

PENGITLAKAN LENGKUNG *IDF* UNTUK PERISTIWA RIBUT EKSTRIM DI SEMENANJUNG MALAYSIA

(Generalisation of IDF Curves for Extreme Storm Events in Peninsular Malaysia)

NORATIQA MOHD ARIFF, ABDUL AZIZ JEMAIN & MOHD AFTAR ABU BAKAR

ABSTRAK

Lengkung keamatan-tempoh-kekerapan (*IDF*, daripada *intensity-duration-frequency*) adalah suatu model peristiwa ribut ekstrim yang mampu merumuskan ciri statistik penting dan menggambarkan hubungan antara keamatan, tempoh dan tempoh ulangan sesuatu peristiwa ribut. Tujuan kajian ini adalah untuk mendapatkan suatu taburan serta persamaan *IDF* teritlak untuk membina lengkung *IDF* teritlak bagi sebarang stesen curahan hujan di Semenanjung Malaysia. Oleh itu, kajian ini mengenal pasti taburan kebarangkalian terbaik untuk dijadikan taburan teritlak bagi keamatan ribut maksimum tahunan untuk peristiwa ribut di Semenanjung Malaysia menggunakan kaedah momen-L. Seterusnya, dua set lengkung *IDF* dibina untuk keamatan ribut maksimum tahun di setiap stesen dengan masing-masing menggunakan taburan terbaik bagi stesen tersebut dan taburan teritlak yang dikenal pasti. Kedua-dua set lengkung *IDF* ini dibandingkan dengan data asal dan antara satu sama lain dengan menggunakan tiga indeks ketepatan padanan, iaitu peratusan pekali variasi punca min ralat kuasa dua, min peratusan perbezaan mutlak dan pekali penentuan. Berdasarkan hasil kajian ini, taburan nilai ekstrim teritlak merupakan taburan terbaik untuk dijadikan taburan teritlak bagi keamatan ribut maksimum tahunan di Semenanjung Malaysia. Selain itu, kedua-dua set lengkung *IDF* yang dibina didapati sesuai untuk menggambarkan peristiwa ribut ekstrim di Semenanjung Malaysia dan perbezaan antara kedua-dua set lengkung adalah sangat kecil. Oleh itu, pengitlakan lengkung *IDF* dengan menggunakan taburan dan persamaan yang sama bagi setiap stesen curahan hujan dapat memudahkan pembinaan lengkung *IDF* di seluruh Semenanjung Malaysia dan membantu dalam pembentukan lengkung *IDF* di kawasan yang tiada stesen curahan hujan.

Kata kunci: lengkung *IDF*; analisis peristiwa ribut; peristiwa ribut ekstrim

ABSTRACT

The intensity-duration-frequency (*IDF*) curve is a model of extreme storm events that is capable of formulating the important statistical characteristics and represent the relationship between intensity, duration and return period of a storm event. The aim of this study is to find the generalised distribution and *IDF* equation in order to build a generalised *IDF* curves for any rainfall station in Peninsular Malaysia. Therefore, this study determines the best probability distribution to be taken as the generalised distribution to represent the annual maximum storm intensity of all storm events in Peninsular Malaysia using the L-moment method. Subsequently, two sets of *IDF* curves are built for annual maximum storm intensities at each station where the first set of *IDF* curves uses the best distribution for the station and the latter uses the generalised distribution. Both sets of *IDF* curves are compared to the original data and with each other using three goodness-of-fit index which are the percentage of coefficient of variation of root mean square error, the mean percentage of difference and the coefficient of determination. Based on the results obtained, the generalised extreme value distribution is the best distribution to represent annual maximum storm intensities in Peninsular Malaysia. Furthermore, both sets of *IDF* curves built are found to be suitable to represent extreme storm events in Peninsular Malaysia and the difference between the two curves is very small. Hence, the generalised *IDF* curves which use the same distribution and *IDF* equation for all rainfall station simplify the process of building *IDF* curves for the whole

Peninsular Malaysia and therefore may assist in constructing IDF curves for places with no rainfall station.

Keywords: IDF curves; storm event analysis; extreme storm events

1. Pengenalan

Analisis peristiwa ribut (APR) merupakan suatu kaedah untuk mengekstrak maklumat daripada data curahan hujan dengan menggunakan takrifan peristiwa ribut untuk menentukan tempoh dan amaun curahan hujan bagi sesuatu peristiwa hujan. Peristiwa ribut ditakrifkan sebagai hujan yang berterusan tanpa henti lebih daripada suatu tempoh minimum. Tempoh minimum yang dikenali sebagai masa minimum antara peristiwa memisahkan dua peristiwa ribut agar kedua-dua peristiwa ribut tersebut tidak bersandar antara satu sama lain (Restrepo-Posada & Eagleson 1982). Dua ciri penting bagi sesuatu peristiwa ribut ialah amaun dan tempoh ribut. Amaun ribut merupakan jumlah hujan terkumpul manakala tempoh ribut ialah selang masa bagi sesuatu peristiwa ribut. Nisbah amaun kepada tempoh ribut ini pula dirujuk sebagai keamatan ribut.

Peristiwa ribut ekstrim, seperti banjir, lazimnya disebabkan oleh hujan yang berlebihan sehingga magnitud air daripada hujan tersebut melebihi kapasiti sistem perairan dan saluran yang sedia ada. Peristiwa ekstrim ini mengakibatkan musibah yang boleh menghilangkan nyawa dan harta serta menyebabkan kerugian besar. Oleh itu, analisis peristiwa ekstrim dijalankan ke atas data curahan hujan dan analisis ini penting agar penyelidik dapat memodelkan dan memahami ciri peristiwa ribut ekstrim.

Analisis peristiwa ekstrim boleh dilakukan sama ada menggunakan siri maksimum tahunan (AMS) (Hailegeorgis *et al.* 2013; Kim *et al.* 2009; Panthou *et al.* 2013) atau siri tempoh separa (PDS) (Mailhot *et al.* 2012; Thibaud *et al.* 2013; Zhao & Chu 2010). Kedua-dua AMS dan PDS digunakan dalam analisis hujan ekstrim termasuklah untuk analisis peristiwa ribut. Kaedah AMS mendapatkan data bagi peristiwa ribut ekstrim dengan mengumpulkan nilai maksimum pada setiap tahun. AMS sering digunakan kerana ia dapat mengekstrak data atau peristiwa ekstrim dengan mudah dan saiz sampel data boleh dikurangkan untuk memudahkan analisis. Dua jenis peristiwa ribut ekstrim yang sering dikaji ialah amaun ribut maksimum tahunan dan keamatan ribut maksimum tahunan.

Pemodelan keamatan ribut maksimum tahunan perlu memberikan anggaran keamatan ribut yang agak tepat kerana penganggaran yang kurang boleh menyebabkan kerosakan dan kehilangan yang besar manakala penganggaran yang lebih mengakibatkan perbelanjaan yang berlebihan (Ellouze & Abida 2008). Hubungan antara keamatan, tempoh masa dan tempoh ulangan keamatan ribut (anggaran selang masa antara dua ribut yang mempunyai magnitud keamatan ribut yang sama) boleh digambarkan oleh lengkung keamatan-tempoh-kekerapan (*IDF*, daripada *intensity-duration-frequency*) peristiwa ribut. Lengkung *IDF* merumuskan ciri statistik penting untuk peristiwa ribut dalam bentuk graf atau rajah (Gerold & Watkins 2005). Antara kajian terkini berkaitan lengkung *IDF* termasuklah pembentukan rumus penskalaan *IDF* serantau bagi membina rumus *IDF* di kawasan yang tiada stesen curahan hujan (Bougadis & Adamowski 2006; Yu *et al.* 2004), pembinaan lengkung *IDF* untuk siri tempoh separa (PDS) (Madsen *et al.* 2002) dan pengemaskinian lengkung *IDF* sedia ada (Madsen *et al.* 2009).

Terdapat beberapa kajian mengenai pembinaan lengkung *IDF* di Malaysia. Sebagai contoh, Amin (2003) membina lengkung *IDF* ke atas data curahan hujan di Semenanjung Malaysia. Namun begitu saiz data yang digunakan ada yang sekecil 12 tahun sahaja. Walau bagaimanapun, pembinaan lengkung *IDF* serantau ini dijalankan ke atas kawasan yang tidak homogen. Amin dan Shaaban (2004) membina lengkung *IDF* untuk stesen curahan hujan di negeri Perak dan cuba mengitlakkan lengkung *IDF* dengan menggunakan data curahan hujan

harian dan purata bagi anggaran parameter yang diperoleh daripada 12 buah stesen. Seterusnya, Amin *et al.* (2008) membina lengkung *IDF* bagi tiga buah stesen curahan hujan di Malaysia bersama-sama dengan lengkung *IDF* untuk beberapa buah negara lain di rantau Asia Pasifik. Walaupun terdapat beberapa kajian terhadap pembinaan lengkung *IDF* di Semenanjung Malaysia, kebanyakannya tidak menggunakan pendekatan APR.

Tujuan kajian ini adalah untuk mengenal pasti taburan kebarangkalian yang terbaik untuk siri amaun dan keamatan ribut maksimum tahunan di setiap stesen yang dikaji dengan menggunakan kaedah momen-L. Berdasarkan taburan-taburan ini, taburan terbaik untuk siri amaun dan keamatan ribut maksimum tahunan bagi keseluruhan Semenanjung Malaysia ditentukan agar satu taburan teritlak boleh diperoleh untuk Semenanjung Malaysia. Seterusnya, dua set lengkung *IDF* dibina untuk keamatan ribut maksimum tahunan di setiap stesen dengan masing-masing menggunakan taburan terbaik bagi setiap stesen tersebut dan taburan teritlak yang dikenal pasti.

Perbandingan antara dua set lengkung *IDF* ini dilakukan berdasarkan tiga indeks ketepatan padanan, iaitu peratusan pekali variasi punca min ralat kuasa dua (PPV_{PMRK}), min peratusan perbezaan mutlak (Δ) dan pekali penentuan (R^2) untuk melihat keupayaan taburan teritlak tersebut dalam membina lengkung *IDF* untuk semua stesen curahan hujan di Semenanjung Malaysia.

2. Momen-L dan Sampel Momen-L

Beberapa tatatanda diperkenalkan untuk memudahkan penerangan berkaitan kaedah tersebut. Huruf besar (seperti X) mewakili pemboleh ubah rawak manakala huruf kecil (seperti x) adalah nilai khusus pemboleh ubah rawak tersebut. Fungsi taburan kumulatif bagi pemboleh ubah rawak X dilambangkan sebagai $U = F_X$ dengan nilai khusus bagi U ialah $u = F_X(x)$. Nilai khusus x pula boleh didapati daripada fungsi songsang bagi fungsi taburan kumulatif U yang dikenali sebagai fungsi kuantil, Q ; iaitu $x = Q(u) = F^{-1}(u)$. Bagi pemboleh ubah rawak X dengan sampel bersaiz n , statistik tertib pemboleh ubah tersebut ditulis sebagai $X_{1:n} \leq X_{2:n} \leq \dots \leq X_{n:n}$.

Kaedah momen-L merupakan suatu kaedah alternatif untuk menerangkan ciri taburan kebarangkalian sesuatu siri. Huruf “L” dalam momen-L menegaskan bahawa momen-L, yang ditandai dengan simbol λ , ialah suatu fungsi linear jangkaan statistik tertib. Momen-L bagi pemboleh ubah rawak X ditakrifkan sebagai (Hosking 1990)

$$\lambda_h = h^{-1} \sum_{k=0}^{h-1} (-1)^k \binom{h-1}{k} E[X_{h-k:h}], \quad h = 1, 2, \dots \quad (1)$$

dengan jangkaan statistik tertib diberikan sebagai (David 1981)

$$E[X_{j:h}] = \frac{h!}{(j-1)!(h-j)!} \int x (F_X)^{j-1} (1 - F_X)^{h-j} dF_X. \quad (2)$$

Empat momen-L pertama boleh didapati seperti berikut:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= E[X] \\
 \lambda_2 &= \frac{1}{2}E[X_{2:2} - X_{1:2}] \\
 \lambda_3 &= \frac{1}{3}E[X_{3:3} - 2X_{2:3} + X_{1:3}] \\
 \lambda_4 &= \frac{1}{4}E[X_{4:4} - 3X_{3:4} + 3X_{2:4} - X_{1:4}]
 \end{aligned} \tag{3}$$

Dalam amalan umum, momen-L dianggarkan daripada sampel yang terhad dan tidak diketahui taburannya. Bagi suatu sampel yang terdiri daripada x_1, x_2, \dots, x_n dengan sampel tertibnya $x_{1:n} \leq x_{2:n} \leq \dots \leq x_{n:n}$, sampel momen-L tertib ke- h ditulis sebagai

$$l_h = h^{-1} \binom{n}{h}^{-1} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=0}^{h-1} (-1)^k \binom{h-1}{k} \binom{i-1}{h-k-1} \binom{n-i}{k} \right] x_{i:n} \tag{4}$$

untuk $h = 1, 2, \dots, n$.

Nisbah momen-L yang diperoleh dengan mendapatkan nisbah momen-L tertib tinggi terhadap skala-L (momen-L tertib kedua), mengukur bentuk taburan secara tidak bersandar kepada pengukuran skala taburan tersebut (Hosking 1990). Oleh itu, nisbah momen-L dan sampel nisbah momen-L masing-masing diberikan sebagai

$$\tau_h = \frac{\lambda_h}{\lambda_2} \quad \text{dan} \quad t_h = \frac{l_h}{l_2} \tag{5}$$

dengan tertib nisbah momen-L, iaitu $h = 3, 4$ dan sebagainya. Nisbah momen-L tertib ketiga dan keempat, iaitu τ_3 dan τ_4 masing-masing dikenali sebagai kepencongan-L dan kurtosis-L.

Rajah nisbah momen-L dibina dengan memplotkan nisbah momen-L keempat, τ_4 , terhadap nisbah momen-L ketiga, τ_3 . Taburan kebarangkalian terbaik untuk sesuatu sampel atau siri yang dikaji dapat dikenal pasti dengan senang menggunakan rajah nisbah momen-L kerana hubungan antara τ_4 dan τ_3 pelbagai jenis taburan kebarangkalian boleh diperoleh dengan mudah. Ini dilakukan dengan membandingkan plot t_4 terhadap t_3 bagi siri yang dikaji dengan plot hasil daripada hubungan τ_4 dan τ_3 pelbagai jenis taburan kebarangkalian. Taburan kebarangkalian yang memberikan plot terdekat dengan plot t_4 terhadap t_3 tersebut dipilih sebagai taburan kebarangkalian terbaik.

Bagi kajian ini, lima jenis taburan kebarangkalian yang sesuai digunakan untuk menggambarkan peristiwa ekstrim; taburan logistik teritlak (GLO), taburan nilai ekstrim teritlak (GEV), taburan Pareto teritlak (GPA), taburan lognormal 3-parameter (LN3) dan taburan Pearson jenis ke-III (PE3); diambil kira dalam menentukan taburan kebarangkalian siri amaun dan keamatan ribut maksimum tahunan.

Fungsi taburan kumulatif dan fungsi kuantil bagi kelima-lima taburan kebarangkalian yang dikaji diberikan dalam Jadual 1 manakala hubungan kepencongan-L dan kurtosis-L semua taburan ini ditunjukkan dalam Jadual 2. Siri amaun dan keamatan ribut maksimum tahunan dipadankan dengan kelima-lima taburan kebarangkalian yang dipertimbangkan dan parameter bagi setiap taburan tersebut dianggarkan.

Punca min ralat kuasa dua (PMRK) digunakan dalam perbandingan antara semua padanan taburan kebarangkalian yang diperoleh. Nilai PMRK merupakan suatu indeks ketepatan padanan yang dituliskan sebagai

$$\text{PMRK} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i:n} - z_{i:n})^2} \quad (6)$$

dengan n ialah saiz sampel atau bilangan tahun, $x_{i:n}$ ialah nilai dari siri asal yang terdiri daripada amaun atau keamatan ribut maksimum tahunan dan $z_{i:n}$ ialah nilai sepadan yang diramal dengan memadankan taburan kebarangkalian yang dianggarkan parameternya pada nilai kebarangkalian empirikal yang didapati berdasarkan rumus kedudukan memplot Gringorten.

Jadual 1: Fungsi taburan kumulatif dan fungsi kuantil bagi lima taburan kebarangkalian yang dikaji

Fungsi Taburan Kumulatif, $F(x)$	Fungsi Taburan Kuantil, $Q(u)$
GLO	
$\left\{ 1 + \left[1 - \kappa \left(\frac{x - \zeta}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{\kappa}} \right\}^{-1}$	$\zeta + \frac{\alpha}{\kappa} \left[1 - \left(\frac{1 - u}{u} \right)^{\kappa} \right]$
GEV	
eksp $\left\{ - \left[1 - \kappa \left(\frac{x - \zeta}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{\kappa}} \right\}$	$\zeta + \frac{\alpha}{\kappa} \{ 1 - [-\ln(u)]^{\kappa} \}$
GPA	
$1 - \left[1 - \kappa \left(\frac{x - \zeta}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{\kappa}}$	$\zeta + \frac{\alpha}{\kappa} [1 - (1 - u)^{\kappa}]$
LN3	
$\Phi \left[\frac{\ln(x - \xi) - \zeta}{\alpha} \right]$	$\xi + \text{eksp} [\zeta + \alpha \Phi^{-1}(u)]$
PE3	
$\frac{1}{\alpha \Gamma(\kappa)} \int_{\zeta}^x \left(\frac{x - \zeta}{\alpha} \right)^{\kappa-1} \text{eksp} \left[- \left(\frac{x - \zeta}{\alpha} \right) \right] dx$	$\zeta + \alpha \kappa + K \sqrt{\alpha^2 \kappa},$ $K = \frac{2}{\beta} \left\{ \left[\frac{\beta}{6} \left(u - \frac{\beta}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1 \right\}$

Nota: Tatatanda ζ , α , κ , ξ dan β masing-masing melambangi parameter lokasi, skala, bentuk, sempadan bawah dan kepencongan taburan tersebut. Simbol Φ , Φ^{-1} dan Γ masing-masing mewakili fungsi taburan normal piawai, fungsi taburan songsangan normal piawai dan fungsi gama.

Jain dan Singh (1986) mendakwa rumus ketepatan padanan Gringorten mengekalkan sifat saksama untuk pelbagai taburan yang berbeza. Oleh itu, rumus ini disarankan untuk membandingkan pepadanan pelbagai taburan kebarangkalian pada siri asal. Rumus untuk fungsi taburan kumulatif, F_r , bagi kedudukan memplot Gringorten diberikan seperti berikut:

$$F_r = \frac{r - 0.44}{n + 0.12} \quad (7)$$

dengan r ialah kedudukan bagi siri tertib meningkat dan n ialah saiz atau panjang siri tersebut.

Nilai PMRK yang lebih kecil menunjukkan taburan kebarangkalian yang lebih berpadanan dengan siri asal. Oleh itu, nilai PMRK yang minimum antara kelima-lima taburan kebarangkalian dianggap sebagai taburan terbaik bagi menggambarkan siri asal, nilai kedua terkecil ialah taburan kedua terbaik dan sebagainya.

Jadual 2: Hubungan antara kepencongkan-L dan kurtosis-L lima taburan kebarangkalian yang dikaji

Taburan	Hubungan kepencongkan-L, τ_3 , dan kurtosis-L, τ_4
GLO	$\tau_4 = \frac{1 + 5\tau_3^2}{6}$
GEV	$\tau_4 = 0.10701 + 0.11090\tau_3 + 0.84838\tau_3^2 - 0.06669\tau_3^3 + 0.00567\tau_3^4 - 0.04208\tau_3^5 + 0.03763\tau_3^6$
GPA	$\tau_4 = \tau_3 \frac{(1 + 5\tau_3)}{(5 + \tau_3)}$
LN3	$\tau_4 = 0.12282 + 0.77518\tau_3^2 + 0.12279\tau_3^4 - 0.13638\tau_3^6 + 0.11368\tau_3^8$
PE3	$\tau_4 = 0.1224 + 0.30115\tau_3^2 + 0.95812\tau_3^4 - 0.57488\tau_3^6 + 0.19383\tau_3^8$

3. Lengkung Keamatan-Tempoh-Kekerapan

Bagi membina lengkung *IDF* pada sesuatu stesen curahan hujan, keamatan ribut untuk peristiwa ribut bagi stesen tersebut perlu dikenal pasti dan dikumpulkan berdasarkan nilai tempoh masa ribut. Keamatan ribut maksimum tahunan bagi setiap kumpulan ribut tersebut kemudian diperoleh dengan mengambil nilai maksimum bagi keamatan ribut setiap tahun. Seterusnya, keamatan ribut maksimum tahunan ini dipadankan terhadap taburan kebarangkalian untuk mendapatkan parameter bagi taburan setiap kumpulan ribut.

Bagi setiap taburan kebarangkalian, F , pada suatu tempoh masa ribut d dan suatu tempoh ulangan T , keamatan ribut i boleh didapati dengan

$$i = F_d^{-1} \left(1 - \frac{1}{T} \right). \quad (8)$$

Oleh itu, set nilai (i, d, T) boleh diperoleh untuk beberapa nilai d dan T yang dikaji. Set (i, d, T) ini digunakan dalam persamaan lengkung *IDF* yang diberikan sebagai (Koutsoyiannis et al. 1998)

$$i = \frac{g(T)}{(b + d)^c} \quad (9)$$

dengan b dan c ialah pemalar serta $g(T)$ ialah suatu fungsi tempoh ulangan T yang terdiri daripada fungsi kuantil taburan kebarangkalian yang dipertimbangkan. Kaedah kuasa dua terkecil digunakan ke atas persamaan (9) dengan set nilai (i, d, T) yang ada untuk menganggarkan nilai pemalar dalam persamaan tersebut. Dengan anggaran nilai pemalar ini, rumus persamaan lengkung *IDF* untuk stesen curahan hujan yang dikaji diperoleh dan lengkung *IDF* untuk stesen tersebut boleh dibina.

4. Indeks Ketepatan Padanan

Dua set lengkung *IDF* dibina untuk 45 buah stesen curahan hujan di Semenanjung Malaysia. Bagi set lengkung *IDF* yang pertama, siri keamatan ribut maksimum tahunan setiap kumpulan ribut dengan tempoh masa d tertentu dipadankan dengan kelima-lima taburan kebarangkalian yang dikaji. Taburan dengan nilai PMRK yang terkecil digunakan sebagai taburan kebarangkalian terbaik bagi keamatan ribut maksimum tahunan kumpulan ribut tersebut dan fungsi taburan kumulatifnya digunakan dalam mendapatkan set nilai (i, d, T) . Fungsi kuantil taburan yang terbaik untuk keamatan ribut maksimum tahunan stesen yang dikaji, digunakan dalam kaedah kuasa dua terkecil untuk mendapatkan persamaan lengkung *IDF* untuk stesen tersebut.

Bagi set lengkung *IDF* kedua, taburan terbaik bagi setiap siri keamatan ribut maksimum tahunan dengan tempoh masa berlainan diitlakkan kepada suatu taburan kebarangkalian yang dianggap sesuai untuk menggambarkan keamatan ribut maksimum tahunan di seluruh Semenanjung Malaysia. Persamaan lengkung *IDF* juga diitlakkan kepada persamaan yang menggunakan fungsi kuantil taburan teritlak tersebut. Ini adalah supaya satu persamaan *IDF* yang mudah dan sesuai untuk peristiwa ribut ekstrim di Semenanjung Malaysia boleh digunakan oleh penyelidik dalam kajian hujan ekstrim di masa akan datang.

Analisis perbezaan antara lengkung *IDF* diperhatikan berdasarkan pengiraan tiga indeks ketepatan padanan, iaitu peratusan pekali variasi punca min ralat kuasa dua (PPV_{PMRK}), min peratusan perbezaan mutlak (Δ) dan pekali penentuan (R^2). Bagi memudahkan penjelasan berkenaan ketiga-tiga jenis indeks pengukuran ini, beberapa tatatanda diperkenalkan. Tatatanda N_d dan N_T masing-masing merujuk kepada bilangan bagi nilai tempoh masa ribut dan tempoh ulangan yang diambil kira dalam analisis. Siri X dan Z masing-masing merujuk kepada set lengkung *IDF* yang pertama dan kedua. Nilai $x_{d,T}$ merupakan nilai keamatan ribut pada tempoh masa d dan tempoh ulangan T daripada set lengkung *IDF* yang pertama. Manakala, nilai $z_{d,T}$ merujuk kepada nilai keamatan ribut pada tempoh masa d dan tempoh ulangan T daripada set lengkung *IDF* yang kedua. Notasi \bar{x} ialah purata bagi nilai pada siri X dan dikira sebagai

$$\bar{x} = \frac{1}{N_d N_T} \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{T=1}^{N_T} x_{d,T}. \quad (10)$$

Peratusan pekali variasi punca min ralat kuasa dua, PPV_{PMRK} , boleh didapati seperti berikut:

$$PPV_{PMRK} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N_d N_T} \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{T=1}^{N_T} (x_{d,T} - z_{d,T})^2}}{\bar{x}} \times 100\%. \quad (11)$$

Nilai PPV_{PMRK} menunjukkan peratus bagi punca min ralat kuasa dua antara siri X dan Z yang diseragamkan terhadap min siri X .

Min peratusan perbezaan mutlak, Δ , memberikan perbezaan mutlak antara nilai siri X dan nilai siri Z berdasarkan nilai dari siri X . Nilai Δ diperoleh seperti berikut:

$$\Delta = \frac{1}{N_d N_T} \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{T=1}^{N_T} \frac{|x_{d,T} - z_{d,T}|}{x_{d,T}} \times 100\% \quad (12)$$

Pekali penentuan, R^2 , menggambarkan hubungan antara nilai daripada siri X dan Z . Nilai R^2 menunjukkan peratus variasi pada siri Z yang boleh dijelaskan dan dikenal pasti oleh variasi pada siri X . Nilai R^2 ini diberikan sebagai

$$R^2 = \frac{\sum_{d=1}^{N_d} \sum_{T=1}^{N_T} (z_{d,T} - \bar{z})^2 - \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{T=1}^{N_T} (z_{d,T} - \hat{z}_{d,T})^2}{\sum_{d=1}^{N_d} \sum_{T=1}^{N_T} (z_{d,T} - \bar{z})^2} \times 100\% \quad (13)$$

dengan $\hat{z} = \beta_1 + \beta_2 x$ yang β_1 dan β_2 dianggarkan melalui analisis regresi bagi siri Z terhadap siri X . Nilai purata bagi siri Z dikira sama seperti nilai purata bagi siri X (persamaan 10), iaitu

$$\bar{z} = \frac{1}{N_d N_T} \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{T=1}^{N_T} z_{d,T}.$$

Bagi pengiraan PPV_{PMRK} dan Δ , nilai indeks yang lebih kecil menunjukkan perbezaan yang lebih kecil. Sebaliknya, bagi pengiraan R^2 , nilai yang lebih besar menunjukkan kedua-dua set lengkung adalah lebih serupa.

Selain itu, ketiga-tiga indeks ketepatan padanan turut digunakan untuk membandingkan nilai keamatan ribut yang diperoleh daripada setiap set lengkung dengan nilai keamatan ribut yang digunakan dalam kaedah kuasa dua terkecil persamaan *IDF* setiap set lengkung tersebut. Ini adalah untuk memastikan persamaan *IDF* yang digunakan adalah sesuai untuk dijadikan persamaan *IDF* bagi peristiwa ribut di Semenanjung Malaysia.

5. Pengitlakan Lengkung *IDF* di Semenanjung Malaysia

Siri amaun dan keamatan ribut maksimum tahunan bagi setiap stesen curahan hujan dipadankan dengan kelima-lima taburan kebarangkalian; GLO, GEV, GPA, LN3 dan PE3. Nilai PMRK bagi kelima-lima taburan ini dikira untuk kedua-dua siri tersebut di setiap stesen. Bagi setiap taburan ini, bilangan stesen curahan hujan yang mempunyai taburan tersebut sebagai taburan terbaik dan kedua terbaik untuk siri amaun dan keamatan ribut maksimum tahunan dikenal pasti.

Bagi memudahkan penulisan, n_1 merujuk kepada bilangan stesen yang mempunyai taburan tertentu sebagai taburan terbaik bagi amaun ribut maksimum tahunan, n_2 ialah bilangan stesen yang mempunyai taburan tersebut sebagai taburan kedua terbaik bagi siri amaun ribut maksimum tahunan manakala n_3 dan n_4 masing-masing mewakili bilangan kali taburan tersebut menjadi taburan terbaik dan kedua terbaik untuk siri keamatan ribut maksimum tahunan. Dua nilai skor digunakan untuk menentukan taburan yang paling sesuai untuk dijadikan taburan umum bagi siri amaun dan keamatan ribut untuk keseluruhan Semenanjung Malaysia, iaitu

$$\text{Skor 1} = 2n_1 + n_2 + 2n_3 + n_4. \quad (14)$$

dan

$$\text{Skor 2} = 2n_1 + n_2 + 4n_3 + 3n_4. \quad (15)$$

Skor kedua memberi penekanan dan keutamaan kepada taburan terbaik dan kedua terbaik untuk siri keamatan ribut maksimum tahunan. Nilai Skor 1 dan Skor 2 bagi setiap taburan tersebut diberikan dalam Jadual 3.

Jadual 3: Bilangan stesen yang mempunyai taburan GLO, GEV, GPA, LN3 dan PE3 sebagai taburan terbaik, n_1 dan n_3 ; dan sebagai taburan kedua terbaik, n_2 dan n_4 ; masing-masing untuk amaun dan keamatan ribut maksimum tahunan serta Skor 1 dan Skor 2 setiap taburan tersebut.

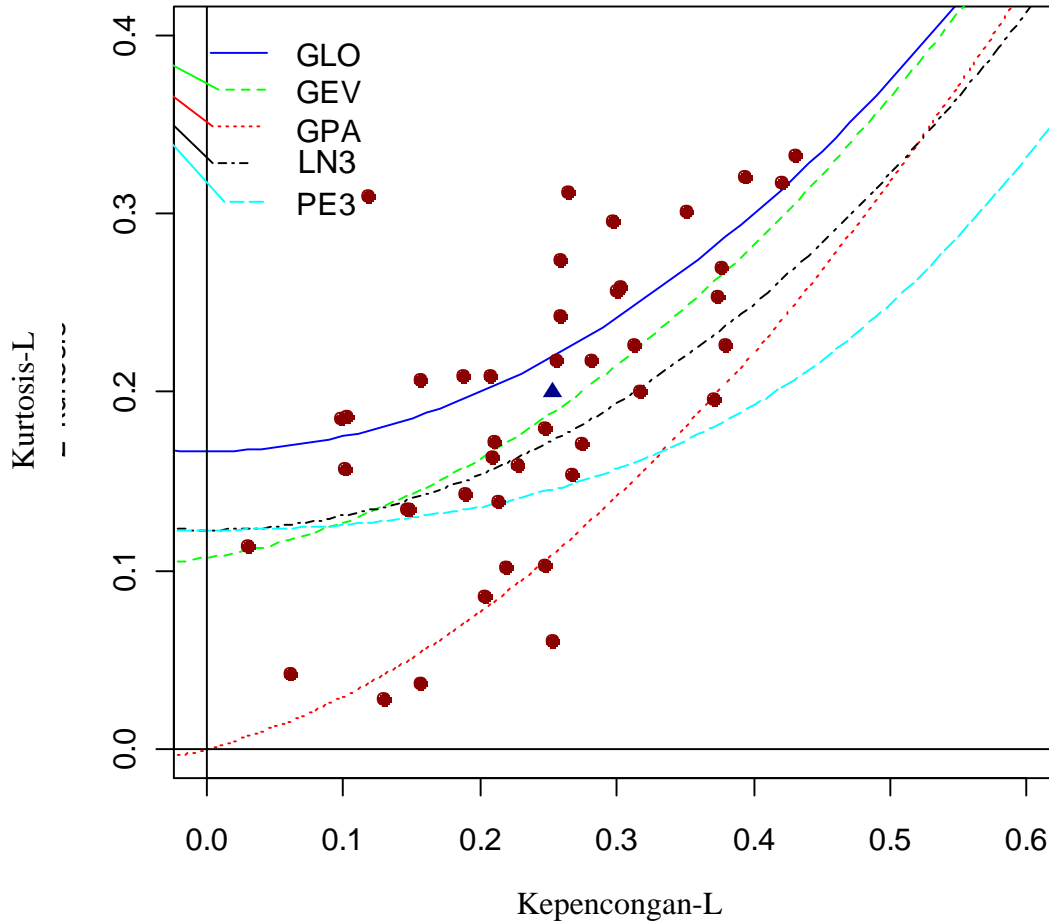
Taburan	Amaun Maksimum Tahunan		Keamatan Maksimum Tahunan		Skor	
	n_1	n_2	n_3	n_4	1	2
GLO	18	3	14	1	68	98
GEV	9	18	9	16	70	120
GPA	8	2	9	2	38	60
LN3	5	13	2	14	41	73
PE3	5	9	11	12	53	99

Berdasarkan Jadual 3, bilangan stesen curahan hujan yang menunjukkan taburan logistik teritlak (GLO) sebagai taburan terbaik bagi siri amaun dan keamatan ribut maksimum tahunan adalah bilangan yang paling banyak berbanding dengan taburan lain, iaitu sebanyak 18 buah stesen untuk amaun ribut maksimum tahunan dan 14 buah stesen untuk keamatan ribut maksimum tahunan. Namun begitu, bilangan stesen yang mempunyai taburan GLO sebagai taburan kedua terbaik adalah paling sedikit dengan hanya tiga buah stesen untuk amaun maksimum tahunan dan sebuah stesen untuk keamatan maksimum tahunan. Ini bermakna, jika taburan GLO tidak dapat menggambarkan siri asal dengan sangat baik, maka taburan kebarangkalian ini akan memberikan padanan yang kurang memuaskan berbanding empat taburan kebarangkalian yang lain.

Taburan GEV menunjukkan jumlah tertinggi bagi bilangan stesen yang mempunyai taburan tersebut sebagai taburan terbaik atau kedua terbaik bagi pemadanan siri amaun dan keamatan ribut maksimum tahunan, iaitu masing-masing sebanyak 27 dan 25 buah stesen curahan hujan. Selain itu, taburan GEV juga mencatatkan nilai tertinggi bagi Skor 1 dan Skor 2 berbanding taburan lain, iaitu masing-masing sebanyak 70 dan 120. Oleh itu, taburan GEV dianggap sesuai dijadikan taburan kebarangkalian umum bagi menggambarkan kedua-dua siri tersebut yang merupakan siri peristiwa ribut ekstrim untuk keseluruhan Semenanjung Malaysia seperti yang disarankan oleh Amin (2003). Secara langsung, taburan GEV juga dianggap sebagai satu taburan yang baik untuk dijadikan taburan teritlak dalam pembinaan lengkung IDF bagi keseluruhan Semenanjung Malaysia. Rajah nisbah momen-L bagi amaun dan keamatan ribut maksimum tahunan untuk semua stesen curahan hujan yang dikaji masing-masing diberikan dalam Rajah 1 dan 2.

Bagi tujuan menentukan kesesuaian penggunaan kedua-dua set lengkung yang dikaji dalam menggambarkan peristiwa rebut ekstrim di Semenanjung Malaysia, nilai PPV_{PMRK} , Δ dan R^2 dalam analisis perbezaan dikira. Ketiga-tiga nilai ini didapati dengan mengkaji ralat antara nilai keamatan ribut i dengan tempoh masa ribut d dan tempoh ulangan T yang

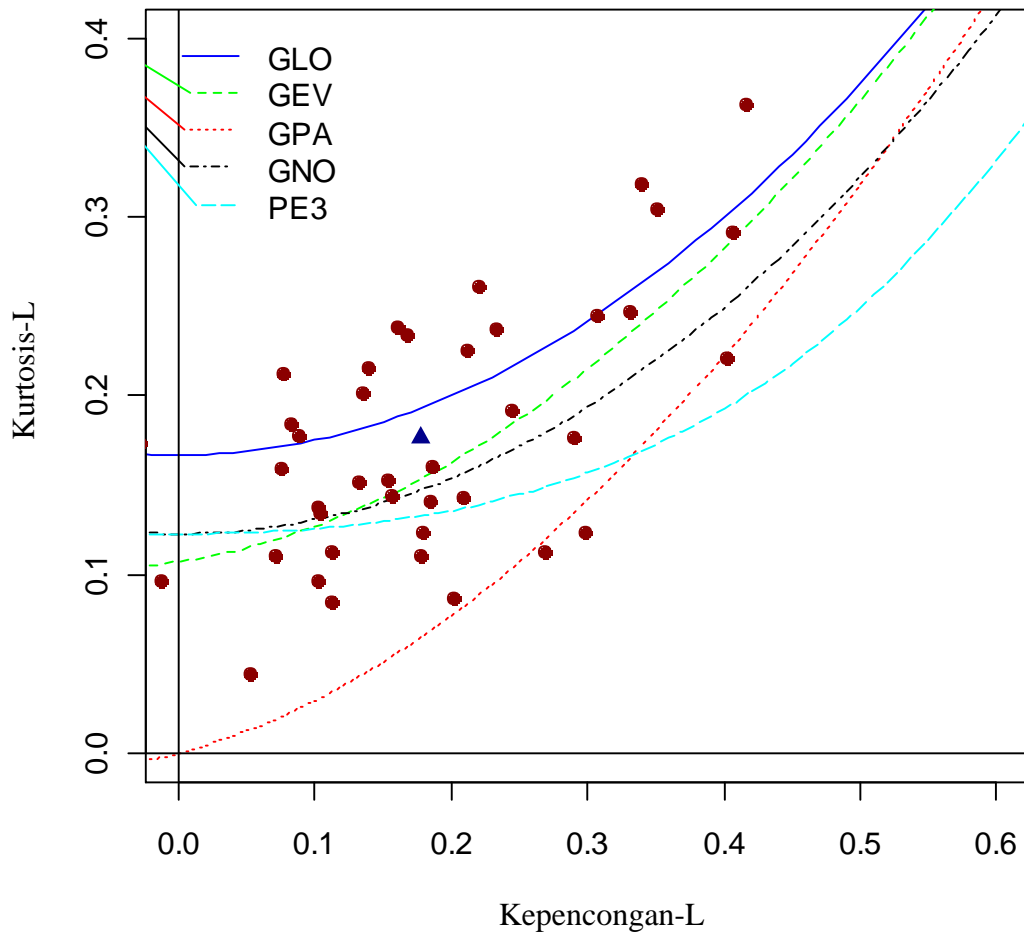
diperoleh daripada setiap set lengkung *IDF* dan nilai *i* daripada data asal dengan *d* dan *T* yang sama.



Rajah 1: Rajah nisbah momen-L untuk amaun ribut maksimum tahunan

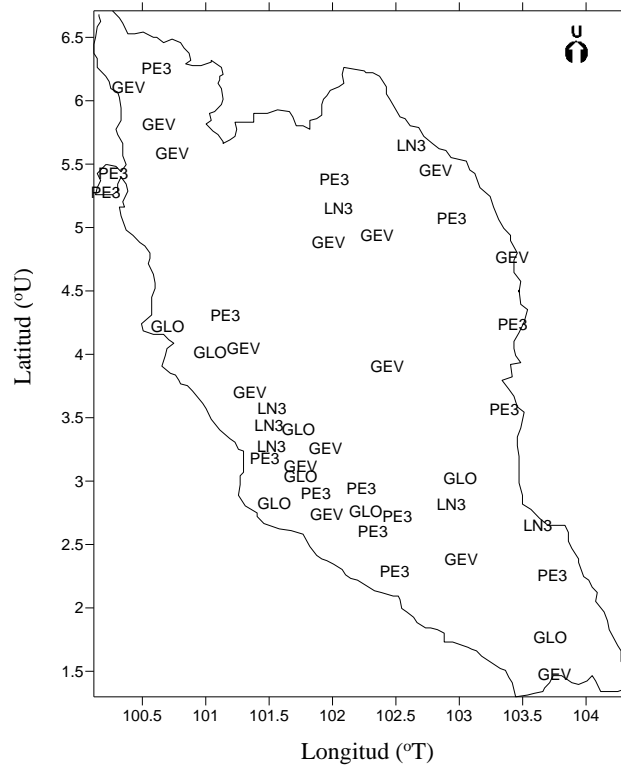
Set lengkung *IDF* yang pertama menggunakan fungsi kuantil taburan kebarangkalian terbaik bagi semua siri keamatan ribut maksimum tahunan dengan tempoh masa ribut tertentu dalam persamaan *IDF* set lengkung tersebut. Kaedah momen-L dan lima taburan kebarangkalian, iaitu GLO, GEV, GPA, LN3 dan PE3 digunakan untuk menentukan taburan kebarangkalian terbaik di setiap stesen curahan hujan per jam yang dikaji. Taburan kebarangkalian terbaik bagi semua keamatan ribut maksimum tahunan dengan tempoh masa ribut tertentu untuk 45 buah stesen curahan hujan di Semenanjung Malaysia diberikan dalam Rajah 3.

Stesen curahan hujan dengan taburan GEV atau PE3 sebagai taburan kebarangkalian terbaik menunjukkan bilangan yang paling banyak. Set lengkung yang kedua menggunakan fungsi kuantil taburan GEV dalam persamaan *IDF*-nya untuk semua stesen curahan hujan yang dikaji. Semua parameter yang dianggarkan untuk persamaan *IDF* yang kedua bagi keseluruhan Semenanjung Malaysia masing-masing ditunjukkan dalam bentuk peta kontur dalam Rajah 4. Anggaran nilai parameter *c* adalah satu untuk semua stesen curahan hujan yang dikaji.



Rajah 2: Rajah nisbah momen-L untuk keamatan ribut maksimum tahunan

Ketiga-tiga indeks ketepatan padanan bagi ralat nilai $\hat{\xi}$ yang diperolehi daripada kedua-dua set lengkung *IDF* dengan nilai $\hat{\xi}$ yang didapati daripada data asal menunjukkan bahawa kedua-dua set lengkung tersebut adalah sesuai untuk mewakili hubungan antara keamatan, tempoh masa dan tempoh ulangan peristiwa ribut di Semenanjung Malaysia. Nilai PPV_{PMRK} adalah kecil dengan purata PPV_{PMRK} adalah kurang daripada 25 peratus dan purata Δ adalah sederhana, iaitu kurang daripada 30 peratus untuk kedua-dua set lengkung *IDF*. Ini bermakna ralat yang terhasil daripada kedua-dua set lengkung *IDF* ini adalah kurang daripada separuh nilai min dan nilai asal keamatan ribut yang digunakan untuk mendapatkan persamaan *IDF* lengkung tersebut. Nilai R^2 yang mencatatkan purata lebih kurang 90 peratus pula menunjukkan bahawa sebahagian besar variasi pada nilai yang diperolehi daripada lengkung *IDF* boleh dijelaskan oleh variasi nilai asal yang digunakan. Nilai bagi ketiga-tiga indeks ketepatan padanan ini menunjukkan set lengkung kedua adalah lebih baik walaupun nilai-nilainya adalah lebih kurang sama dan tidak banyak berbeza. Purata bagi ketiga-tiga indeks ketepatan padanan ini diberikan dalam Jadual 4.



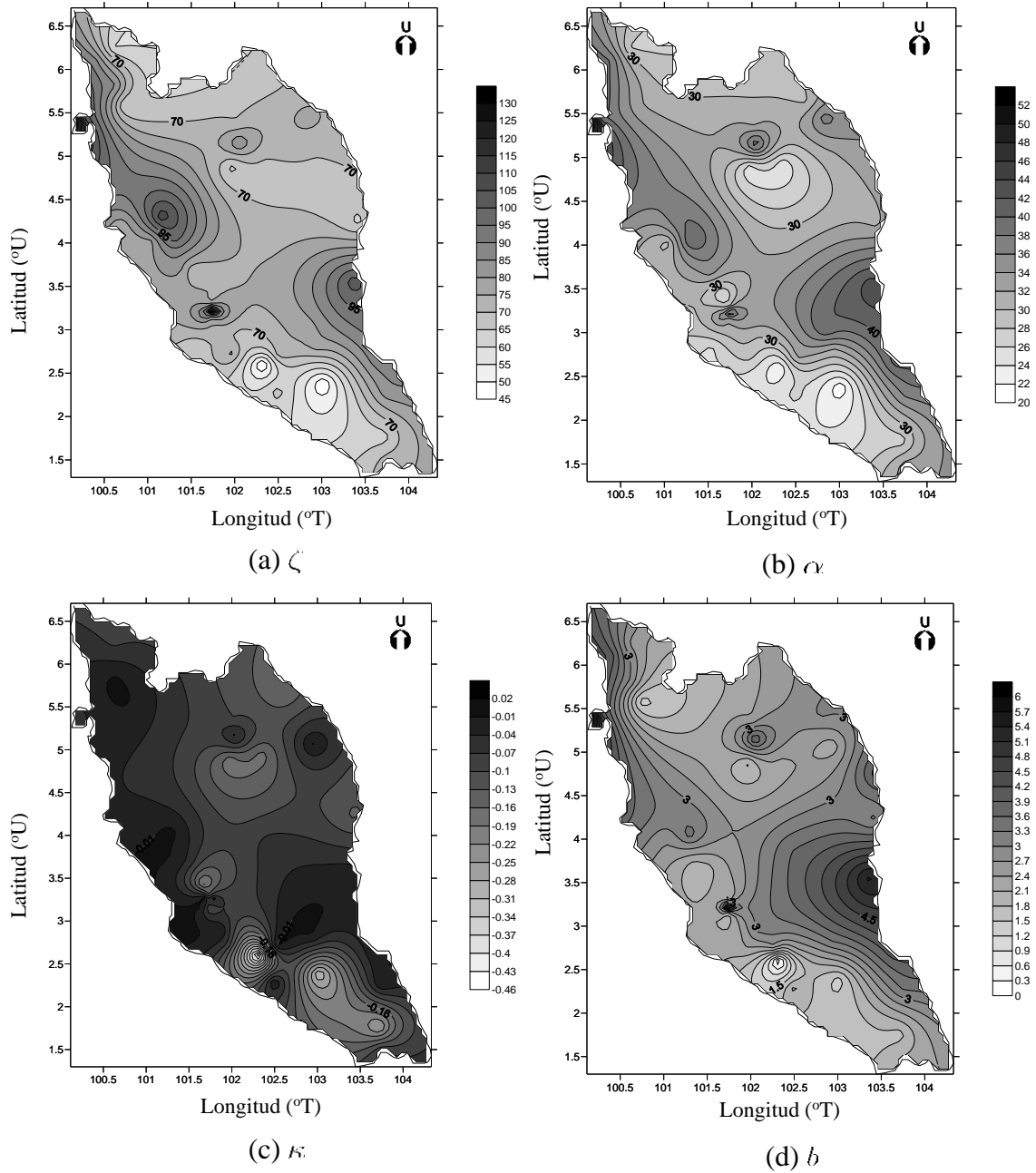
Rajah 3: Taburan kebarangkalian terbaik bagi semua siri keamatan ribut maksimum tahunan dengan tempoh masa ribut tertentu di stesen curahan hujan di Semenanjung Malaysia

Jadual 4: Purata indeks ketepatan padanan bagi ralat nilai keamatan ribut yang diperolehi daripada set lengkung *IDF* dan nilai asal (%)

Indeks	Set 1	Set 2
PPV_{PMRK}	20.4698	18.7285
Δ	27.5165	26.2365
R^2	91.1991	92.9735

Perbezaan antara set lengkung *IDF* adalah kecil dengan nilai bagi kedua-dua PPV_{PMRK} dan Δ adalah sangat kecil. Purata kedua-dua indeks bagi keseluruhan Semenanjung Malaysia adalah kurang daripada 10 peratus manakala nilai R^2 adalah lebih besar daripada 99 peratus. Ini menunjukkan bahawa kedua-dua set lengkung yang dikaji adalah sangat serupa antara satu sama lain. Purata ketiga-tiga indeks ini diberikan dalam Jadual 5. Graf bagi kedua-dua set lengkung *IDF* untuk peristiwa ribut ekstrim di beberapa buah stesen curahan hujan di Semenanjung Malaysia diberikan dalam Rajah 5.

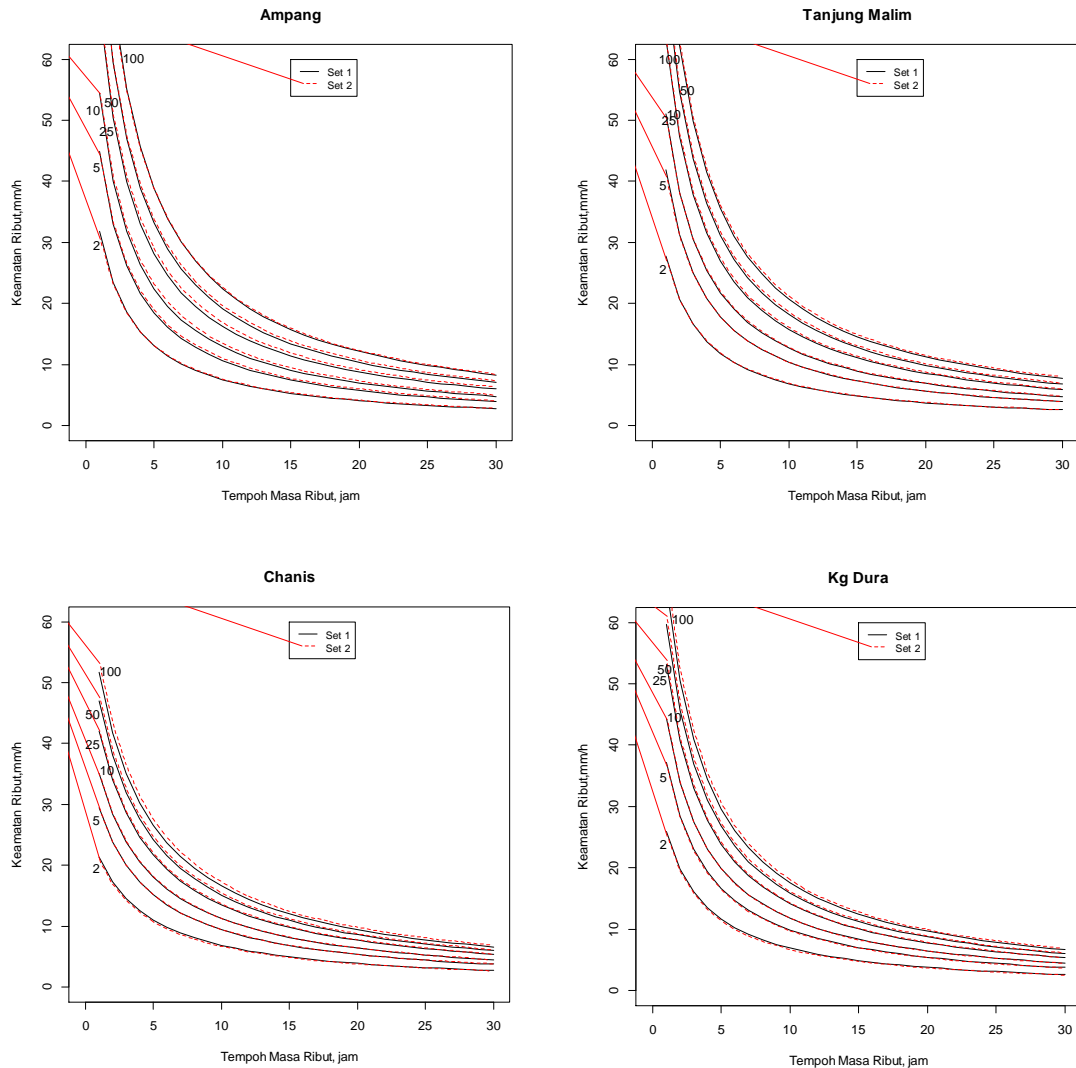
Pengitlakan lengkung IDF untuk peristiwa ribut ekstrim di Semenanjung Malaysia



Rajah 4: Peta kontur anggaran parameter bagi persamaan IDF untuk set lengkung IDF yang kedua

Jadual 5: Purata indeks ketepatan padanan bagi perbandingan antara dua set lengkung IDF (%)

Indeks	Set 1 dan Set 2
PPV _{PMRK}	7.6176
Δ	4.5945
R^2	99.2617



Nota: Angka di hujung setiap lengkung ialah nilai T bagi lengkung tersebut.

Rajah 5: Dua set lengkung *IDF* dalam proses pengitlakan untuk beberapa buah stesen curahan hujan di Semenanjung Malaysia

6. Rumusan

Siri maksimum tahunan untuk peristiwa ribut terdiri daripada siri amaun dan siri keamatan ribut maksimum tahunan. Taburan GEV dianggap sesuai untuk dijadikan taburan umum bagi siri amaun dan keamatan ribut maksimum tahunan di Semenanjung Malaysia kerana taburan GEV menunjukkan jumlah bilangan stesen terbanyak dalam pepadanan terbaik atau kedua terbaik terhadap kedua-dua siri tersebut.

Pembinaan lengkung *IDF* merumuskan ciri statistik peristiwa ribut ekstrim dalam bentuk rajah. Dua set lengkung *IDF* dibina untuk 45 buah stesen curahan hujan yang dipertimbangkan dalam kajian ini yang mana set lengkung *IDF* yang pertama menggunakan taburan terbaik bagi setiap stesen untuk menggambarkan keamatan ribut maksimum tahunan

dan mendapatkan persamaan *IDF* di setiap stesen tersebut. Manakala, set lengkung *IDF* kedua menggunakan taburan GEV sebagai taburan teritlak bagi keamatan ribut maksimum tahunan dan seterusnya digunakan dalam mendapatkan satu persamaan *IDF* teritlak bagi pembinaan lengkung *IDF* di semua stesen curahan hujan di Semenanjung Malaysia. Kedua-dua set lengkung *IDF* yang diperoleh didapati memberikan perbezaan yang kecil dari segi pengiraan tiga indeks ketepatan padanan apabila dibandingkan dengan data asal. Oleh itu, kedua-duanya adalah sesuai dijadikan model bagi hubungan keamatan, tempoh dan tempoh ulangan ribut ekstrim di Semenanjung Malaysia. Perbezaan yang kecil antara kedua-dua set lengkung *IDF* juga menunjukkan keupayaan lengkung *IDF* teritlak dalam membentuk lengkung *IDF* yang sesuai untuk semua stesen curahan hujan di Semenanjung Malaysia.

Dengan keputusan kajian ini, diharapkan penyelidik dapat menggunakan persamaan lengkung yang sesuai untuk kajian mereka dengan yakin memandangkan Semenanjung Malaysia tidak mempunyai suatu persamaan *IDF* yang khas digunakan secara umum dalam kajian sebelum ini. Set lengkung yang menggunakan persamaan *IDF* yang seragam bagi semua stesen curahan hujan seperti set lengkung kedua boleh membantu dalam pembinaan lengkung *IDF* di kawasan yang tidak mempunyai stesen curahan hujan kerana parameter persamaan *IDF* boleh dianggarkan menggunakan analisis reruang seperti pembentukan peta kontur yang ditunjukkan dalam Rajah 4.

Penghargaan

Penulis ingin merakamkan setinggi-tinggi terima kasih kepada Jabatan Pengairan dan Saliran (JPS) Malaysia kerana menyumbangkan data hujan setiap jam yang digunakan dalam kajian ini. Selain itu, ucapan penghargaan yang tidak terhingga juga kepada Kementerian Pendidikan Malaysia (KPM) untuk geran penyelidikan FRGS/1/2014/SG04/UKM/03/2, dan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) untuk prasarana yang digunakan bagi kajian ini.

Rujukan

- Amin M.Z.M. 2003. Design rainstorm of Peninsular Malaysia: Regional frequency analysis approach. *Watershed Hydrology* **6**: 432-447.
- Amin M.Z.M., Desa M.N.M. & Daud Z.M. 2008. Malaysia. Dlm. Trevor M.D. & Guillermo Q.T. (pnyt.). *Asian Pacific FRIEND Rainfall Intensity Duration Frequency (IDF) Analysis for the Asia Pacific Region 2*, hlm. 53-57. Jakarta: Regional Steering Committee for Southeast Asia and the Pacific UNESCO Office.
- Amin M.Z.M. & Shaaban A.J. 2004. The rainfall intensity-duration-frequency (IDF) relationship for ungauged sites in Peninsular Malaysia using a mathematical formulation. *1st. International Conference on Managing Rivers in the 21st Century*, 2004, hlm. 251-258.
- Bougadis J. & Adamowski K. 2006. Scaling model of a rainfall intensity-duration-frequency relationship. *Hydrological Processes* **20**(17): 3747-3757.
- David H.A. 1981. *Order Statistics*. Ed. ke-2. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Ellouze M. & Abida H. 2008. Regional flood frequency analysis in Tunisia: identification of regional distributions. *Water Resources Management* **22**(8): 943-957.
- Gerold L.A. & Watkins D.W. 2005. Short duration rainfall frequency analysis in Michigan using scale-invariance assumptions. *Journal of Hydrologic Engineering* **10**(6): 450-457.
- Hailegeorgis T.T., Thorolfsson S.T. & Alfredsen K. 2013. Regional frequency analysis of extreme precipitation with consideration of uncertainties to update IDF curves for the city of Trondheim. *Journal of Hydrology* **498**: 305-318.
- Hosking J.R.M. 1990. L-Moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*: 105-124.
- Jain D. & Singh V.P. 1986. A comparison of transformation methods for flood frequency analysis. *Water Resources Bulletin* **22**(6): 903-912.
- Kim C., Suh M.S. & Hong K.O. 2009. Bayesian changepoint analysis of the annual maximum of daily and subdaily precipitation over South Korea. *Journal of Climate* **22**(24): 6741-6757.

- Koutsoyiannis D., Kozonis D. & Manetas A. 1998. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology* **206**(1-2): 118-135.
- Madsen H., Arnbjerg-Nielsen K. & Mikkelsen P.S. 2009. Update of regional intensity-duration-frequency curves in Denmark: Tendency towards increased storm intensities. *Atmospheric Research* **92**(3): 343-349.
- Madsen H., Mikkelsen P.S., Rosbjerg D. & Harremoës P. 2002. Regional estimation of rainfall intensity-duration-frequency curves using generalized least squares regression of partial duration series statistics. *Water Resources Research* **38**(11): 1239.
- Mailhot A., Lachance-Cloutier S., Talbot G. & Favre A-C. 2012. Regional estimates of intense rainfall based on the Peak-Over-Threshold (POT) approach. *Journal of Hydrology* **476**: 188-199.
- Panthou G., Vischel T., Lebel T., Quantin G., Favre Pugin A-C., Blanchet J. & Ali A. 2013. From pointwise testing to a regional vision: an integrated statistical approach to detect non stationarity in extreme daily rainfall. Application to the Sahelian region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **118**(15): 8222-8237.
- Restrepo-Posada P.J. & Eagleson P.S. 1982. Identification of independent rainstorms. *Journal of Hydrology* **55**(1-4): 303-319.
- Thibaud E., Mutzner R. & Davison A.C. 2013. Threshold modeling of extreme spatial rainfall. *Water Resources Research* **49**(8): 4633-4644
- Yu P.S., Yang T.C. & Lin C.S. 2004. Regional rainfall intensity formulas based on scaling property of rainfall. *Journal of Hydrology* **295**(1): 108-123.
- Zhao X. & Chu P.S. 2010. Bayesian changepoint analysis for extreme events (typhoons, heavy rainfall, and heat waves): An RJMCMC approach. *Journal of Climate* **23**(5): 1034-1046.

*Pusat Pengajian Sains Matematik
Fakulti Sains dan Teknologi
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi
Selangor DE, MALAYSIA
Mel-e: tqah@ukm.edu.my*, azizj@ukm.edu.my, aftar@ukm.edu.my*

*Penulis untuk dihubungi