Bumi Ranau 2015. Penduduk setempat dilihat sudah mengadaptasi keadaan banjir yang sering berlaku di kawasan ini sejak tahun 1960-an (Sharir & Roslee, 2023a). Namun demikian, tahap kemudahterancaman yang tinggi ini perlu diberi perhatian khusus kerana ia berpotensi memberi kesan langsung kepada aktiviti sosio-ekonomi kawasan ini.

### Analisis Risiko Banjir (FRAn)

Analisis risiko banjir di kawasan kajian dilakukan dengan mengintegrasikan peta bahaya banjir (FHAs),

pengenalpastian elemen berisiko (FREI), dan pentaksiran kemudahterancaman banjir (FVAs). Hasil daripada pertindanan peta-peta ini menghasilkan peta risiko banjir yang dapat menunjukkan tahap risiko di setiap kawasan berdasarkan elemen berisiko, bahaya banjir, dan kemudahterancaman. Indeks risiko banjir di kawasan ini dikira menggunakan tempoh ulangan 100 tahun sebagai parameter kebarangkalian bahaya maksimum.

Peta risiko banjir yang dihasilkan dibahagikan kepada lima kategori risiko: sangat rendah (0.0-0.2), rendah (0.2-0.4), sederhana (0.4-0.6), tinggi (0.6-0.8), dan sangat tinggi (0.8-1.0) (Rajah 7). Hasil analisis menunjukkan bahawa 50% daripada kawasan kajian berada dalam kategori risiko sangat rendah atau tiada risiko (101.36 km<sup>2</sup>), sementara 36% (71.4 km<sup>2</sup>) berada dalam kategori risiko rendah, 9% (19.36 km<sup>2</sup>) dalam kategori risiko sederhana, 3% (5.71 km<sup>2</sup>) dalam kategori risiko tinggi, dan hanya 2% (1 km<sup>2</sup>) berada dalam kategori risiko sangat tinggi. Kawasan dengan risiko banjir yang sangat tinggi didapati berhampiran sungai-sungai utama dan di sekitar pusat bandar Kota Belud, di mana kepadatan penduduk dan infrastruktur adalah tinggi. Peta ini membolehkan pihak berkuasa dan pihak berkepentingan untuk merancang langkah mitigasi dan intervensi yang lebih tepat dalam usaha mengurangkan risiko banjir di kawasan-kawasan terdedah.

## Penganggaran Risiko Banjir (FREv)

Penganggaran risiko banjir menunjukkan bahawa kawasan yang mempunyai tahap bahaya dan kemudahterancaman banjir yang tinggi juga mencatatkan tahap risiko banjir yang tinggi. Penilaian ini mendedahkan bahawa tahap kesiapsiagaan dan daya tahan penduduk perlu dipertingkatkan kerana kebanyakan kawasan dikategorikan sebagai risiko “tidak boleh diterima.” Justeru itu, penilaian yang tepat dan komprehensif diperlukan bagi menentukan pendekatan mitigasi yang paling berkesan, sama ada melalui kaedah struktur seperti pembinaan benteng dan empangan atau pendekatan bukan struktur seperti pemuliharaan kawasan takungan air semula jadi dan sistem amaran awal.

## KESIMPULAN

Kajian ini telah membangunkan model komprehensif untuk menilai risiko banjir pasca gempa bumi di kawasan Kota Belud, Sabah, menggunakan pendekatan bersepadu yang merangkumi lima komponen utama: Pentaksiran Kerentanan dan Bahaya Banjir (FHAs), Pengenalpastian Elemen Berisiko (FREI), Pentaksiran Kemudahterancaman Banjir (FVAs), Analisis Risiko Banjir (FRAn), dan Penganggaran Risiko Banjir (FREv). Hasil kajian menunjukkan bahawa model ini berkesan dalam mengenal pasti kawasan yang berisiko tinggi terhadap banjir dengan menggabungkan pelbagai faktor seperti bahaya, kemudahterancaman, dan elemen berisiko.

Dari segi Pentaksiran Kerentanan dan Bahaya Banjir (FHAs), penggunaan model hidrodinamik dan analisis statistik seperti nisbah kekerapan dan AHP membolehkan penghasilan peta bahaya banjir yang tepat, dengan nilai validasi yang tinggi. Pengenalpastian Elemen Berisiko (FREI) pula telah mengenal pasti kawasan yang paling terdedah kepada impak banjir berdasarkan ketumpatan bangunan dan jaringan jalan raya, yang menunjukkan kawasan berhampiran sungai-sungai utama sebagai kawasan berisiko tinggi.

Dalam Pentaksiran Kemudahterancaman Banjir (FVAs), analisis terhadap faktor fizikal, sosial, dan persekitaran memberikan pandangan mendalam tentang tahap kerentanan kawasan kajian. Kemudian, Analisis Risiko Banjir (FRAn) berjaya mengintegrasikan semua faktor untuk menghasilkan peta risiko banjir yang jelas, yang membezakan kawasan risiko dari sangat rendah hingga sangat tinggi. Akhirnya, Penganggaran Risiko Banjir (FREv) membantu memahami tahap kerosakan yang boleh berlaku dan menyediakan asas yang kuat untuk merancang strategi mitigasi yang sesuai.

Secara keseluruhannya, kajian ini menekankan kepentingan pendekatan bersepadu dalam pengurusan risiko banjir di kawasan yang sering terdedah kepada bencana alam seperti Kota Belud. Model ini membuktikan kebolehpercayaannya dan menjadi penanda aras bagi kajian masa hadapan dalam senario multi-bencana. Melalui penemuan yang mengenal pasti zon berisiko tinggi serta menekankan kepentingan kesiapsiagaan dan daya tahan komuniti, kajian ini memberi panduan langsung kepada

pihak berkepentingan untuk melaksanakan strategi mitigasi bencana dan perancangan bandar yang lebih berkesan. Selain itu, hasil kajian ini memberikan pandangan praktikal kepada pihak berkuasa tempatan dalam merangka langkah mitigasi struktur dan bukan struktur, sejajar dengan rangka kerja global seperti Rangka Kerja Sendai untuk Pengurangan Risiko Bencana. Secara keseluruhan, kajian ini bukan sahaja memperkaya pemahaman saintifik tentang impak hidrologi pasca gempa bumi tetapi juga berfungsi sebagai alat kritikal untuk melindungi komuniti di Sabah dan kawasan lain yang menghadapi risiko bencana serupa di seluruh dunia

## PENGHARGAAN

Kajian ini dibiayai oleh geran Fundamental Research Grant Scheme (FRGS-EC) yang disediakan oleh Kementerian Pendidikan Tinggi (KPT) di bawah kod projek FRGS-EC/1/2024/WAS07/UMS/02/1. Penulis ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada KPT atas sokongan kewangan yang diberikan. Selain itu, penghargaan juga ditujukan kepada Universiti Malaysia Sabah (UMS). Penulis juga ingin merakamkan penghargaan kepada para pewasit atas pandangan, saranan, dan penambahbaikan yang sangat bermakna dalam memantapkan mutu artikel ini.

## SUMBANGAN PENULIS

KS bertanggungjawab dalam analisis data, penulisan manuskrip, dan pengumpulan data lapangan. RR menyumbang dalam reka bentuk kajian, semakan manuskrip, serta memberikan bimbingan mengenai kaedah kajian dan pengesahan data.

## PENYATAAN KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis mengisytiharkan bahawa tiada konflik kepentingan berkaitan dengan penerbitan manuskrip ini.

## RUJUKAN / REFERENCES

- Ahamad, M.S.S., Ali, R., Zakaria, N.A., Ghani, A.A., & Chang, C.K., 2009. Flood loss assessment of the 2003 Muda River flood. 3<sup>rd</sup> International Conference on Managing Rivers in the 21<sup>st</sup> Century: Sustainable Solutions for Global Crisis of Flooding, Pollution and Water Scarcity. 6-9 December 2011, Penang, Malaysia. p. 601-606.
- Angkatan Pertahanan Awam Malaysia, 2017. Kejadian bencana banjir sepanjang 2017. Laporan Kementerian Sumber Asli dan Alam Sekitar, Malaysia.
- Bhuiyan, T. R., Hasan Reza, M. I., Choy, E. A., & Pereira, J. J., 2018. Direct impact of flash floods in Kuala Lumpur City: Secondary data-based analysis. ASM Science Journal, 11(3), 145–157.
- Department of Irrigation and Drainage, 2018. Hydrological Procedure HP4: Magnitude and Frequency of Flood in Malaysia. (Revised and Updated 2018). Jabatan Pengairan dan Saliran Malaysia, Kuala Lumpur. 46 p.
- Jabatan Meteorologi Malaysia, 2021. Taburan Gempa Bumi Sabah. Laporan Jabatan Meteorologi Malaysia.
- Lee Siew Len, N., Bolong, N., Roslee, R., Tongkul, F., Mirasa, A. I. K., & Lynn Ayog, J., 2018. Flood vulnerability of critical infrastructures – review. Malaysian Journal of Geosciences,

- 2(1), 34–37. <https://doi.org/10.26480/mjg.01.2018.34.37>.
- Mariappan, S., Roslee, R., & Sharir, K., 2019. Flood susceptibility analysis (FSAn) using multi-criteria evaluation (MCE) technique for landuse planning: A case from Penampang, Sabah, Malaysia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1358(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1358/1/012067>.
- Rentschler, J., & Salhab, M., 2020. People in harm's way: Flood exposure and poverty in 189 countries. (Issue October). Policy Research Working Paper 9447. <http://documents1.worldbank.org/curated/en/669141603288540994/pdf/People-in-Harms-Way-Flood-Exposure-and-Poverty-in-189-Countries.pdf>.
- Roslee, R., Termizi, A. K., Indan, E., & Tongkul, F., 2018. Earthquake vulnerability assessment (EVAs): A study of physical vulnerability assessment in Ranau area, Sabah, Malaysia. *ASM Science Journal*, 11(Special Issue 2), 66–74.
- Roslee, R., Tongkul, F., Simon, N., & Norhisham, M.N., 2017. Flood potential analysis (FPAN) using geo-spatial data in Penampang area, Sabah. *Malaysian Journal of Geosciences*, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.26480/mjg.01.2017.01.06>.
- Rosli, M.I., Mohd Kamal, N.A., & Razak, K.A., 2021. Assessing earthquake-induced debris flow risk in the first UNESCO World Heritage in Malaysia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100550. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100550>.
- Sharir, K., Rodeano, R., & Mariappan, S., 2019. Flood susceptibility analysis (FSA) using analytical hierarchy process (AHP) model at the Kg. Kolopis area, Penampang, Sabah, Malaysia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1358(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1358/1/012065>.
- Sharir, K., & Roslee, R., 2022. Flood susceptibility assessment (FSA) using GIS-based frequency ratio (FR) model in Kota Belud, Sabah, Malaysia. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 17(2), 203–208. <https://doi.org/10.18280/ij dne.170206>.
- Sharir, K., & Roslee, R., 2023a. Analisis indeks kemudahterancaman banjir secara fizikal, sosial dan persekitaran di kawasan Kota Belud, Sabah, Malaysia. *Sains Malaysiana*, 52(6), 1619–1633. <https://doi.org/10.17576/jsm-2023-5206-02>.
- Sharir, K., & Roslee, R., 2023b. Peta ketumpatan fizikal bagi menentukan unsur berisiko banjir di kawasan Kota Belud, Sabah, Malaysia. *Sains Malaysiana*, 52(7), 1939–1954. <https://doi.org/10.17576/jsm-2023-5207-04>.
- Sharir, K., Thian Lai, G., Simon, N., Khai Ern, L., Madran, E., & Roslee, R., 2022. Debris flow susceptibility analysis using a bivariate statistical analysis in the Panataran River, Kg Melangkap, Sabah, Malaysia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1103(012038). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1103/1/012038>.
- Siti Nurul Annisa, T., & Azahan, A., 2017. Bencana banjir dan tahap pengetahuan penduduk terhadap pengurusan banjir di Serian. *Malaysian Journal of Society and Space*, 13(4), 22–36.
- Tam, T.H., Ibrahim, A.L., Rahman, M.Z.A., & Mazura, Z., 2014. Flood loss assessment in the Kota Tinggi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 18(1), 6–11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012120>.
- Tongkul, F., 2017. The 2015 Ranau earthquake: Cause and impact. *Sabah Society Journal*, 32, 1–28.
- Tongkul, F., 2021. Kesiapsiagaan bencana banjir. Webinar Kesiapsiagaan Bencana, Feb. 2021. NDRC, UMS.
- Ujang, Z., 2021. Indikator dan deskripsi banjir. Kementerian Alam Sekitar Dan Air. Available at: <https://www.kasa.gov.my/>.
- Usman Kaoje, I., Abdul Rahman, M.Z., Idris, N.H., Tam, T.H., & Mohd Sallah, M.R., 2020. Physical flood vulnerability assessment of buildings in Kota Bharu, Malaysia: An indicator-based approach. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*. <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-05-2020-0046>.
- Vojtek, M., & Vojteková, J., 2016. Flood hazard and flood risk assessment at the local spatial scale: A case study. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(6), 1973–1992. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1166874>.
- Yusoff, H.H.M., Razak, K.A., Yuen, F., Harun, A., Talib, J., Mohamad, Z., Ramli, Z., & Razab, R.A., 2016. Mapping of post-event earthquake induced landslides in Sg. Mesilou using LiDAR. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 37(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/37/1/012068>.

*Manuscript received 3 October 2024;  
Received in revised form 2 December 2024;  
Accepted 13 December 2024  
Available online 30 May 2025*