

Aplikasi Sistem Maklumat Geografi (GIS) dan Analisis Diskriminan dalam Pemodelan Kejadian Kegagalan Cerun di Pulau Pinang, Malaysia (Application of Geographical Information Systems (GIS) and Discriminant Analysis in Modelling Slope Failure Incidence in Pulau Pinang, Malaysia)

NURIAH ABD MAJID* & RUSLAN RAINIS

ABSTRAK

Kegagalan cerun merupakan suatu fenomena disebabkan hujan yang sering berlaku di kawasan tropika seperti Malaysia. Kajian ini menghuraikan penggunaan Sistem Maklumat Geografi (GIS) dan Analisis Diskriminan untuk memodelkan ciri-ciri fizikal kegagalan cerun serta hubungan kait statistik kejadian kegagalan cerun dengan parameter fizikal yang menyumbang kepada kejadian kegagalan cerun di Pulau Pinang. Analisis diskriminan adalah satu kaedah analisis yang boleh digunakan untuk mendiskriminasikan sesuatu kumpulan kegagalan cerun berdasarkan parameter tertentu. Tujuan utama analisis ini dijalankan adalah bagi memahami faktor yang mempengaruhi perbezaan antara kumpulan kegagalan cerun dan cerun stabil (tiada kegagalan cerun), seterusnya membuat ramalan tentang kemungkinan terjadi sesuatu kegagalan cerun. Oleh yang demikian, satu kombinasi linear pemboleh ubah bebas telah dibentuk dan digunakan sebagai asas dalam mengelaskan kes kegagalan cerun tertentu. Kajian ini menggunakan sepuluh pemboleh ubah iaitu jarak ke jalan, purata hujan tahunan, litologi batuan, ketinggian topografi, kecuraman cerun, siri tanah, aspek cerun, jarak ke sungai, jenis guna tanah dan lineamen. Model yang terhasil didapati berjaya meramal 92.5% daripada kejadian kegagalan cerun sebenar. Model yang dibentuk kemudiannya telah dinilai menggunakan 30% daripada sampel kejadian sebenar dan menghasilkan ketepatan sebanyak 91.24%.

Kata kunci: Analisis Diskriminan; kegagalan cerun; pemodelan ruangan; Pulau Pinang; Sistem Maklumat Geografi

ABSTRACT

Slope failure is a phenomenon due to frequent rainfall that occurs in tropical areas such as Malaysia. This paper describes the use of Geographical Information Systems (GIS) and Discriminant Analysis to model the physical features of slope failure and the statistical association between slope failure events with physical parameters that contribute to the incidence of slope failure in Pulau Pinang. Discriminant analysis is an analysis method that can be used to discriminate against a set of slope failures based on certain criteria. The main purpose of this analysis were to understand the factors that affect the difference between the group of slope failure and subsequently making predictions about a possible slope failure. Therefore, a linear combination of independent variables has been formed and used as a basis for classifying certain slope failure cases. The study used ten variables: distance to the road, average annual rainfall, lithology, topography height, slope gradient, soil series, slope aspect, distance to river, landuse type and lineament. The resulting model was able to predict 92.5% of actual slope failure events. The model was validated using 30% of the actual incident samples and found 91.24% accuracy.

Keywords: Discriminant Analysis; Geographical Information System; Pulau Pinang; slope failure; spatial modeling

Pengenalan

Kegagalan cerun sering melanda banyak negara lazimnya berada di kawasan yang berbukit, kawasan yang terdedah dengan pelbagai unsur alam sekitar yang menyebabkan pelbagai bencana alam seperti kegagalan cerun. Pelbagai aktiviti manusia seperti pelancongan, pembangunan, perhutanan dan pembalakan telah meningkatkan bencana kejadian kegagalan cerun. Kegagalan cerun adalah antara bahaya geologi yang merosakkan alam sekitar dan menimbulkan ancaman kepada keselamatan manusia, alam sekitar, sumber dan harta (Aleotti & Chowdhury 1999; Kanungo et al. 2006; Yesilnacar & Topal 2005). Aktiviti manusia seperti penebangan hutan dan perkembangan

bandar telah mempercepatkan proses kegagalan cerun (Chung et al. 1995). Aktiviti ini boleh memberi kesan kepada proses hakisan dan pemendapan, seterusnya kesan buruk kepada habitat. Tjia (1987) mentakrifkan kegagalan cerun sebagai pergerakan jisim tanah dan puing batuan yang besar menuruni bukit akibat tindakan graviti. Kegagalan cerun melibatkan jisim bahan besar berlaku dengan pantas menyebabkan kerosakan besar yang boleh berlaku terhadap harta benda dan nyawa. Kebimbangan mengenai kegagalan cerun memerlukan amalan pengurusan yang baik dalam membangunkan semua kawasan berbukit yang melibatkan aktiviti manusia. Kejadian berisiko tinggi yang berlaku secara meluas telah menarik perhatian ramai saintis untuk

menjalankan pelbagai penyelidikan. Penyelidikan meluas dalam pelbagai aspek ini termasuklah menyediakan inventori kegagalan cerun berdasarkan kajian saintifik kerentanan kegagalan cerun, penilaian bahaya, risiko dan evolusi bentuk muka bumi. Melalui analisis saintifik pemetaan kecenderungan kegagalan cerun, kita boleh menilai dan mengenal pasti kawasan berisiko berlakunya kegagalan cerun. Tambahan pula, ia membolehkan pihak tertentu untuk mengambil langkah yang sesuai untuk mengurangkan kesan negatif daripada kegagalan cerun.

Kegagalan cerun berlaku di mana-mana saja di seluruh dunia ini yang telah menyebabkan kerosakan infrastruktur berbilion ringgit dan beribu-ribu kematian setiap tahun. Malaysia merupakan antara 10 negara teratas yang mempunyai banyak kegagalan cerun sejak sedekad yang lalu (Leoi et al. 2018). Mengikut data daripada Global Landslide Catalog (GLC) kepunyaan Pentadbiran Angkasa Aeronautik Kebangsaan Amerika Syarikat (NASA), Malaysia mengalami 171 kegagalan cerun yang besar antara 2007 dan Mac 2016, menjadikan negara ini menduduki tangga ke-10 tertinggi dalam kekerapan kegagalan cerun. Negara tertinggi mengalami kegagalan cerun ialah Amerika Syarikat (2,992), diikuti oleh India (1,265) dan China (426). Menurut data tersebut lagi, kejadian kegagalan cerun di Malaysia semakin meningkat setiap tahun, memuncak pada tahun 2014 dengan 33 kejadian. Sejak kebelakangan ini, Malaysia juga telah mengalami beberapa bencana kegagalan cerun yang mendapat perhatian umum, terutamanya beberapa siri kejadian yang berlaku di Pulau Pinang. Menurut Bernama (The Sun Daily, 20 Oktober 2018), sepanjang setahun dari September 2017 hingga Oktober 2018 terdapat enam (6) kejadian kegagalan cerun besar di Pulau Pinang. Pada 19 Oktober 2018, Malaysia dikejutkan dengan kejadian kegagalan cerun yang berlaku di Georgetown yang meragut nyawa 9 orang pekerja binaan (Petley 2018). Kegagalan cerun di tapak jalan berpasir Bukit Kukus yang berlaku di cerun besar yang telah dipotong sebagai sebahagian daripada projek pembinaan lebuh raya. Kegagalan cerun ini merupakan kegagalan yang konvensional dalam tanah yang tersisa/mendalam dan laporan menunjukkan bahawa ia dicituskan oleh hujan lebat. Kejadian ini adalah berhampiran satu kejadian kegagalan cerun besar yang berlaku pada November 2017 yang menyebabkan kerosakan besar pada tapak pembangunan kediaman baru (Petley 2017a). Bagaimanapun, kejadian ini tidak meragut sebarang nyawa. Kejadian ini pula berhampiran dengan kejadian kegagalan cerun yang berlaku di Tanjung Bungah pada bulan sebelum iaitu pada Oktober 2017 (Petley 2017b). Daripada beberapa siri kejadian ini menunjukkan bahawa Pulau Pinang adalah antara negeri yang banyak berlaku kegagalan cerun.

Pelbagai teknik yang berbeza telah digunakan dalam penilaian kegagalan cerun. Teknik ini boleh dibahagikan kepada dua kategori: Kualitatif dan kuantitatif (Ayalew & Yamagishi 2005). Kaedah kualitatif bergantung kepada penilaian pakar. Kaedah kualitatif yang paling biasa digunakan ialah kaedah inventori untuk mengenal

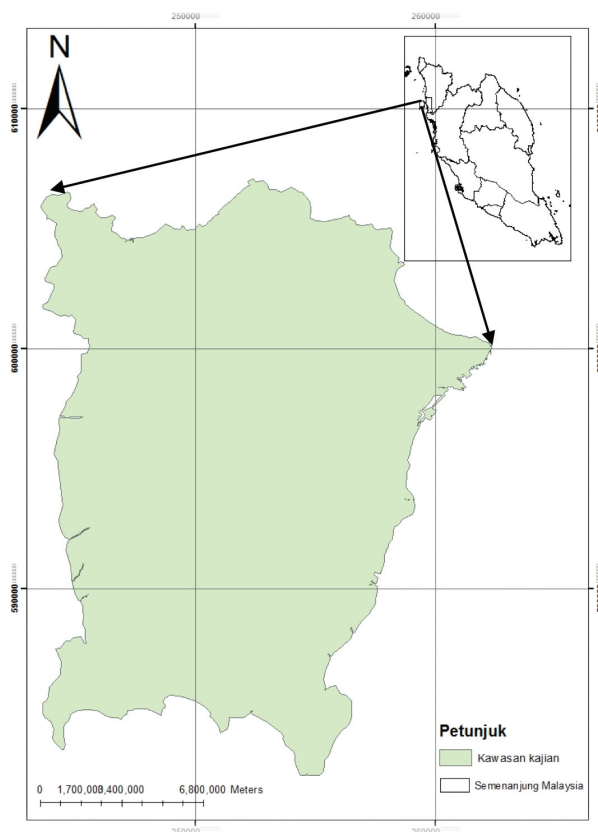
pasti tapak dengan sifat geologi dan geomorfologi yang terdedah kepada kegagalan cerun. Kaedah kuantitatif adalah berdasarkan kepada rumus berangka hubung kait matematik antara faktor penyebab dan kegagalan cerun. Terdapat dua jenis kaedah kuantitatif: deterministik dan statistik (Aleotti & Chowdhury 1999). Kaedah kuantitatif yang digunakan bergantung kepada prinsip kejuruteraan iaitu ketidakstabilan cerun daripada segi faktor keselamatan. Di kawasan yang berbeza di dunia, model deterministik telah digunakan oleh ramai penyelidik (Carro et al. 2003; Gokceoglu et al. 2000; Gupta et al. 2018; Rece & Capolongo 2002; Romeo 2000; Youssef et al. 2009; Zhou et al. 2003). Kaedah statistik mengambil kira hubungan masa lalu antara faktor penyebab dan taburan kegagalan cerun (Guzzetti et al. 1999). Kaedah statistik dibahagikan kepada dua: bivariat dan multivariat. Kaedah bivariat melibatkan idea bandingan peta persediaan kegagalan cerun dengan peta faktor penyebab bagi mengikut tahap peranan dalam sesuatu peristiwa (Nandi & Shakoore 2010; Yalcin 2008). Kaedah multivariat pula melibatkan banyak hubungan faktor dengan kejadian kegagalan cerun. Antara kaedah multivariat yang biasa digunakan ialah regresi logistik dan analisis diskriminan. Antara kajian yang menggunakan regrasi logistik untuk pemetaan bahaya kegagalan cerun termasuk kajian oleh Akgul dan Bulut (2007), Akgun et al. (2008), Althwaynee dan Pradhan (2017), Atkinson dan Massari (1998), Clerici et al. (2002), Dahal et al. (2008), Lamelas et al. (2008), Lee dan Pradhan (2006), Lee dan Talib (2005), Suzen dan Doyuran (2004), Tunusluoglu et al. (2008) dan Wang dan Sassa (2005). Kebanyakan teknik yang digunakan untuk penilaian kegagalan cerun memerlukan sejumlah besar data mengenai pelbagai faktor yang berkemungkinan menyebabkan kegagalan cerun. Jenis data yang diperlukan bergantung pada skala kajian dan teknik yang digunakan untuk penilaian bencana akibat kegagalan cerun. Untuk tujuan menganalisis sejumlah besar data, penggunaan sistem maklumat geografi (GIS) diperlukan (Carrara et al. 1995; Lan et al. 2004). Kajian daripada tiga dekad yang lalu telah membentuk asas pelbagai kajian dalam menggunakan sistem maklumat geografi (GIS) bagi ramalan pemetaan kerentanan kegagalan cerun (Jaafari et al. 2014). Dalam tahun-tahun kebelakangan ini, penggunaan GIS untuk pemodelan bahaya kegagalan cerun telah meningkat kerana pembangunan GIS komersial, seperti Arc/Info (ESRI) dan akses yang cepat kepada data yang diperolehi melalui Sistem Kedudukan Global (GPS) dan penderiaan jauh. Banyak kajian telah dijalankan dalam menilai bahaya kegagalan cerun menggunakan GIS seperti yang digunakan oleh Ayalew dan Yamagishi (2004), Carrara et al. (1995), Choi et al. (2010), Ercanoglu dan Gokceoglu (2002), Guzzetti et al. (1999), Kanungo et al. (2006), Lee dan Min (2001), Lee dan Pradhan (2007), Nuriah et al. (2018, 2017, 2016), Peng et al. (2012) dan Sarkar dan Kanungo (2004). Kaedah statistik adalah kaedah yang paling kerap dilakukan termasuk analisis bivariat (Aleotti & Chowdhury 1999), analisis multivariat (Komac 2006; Piegari et al. 2009), logistik regrasi (Dai & Lee 2002;

Ohlmacher & Davis 2003; Pradhan 2010; Pradhan et al. 2008) dan analisis diskriminan (Carrara et al. 1991; Frattini et al. 2008; Guzzetti et al. 2006; Ramos-Canon et al. 2016). Kaedah ini telah terbukti sesuai untuk pemetaan kegagalan cerun di kawasan yang besar dan kompleks (Guzzetti et al. 2006) dan keputusan yang dihasilkan adalah agak baik bagi menerangkan hubungan linear antara faktor penyebab dengan kegagalan cerun. Walaupun telah banyak kajian dijalankan sejak tiga dekad yang lalu, namun sebahagian besar kajian ini adalah bagi mengkaji dan menghasilkan peta kerentanan atau risiko kegagalan cerun. Kecuali kajian yang dijalankan oleh Carrara et al. (1991), Frattini et al. (2008), Guzzetti et al. (2006) dan Ramos-Canon et al. (2016) tidak banyak kajian yang mengelaskan dan mengenal pasti pemboleh ubah yang berkesan dalam membezakan kawasan kegagalan cerun dengan kawasan yang stabil atau tiada kegagalan cerun. Di samping itu, kajian oleh Kazmi et al. (2016) mendapati bahawa faktor yang mempengaruhi kegagalan cerun di Malaysia adalah berbeza dari beberapa negara lain seperti Amerika Syarikat, China, Greece, Brazil, Jerman, Korea dan Jepun.

Kertas ini menghuraikan kajian yang membentuk model menggunakan analisis diskriminan bagi mengelaskan kejadian kegagalan cerun berdasarkan sepuluh pemboleh ubah iaitu jarak ke jalan, purata hujan tahunan, jenis geologi, ketinggian topografi, kecuraman cerun, siri tanah, aspek cerun, jarak ke sungai, jenis guna tanah dan lineamen.

KAWASAN KAJIAN

Dalam kajian ini, Pulau Pinang telah dipilih sebagai kawasan kajian. Ia terletak pada garis lintang latitud $5^{\circ} 8' U$ hingga $5^{\circ} 35' U$ dan longitud $100^{\circ} 8' B$ hingga $100^{\circ} 32' B$ di Selat Melaka. Jumlah penduduk negeri Pulau Pinang adalah seramai 1.6 juta orang iaitu 5.7% daripada anggaran jumlah penduduk Malaysia (Jabatan Perangkaan Malaysia 2013). Seramai 1,505 orang bagi setiap km persegi direkodkan bagi kepadatan penduduk di Pulau Pinang. Di barat daya penduduk seramai 310,982 orang dan penduduk daerah timur laut ialah seramai 395,046. Antara kawasan perbandaran terawal di Malaysia yang pesat membangun adalah Pulau Pinang. Sebanyak 2.0 peratus purata kadar pertumbuhan penduduk tahunan. Sebahagian daripada Pulau Pinang adalah kawasan tanah tinggi. Pertambahan penduduk meningkatkan permintaan dan projek pembangunan bagi menampung keperluan penempatan penduduk. Suhu Pulau Pinang adalah antara minimum $24^{\circ}C$ hingga maksimum $30^{\circ}C$ (Jabatan Meteorologi 2015). Pulau Pinang mempunyai kadar kelembapan yang tinggi, hujan yang banyak dan suhu yang seragam. Jenis guna tanah di Pulau Pinang pula antaranya adalah untuk pertanian, pembangunan, penempatan, perindustrian, kemudahan dan pendidikan. Jenis geologi di kawasan kajian sebahagian besarnya terdiri daripada granit dan kuaternari. Rajah 1 menunjukkan kawasan kajian.



RAJAH 1. Kawasan kajian

PENYEDIAAN DATA DAN PEMBENTUKAN MODEL RUANGAN

Model ruangan yang dibentuk menghubungkan kaitkan kejadian kegagalan cerun dengan faktor ruangan yang mempengaruhi kejadiannya. Terdapat banyak pemboleh ubah yang boleh mempengaruhi kegagalan cerun. Budimir et al. (2015) dalam ulasan kepustakaan yang komprehensif telah mengenal pasti lebih daripada 50 pemboleh ubah pernah digunakan dalam kajian lampau. Walau bagaimanapun, bukan semua faktor/pemboleh ubah boleh diguna pakai di semua lokasi. Suzen dan Kaya (2011) telah membahagikan pemboleh ubah yang lazim mempengaruhi kegagalan cerun kepada empat (4) kumpulan: Persekitaran, geoteknikal, topografi dan geologi. Atas batasan tertentu hanya sepuluh (10) pemboleh ubah yang mewakili setiap kumpulan digunakan dalam kajian ini.

Rumus 1.0 menunjukkan model asas ruangan kegagalan cerun yang dicadangkan.

$$C = f(\text{HUJAN, GTANAH, JALAN, TANIH, LINEAMEN, LITOLOGI, TOPO, CURAM, ASPEK, SUNGAI}) \quad (1.0)$$

dengan C ialah kegagalan cerun; HUJAN ialah Purata hujan tahunan; GTANAH = Guna tanah; JALAN ialah jarak kegagalan cerun ke jalan; TANIH ialah siri tanah; LINEAMEN ialah lineamen; LITOLOGI ialah litologi batuan; TOPO ialah ketinggian topografi; CURAM ialah kecuraman cerun; ASPEK ialah aspek cerun; SUNGAI ialah jarak kegagalan cerun ke sungai; dan f ialah fungsi transformasi.

Berbagai kaedah boleh digunakan dalam menghasilkan fungsi transformasi yang mengaitkan pemboleh ubah bersandar dengan pemboleh ubah bebas, contohnya kaedah statistik seperti analisis diskriminan dan regresi logistik. Pembangunan pangkalan data merupakan satu proses bagi mengolah dan menyediakan lapisan peta dan atribut yang akan digunakan (Nuriah et al. 2017). Pembangunan pangkalan data yang khusus diperlukan untuk membangunkan model ruangan kegagalan cerun berdasarkan objektif kajian (Guzzetti et al. 1994; Klose et al. 2014; Zezere et al. 2014). Faktor ini merupakan pemboleh ubah ruangan yang diwakilkan dalam bentuk

poligon, garisan dan titik yang dapat diukur dan nilai atribut. Penyediaan data bagi pemodelan ini adalah berdasarkan Jadual 1.

Data paling asas yang merupakan pemboleh ubah bersandar ialah lokasi kejadian kegagalan cerun. Sebanyak 323 lokasi kejadian cerun hasil daripada kajian lapangan yang dikenal pasti. Bagi tujuan pemodelan lokasi cerun stabil perlu diimbangi bagi mengelakkan pincang (Hong et al. 2016; Pourtaghi & Poughasemi 2014; Sharma et al. 2014). Jumlah kegagalan cerun rawak mestilah sama dengan jumlah kegagalan cerun sebenar (Wan Mohd Muhiyuddin 2005). Oleh itu, sebanyak 323 lokasi stabil atau tiada kegagalan cerun telah dipilih secara rawak, bagi mengimbangi lokasi kegagalan cerun sebenar.

Pemboleh ubah pertama ialah purata hujan tahunan. Hujan merupakan satu bentuk kerpasan yang turun ke bumi sebagai suatu proses yang akan melengkapkan kitaran air di bumi. Kejadian kegagalan cerun lazimnya berlaku disebabkan hujan yang lebat dalam tempoh yang panjang dan banjir. Keadaan ini kerana hujan yang lebat akan meresap masuk ke dalam tanah dan seterusnya menyebabkan struktur tanah menjadi longgar yang menyebabkan tanah akan hilang kestabilan seterusnya mengakibatkan kejadian kegagalan cerun (Gerrard 1981; Mustafa Kamal 2007). Kajian ini menggunakan data purata hujan tahunan dan kaedah Thiessen yang digunakan bagi mendapatkan taburan purata hujan tahunan.

Guna tanah merupakan salah satu faktor yang lazim digunakan dalam kajian kegagalan cerun. Hal ini kerana aktiviti guna tanah memainkan peranan penting dalam mempengaruhi kejadian kegagalan. Kawasan guna tanah yang tandus lebih berpotensi mengalami kegagalan cerun berbanding hutan yang tebal, ini kerana tiada cengkaman tumbuhan (Bui et al. 2012; Vahidnia et al. 2010). Hubungan ini boleh menjadi semakin kompleks, bergantung kepada jenis guna tanah (Sahoo 2009). Hal ini kerana apabila hujan lebat berlaku, kawasan tanah tersebut akan dihalang oleh sebarang tumbuhan akan mudah terhakis dengan percikan air hujan (Nuriah et al. 2017).

Faktor jarak kegagalan cerun ke jalan (persekitaran) merupakan salah satu faktor yang digunakan dalam kajian

JADUAL 1. Senarai dan jenis data

Senarai data	Jenis	Skala
Kegagalan cerun	Titik	1:50 000
Tiada kegagalan cerun	Titik	30m x 30m
Purata hujan tahunan	Titik	1:50 000
Guna tanah	Poligon	1:50 000
Jarak kegagalan cerun ke jalan	Garisan	1:50 000
Jarak kegagalan cerun ke sungai	Garisan	1:50 000
Aspek cerun	Garisan	1:50 000
Kecuraman	Garisan	1:50 000
Ketinggian topografi	Garisan	1:50 000
Siri tanah	Poligon	1:25 000
Lineamen	Poligon	1:50 000
Litologi batuan	Poligon	1:50 000

ini. Pembinaan jalan raya adalah faktor penyumbang kejadian kegagalan cerun kerana melibatkan pemotongan cerun dan pemindahan bahan *in situ* ke kawasan yang ditambak. Kesan negatif pembinaan jalan raya kepada kestabilan cerun menyebabkan berlakunya kegagalan cerun (Borga et al. 2005; Lin et al. 2009). Peningkatan permintaan bagi pembinaan jalan raya di kawasan lereng bukit akan mengganggu kestabilan cerun (Jaafari et al. 2015). Hal ini menunjukkan kedudukan cerun yang berhampiran dengan jalan adalah berisiko untuk berlakunya kegagalan cerun (Nuriah et al. 2017).

Siri tanah ditentukan berdasarkan struktur, jenis dan susunan horizon, warna, pH dan mineralogi. Pembentukan tanah adalah terhasil daripada proses luluhawa batuan dan bahan organik. Siri tanah di kawasan kajian iaitu Kuala Kedah Permatang yang terdiri daripada tanah liat. Siri Rengam pula terdiri daripada tanah lempung yang berpasir kasar dan daripada batuan jenis metamorfis. Siri Selangor Kangkung pula terdiri daripada tanah liat bersaiz sederhana dan dihasilkan daripada asid sulfat tanah. Alluvium tempatan dan siri koluvium terdiri daripada campuran pasir, tanah liat, lanar dan bahan organik atau lempung. Tanah curam sebahagian besarnya berada di bahagian tengah Pulau Pinang yang terdiri daripada batuan granit. Menurut Oh dan Pradhan (2011), lebih 70 peratus kegagalan cerun berlaku di tanah curam. Walau bagaimanapun, punca ketidakstabilan cerun meliputi geologi dan struktur batuan dan kecuraman cerun, guna tanah dan aktiviti manusia. Kawasan tanah tinggi merupakan kawasan sensitif alam sekitar dan berisiko, daripada perspektif nilai dan fungsi ekosistem bagi tujuan kepentingan sumber asli dan pemeliharaan alam sekitar (Ibrahim Komoo 1989; Oh & Pradhan 2011). Mwaniki et al. (2015) menyatakan bahawa tanah sentiasa berkembang daripada batuan melalui luluhawa proses dalam pengaruh keadaan persekitaran seperti cuaca, iklim, topografi, tumbuh-tumbuhan dan aktiviti manusia. Oleh itu, proses luluhawa tidak hanya penting untuk penghasilan tanah, tetapi juga menentukan sifat tanah, kesuburan dan cerun kestabilan (Moses & Robinson 2011).

Lineamen adalah struktur geologi yang terhasil akibat fenomena canggaan batuan (Bates & Jackson 1987). Fenomena canggaan ini menghasilkan pelbagai saiz bukaan pada jasad batuan tersebut dan akan melemahkan kekuatannya (Nicholas 1995). Keadaan ini akan menyebabkan cerun yang berada pada bahagian ini kurang stabil dan lebih mudah mengalami runtuh (Wan Mohd Muhiyuddin 2005). Oleh yang demikian jarak kegagalan cerun ke lineamen mempengaruhi kejadian kegagalan cerun.

Faktor litologi batuan (geologi) juga merupakan pemboleh ubah yang digunakan dalam kajian ini. Kebolehtelapan dan kekuatan batuan dicirikan oleh parameter geologi seperti litologi dan struktur (Raja et al. 2017). Oleh itu, menentukan batuan dan pengagihan keseluruhannya penting dalam kegagalan cerun (Ayalew & Yamagishi 2005). Litologi adalah perbezaan jenis batuan dalam pelbagai komposisi struktur dan kekuatan

bahan (Kanungo et al. 2006). Jenis batuan yang berbeza menghasilkan rintangan yang berbeza terhadap luluhawa dan hakisan proses kerana ciri berbeza yang wujud seperti komposisi, struktur dan kompak (Kai et al. 2015). Sebahagian besar dari Pulau Pinang adalah dilapisi batuan igneus (Lee & Pradhan 2006).

Ketinggian topografi merujuk kepada ketinggian bentuk muka bumi di sesuatu kawasan. Ketinggian yang dimaksudkan ialah garis kontur untuk mengukur aras ketinggian. Parameter utama dalam analisis kestabilan cerun ialah sudut cerun. Ketinggian topografi merujuk kepada ketinggian bentuk muka bumi di sesuatu kawasan. Ketinggian yang dimaksudkan ialah garis kontur untuk mengukur aras ketinggian. Parameter utama dalam analisis kestabilan cerun ialah sudut cerun. Oleh itu, kawasan yang besar sifat-sifat seperti kecerunan cerun dan aspek ialah berasal daripada Model Ketinggian Berdigit (DEM). Sudut kecerunan mempengaruhi kegagalan cerun kerana sering digunakan dalam menyediakan peta kestabilan kegagalan cerun (Yalcin & Bulut 2007). Topografi dianalisis menggunakan DEM. Penggunaan DEM sebagai asas untuk memperoleh parameter sekunder digunakan untuk analisis geomorfologi telah didokumentasikan oleh Moore dan Gallant (1991). Melalui DEM, ciri cerun seperti kecerunan, aspek dan kelengkungan cerun boleh dikaji. Menurut Komac (2006) semua data tambahan di morfologi terain (kelengkungan, ketinggian, aspek, lembangan dan kecerunan-unit utama) boleh didapati daripada DEM. Topografi yang curam menyumbang kejadian kegagalan cerun (Caniani et al. 2007; Chen et al. 2011; Pradhan & Buchroithner 2010).

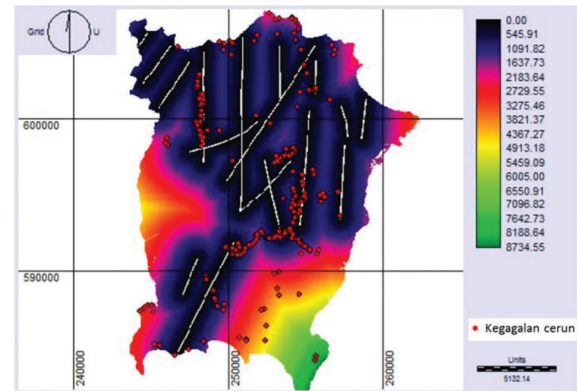
Kecerunan cerun adalah pemangkin yang digunakan secara meluas dalam kajian kegagalan cerun secara langsung berhubung dengan pergerakan bahan kegagalan cerun (Dai & Lee 2001; Simon et al. 2009; Van Western et al. 2003). Hal ini kerana kegagalan cerun berkadar terus dengan kecuraman cerun. Pengaruh graviti yang semakin tinggi meningkatkan darjah kecuraman cerun sesuatu permukaan. Semakin besar pengaruh graviti terhadapnya dan semakin mudah sesuatu cerun itu gagal (Montgomery 1997). Menurut Choi et al. (2010), lebih dari 300 lokasi meningkatkan kekerapan kejadian kegagalan cerun. Simon et al. (2009) menjelaskan kecuraman cerun berlaku apabila sudut bahan pembentuk cerun sebanyak 35%. Cerun yang curam akan memudahkan pergerakan bahan di atasnya untuk runtuh. Walau bagaimanapun, kecuraman cerun yang tinggi meningkatkan potensi untuk berlaku kegagalan cerun, ini kerana pecutan air hujan akan meningkatkan potensi kegagalan cerun. Cerun landai pula kemungkinan untuk berlaku kegagalan cerun adalah kurang, ini kerana air hujan yang menuruni cerun agak perlahan.

Aspek cerun dan kelengkungan cerun adalah faktor penting yang mempengaruhi kegagalan cerun (Dragicevic et al. 2015; Lin et al. 2009). Aspek cerun adalah salah satu daripada sistem kecerunan. Kedudukan cerun yang terlindung daripada cahaya matahari berkeadaan lembap manakala bagi aspek cerun yang menghadap ke arah matahari berada dalam keadaan kering (Carrara et al. 1991;

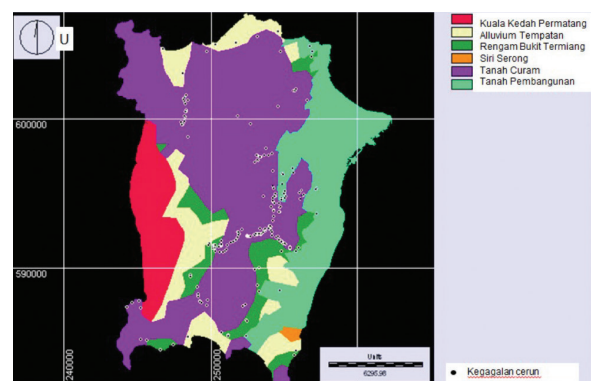
Wan Mohd Muhiyuddin 2005). Kejadian kegagalan cerun yang sering berlaku biasanya berada dalam keadaan aspek cerun yang lembap. Menurut Lee dan Jasmi (2005) dalam kajian yang telah dilakukan, kejadian kegagalan cerun adalah disebabkan oleh aspek cerun. Menurutnya lagi frekuensi kejadian kegagalan cerun yang paling rendah berlaku pada aspek cerun yang menghadap ke arah Timur, Barat dan Barat Laut kecuali dalam kawasan yang rata. Cerun yang tidak menghadap matahari mempunyai suhu yang rendah manakala kelembapan tanah yang tinggi, ketebalan tanah sisa dan koluvium yang lebih, litupan tumbuhan yang tebal dan kadar hakisan yang kurang. Apabila cerun ini terganggu, maka ia akan cenderung untuk mengalami kegagalan cerun.

Saliran adalah air yang mengalir yang mengisi alur sungai dan bergerak ke bahagian yang mempunyai tarikan graviti lebih rendah (Ibrahim & Juhari 1990). Kegagalan cerun boleh menyebabkan deposit hiliran, pertengahan dan hulu yang menghasilkan aliran serpihan semasa hujan lebat. Ia bukan sahaja mencetuskan kegagalan cerun di bawah jalan raya, tetapi juga mendorong gelongsor progresif di atas jalan. Oleh itu, jarak dari jalan raya sering dianggap sebagai faktor kawalan dalam analisis kerentanan kegagalan cerun seperti kajian di Taiwan oleh Shou dan Yang (2015). Menurut Fatimah Shafinaz (2005) dan Kanungo et al. (2006), sistem saliran yang berada berhampiran dengan kawasan kegagalan cerun boleh mempengaruhi struktur tanah di kawasan tersebut dan menyebabkan gangguan terhadap kestabilan sesuatu cerun. Kajian yang telah dilakukan oleh Yalcin (2008) menunjukkan bahawa 39% kejadian kegagalan cerun berlaku antara 0 - 50 m daripada jarak saliran yang terdapat di kawasan tersebut. Cevik dan Topal (2003), Nagarajan et al. (2000) dan Pachauri et al. (1998) mendapati ketumpatan saliran yang tinggi mempunyai kadar penyusupan yang rendah dan pergerakan aliran permukaan yang cepat mengurangkan keupayaan saliran. Oleh itu, terdapat pertalian kegagalan cerun yang berlaku dengan jarak saliran yang berada di kawasan tersebut. Jarak saliran yang berdekatan dengan kawasan kegagalan cerun menjadi pemangkin terhadap kejadian sesuatu kegagalan cerun.

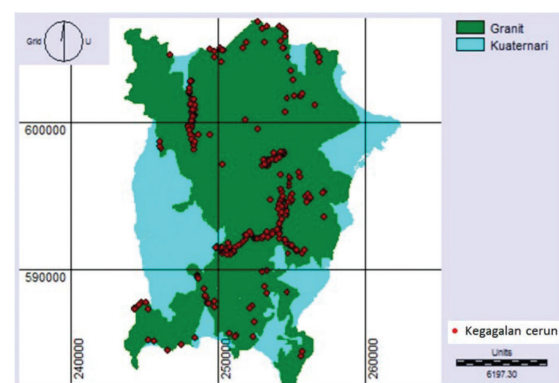
Jarak kegagalan cerun ke saliran adalah penyebab kejadian kegagalan cerun kerana kadar air larian meningkatkan kadar hakisan dan proses perlarutan (Montgomery 1997). Jarak kegagalan cerun ke sungai yang dekat menyebabkan kadar infiltrasi menjadi rendah dan sekaligus akan mempercepatkan kadar pergerakan aliran permukaan (Montgomery 1997). Kedudukan yang hampir dengan saliran adalah salah satu faktor utama yang mengawal proses hakisan cerun akibat daripada aliran air secara terus menyebabkan cerun terhakis dan meningkatkan kejadian kegagalan cerun (Guo et al. 2015). Selain itu, faktor penting yang mempengaruhi kegagalan cerun adalah hujan tahunan, ketinggian topografi dan TW (Gigovic et al. 2019; Hong et al. 2017; Pham et al. 2017; Pourghasemi et al. 2013; Tsangarotus & Ilia 2016). Rajah 3(a)-3(j) menunjukkan peta taburan pemboleh ubah yang digunakan dalam kajian ini.



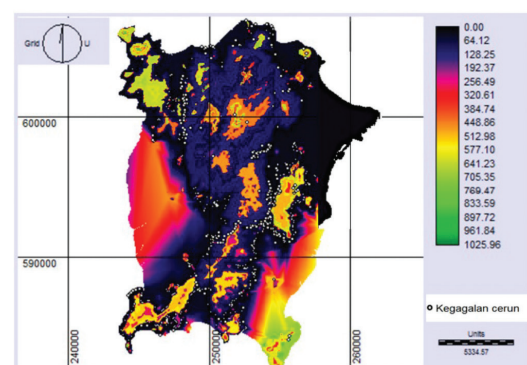
RAJAH 3(a). Peta lineamen



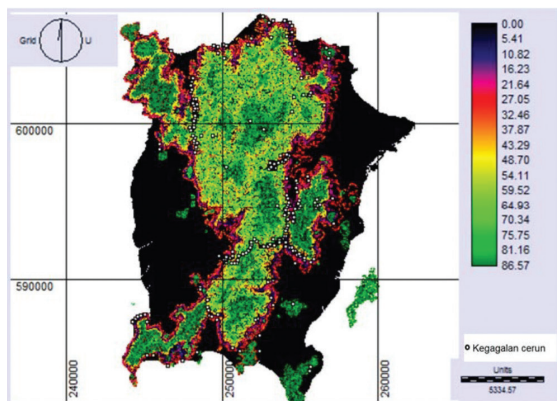
RAJAH 3(b). Peta siri tanah



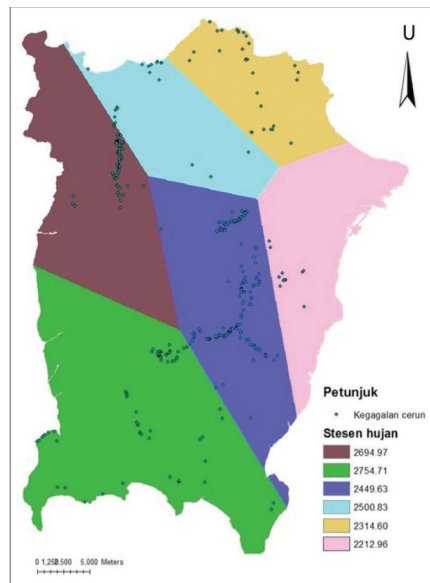
RAJAH 3(c). Peta litologi



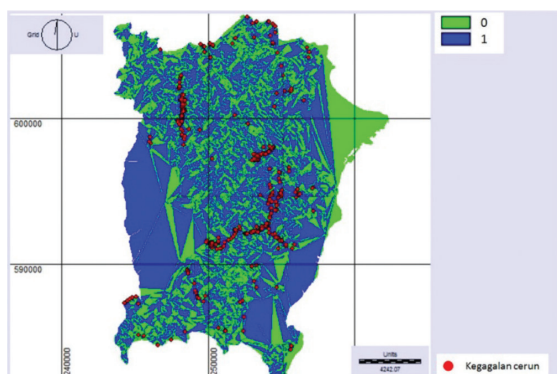
RAJAH 3(d). Peta ketinggian topografi



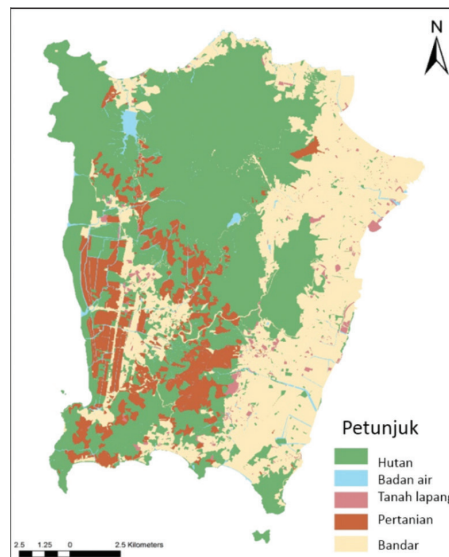
RAJAH 3(e). Peta kecuraman cerun



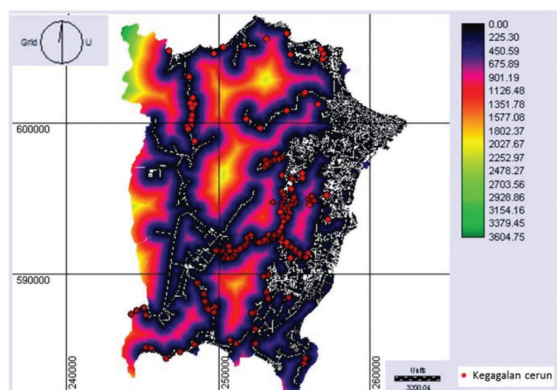
RAJAH 3(i). Peta purata hujan tahunan



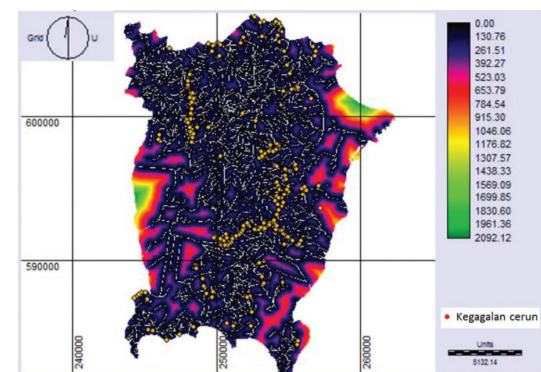
RAJAH 3(f). Peta aspek cerun



RAJAH 3(j). Peta guna tanah



RAJAH 3(g). Peta jarak kegagalan cerun ke jalan



RAJAH 3(h). Peta jarak kegagalan cerun ke sungai

METOD

Dalam kajian ini, analisis diskriminan digunakan kerana ia merupakan salah satu teknik statistik yang lazim digunakan dalam menentukan kerentanan kegagalan cerun. Analisis diskriminan adalah analisis yang boleh digunakan untuk menentukan kumpulan sesuatu objek berdasarkan kepada kriteria yang ditentukan mengenai objek tersebut (Bromley 1971; Morrison 1967; Norusis 1993). Kaedah ini digunakan pada kes pemboleh ubah bersandar dengan data kategori dan pemboleh ubah lain adalah data kuantitatif. Analisis diskriminan bertujuan untuk mengelaskan suatu individu atau pengamatan ke dalam kelompok atau kumpulan eksklusif yang terasing dan menyeluruh berdasarkan sejumlah pemboleh ubah bebas. Tujuan utama analisis ini dijalankan adalah bagi

memahami perbezaan antara kumpulan dan seterusnya membuat ramalan tentang kemungkinan sesuatu objek termasuk ke dalam kumpulan tertentu (Hair et al. 1992; Klecka 1980). Analisis diskriminan membina model ramalan untuk keahlian kumpulan. Model ini terdiri daripada fungsi diskriminan berdasarkan gabungan linear pemboleh ubah peramal yang menyediakan pemisahan yang terbaik antara kumpulan. Fungsi dijana daripada sampel kes dengan keahlian kumpulan diketahui; fungsi itu kemudian boleh digunakan untuk mengelaskan kes baharu yang mempunyai ukuran bagi pemboleh ubah peramal tetapi keahlian kumpulannya tidak diketahui (IBM 2016).

Dalam kajian ini, analisis diskriminan digunakan bagi tujuan mengelaskan dua kumpulan iaitu lokasi kegagalan cerun dan lokasi cerun stabil (tanpa kegagalan cerun). Fungsi diskriminan adalah dalam bentuk:

$$C = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 \dots + b_nx_n \quad (2.0)$$

dengan C ialah skor diskriminan; $x_i(i=1\dots n)$ ialah pemboleh ubah, $b_i(i=1\dots n)$ ialah koefisien tak piawai fungsi diskriminan untuk pemboleh ubah ke- i ; dan n ialah bilangan pemboleh ubah diskriminan. Koefisien diskriminan adalah nilai yang memaksimumkan jarak antara vektor nilai min bagi setiap kategori (Baecher & Christian 2003), iaitu dalam kajian ini adalah kumpulan lokasi stabil dan lokasi kegagalan cerun.

Perisian statistik *SPSS for Window Release 22* digunakan bagi menjalankan analisis ini. Perisian ini menyediakan enam kaedah bagi memasukkan pemboleh ubah. Antaranya ialah memasukkan semua pemboleh ubah secara serentak dan lima kaedah analisis berlangkah iaitu *Wilk's Lambda*, *Unexplained Variance*, *Mahalanobis Distance*, *Smallest F-Ratio* dan *Rao's V* (Norusis 1993). Kaedah analisis yang memasukkan semua pemboleh ubah secara serentak menggunakan semua pemboleh ubah yang dimasukkan ke dalam model bagi mendiskriminasi kumpulan. Manakala kelima-lima kaedah analisis berlangkah memasukkan pemboleh ubah ke dalam model satu demi satu mengikut kepentingan pemboleh ubah berkenaan. Dalam setiap langkah, pemboleh ubah yang dimasukkan dipertimbangkan sama ada diperlukan di dalam model atau tidak. Melalui kaedah analisis berlangkah, hanya pemboleh ubah yang penting bagi mendiskriminasi kumpulan dikekalkan di dalam model. Kaedah *Smallest F-ratio* bagi setiap pemboleh ubah bebas yang mempunyai nilai statistik F yang kecil akan dimasukkan dahulu ke dalam model. Pengasingan kumpulan ini dibuat berdasarkan kriteria yang mempengaruhi pembangunan model kegagalan cerun.

Bagi tujuan analisis ini, sebanyak 323 kes kegagalan cerun sebenar telah digunakan. Data ini merangkumi kejadian bagi tempoh 13 tahun dari 2003 hingga 2015 yang diperoleh daripada pelbagai sumber seperti laporan dan surat khabar. Untuk mengelakkan kepincangan, pengkaji lampau mencadangkan supaya sampel rawak

yang mewakili lokasi cerun stabil (tanpa kegagalan cerun) yang sama bilangannya dimasukkan ke dalam set data untuk tujuan analisis (Ayalew & Yamagishi 2005). Oleh itu, sebanyak 323 kes cerun stabil yang dipilih secara rawak dan digabungkan dengan 323 kes sebenar menjadikan keseluruhan lokasi cerun berjumlah 646. Seterusnya, data kejadian kegagalan ini dibahagikan secara rawak kepada dua set. Sebanyak 70% kes kejadian digunakan untuk membangunkan model asal, manakala 30% lagi digunakan untuk pengujian. Jumlah fungsi diskriminan yang diperoleh bagi kajian ini ialah $(k-1)$ dengan k ialah jumlah kumpulan. Memandangkan terdapat 2 kumpulan yang perlu diasingkan, maka satu fungsi akan dihasilkan daripada analisis ini. Dalam kajian ini, kaedah *Wilk's Lambda* telah digunakan untuk menilai kuasa mendiskriminasi model yang terhasil. *Wilks' Lambda* adalah bahagian daripada jumlah varians dalam skor diskriminan yang tidak dijelaskan oleh perbezaan antara kumpulan. *Lambda 1.0* berlaku apabila kumpulan adalah sama (semua varian yang dijelaskan oleh faktor lain daripada perbezaan antara mereka), manakala *lambda kecil* atau hampir sifar berlaku apabila kepelbagaian dalam kumpulan adalah kecil atau perbezaan antara kumpulan adalah tinggi. Secara umum, jika tahap kesignifikanan (atau nilai *Lambda*) adalah kurang daripada 0.05, ini menunjukkan kuasa diskriminasi yang mencukupi (Dong et al. 2017). Seterusnya, kepentingan relatif setiap pemboleh ubah pula akan dinilai berdasarkan nilai piawai koefisien diskriminan.

ANALISIS DAN PERBINCANGAN

Jadual 2 menunjukkan ringkasan hasil analisis diskriminan yang telah dijalankan. Hasil optimum diperoleh pada langkah ke-5, iaitu pada nilai *Wilk's Lambda* paling minimum sebanyak 0.405. Pada langkah ini, lapan daripada sepuluh pemboleh ubah adalah signifikan dan dimasukkan ke dalam model, iaitu siri tanih (TANIH), kecuraman (CURAM), litologi batuan (LITOLOGI), ketinggian topografi (TOPO), dan jarak kegagalan cerun ke jalan (JALAN), aspek cerun (ASPEK), lineamen (LINEAMEN) dan guna tanah (GTANAH), manakala purata hujan tahunan (HUJAN) dan jarak kegagalan cerun ke sungai (SUNGAI) pula adalah tidak signifikan dan terkeluar daripada model.

Jadual 2 menunjukkan koefisien fungsi diskriminan kanonikal bagi kajian ini. Terdapat lapan pemboleh ubah yang signifikan iaitu siri tanih, kecuraman, jenis litologi, lineamen, jarak ke jalan, aspek cerun, ketinggian topografi dan guna tanah. Nilai bagi pemalar dan koefisien setiap pemboleh ubah bebas dimasukkan ke dalam Rumus (2) bagi menghitung nilai skor diskriminan. Maka Rumus 2 ini boleh dinyatakan sebagai:

Skor diskriminan =

$$\begin{aligned} & -4.405 + 1.6987 \text{ LITOLOGI} + 0.4011 \text{ ASPEK} - 0.1850 \\ & \text{GTANAH} - 0.0014 \text{ TOPO} + 0.3308 \text{ TANIH} - 0.0003 \\ & \text{LINEAMEN} + 0.0368 \text{ CURAM} - 0.0009 \text{ JALAN} \end{aligned} \quad (2)$$

JADUAL 2. Ringkasan analisis diskriminan

Langkah	Pemboleh ubah	Wilks' Lambda							
		Statistik	df1	df2	df3	Exact F			
						Statistik	df1	df2	Sig.
1	Siri tanih (TANIH)	.674	1	1	450.0	217.541	1	450.0	.000
2	Kecuraman (CURAM)	.543	2	1	450.0	188.696	2	449.0	.000
3	Litologi (LITOLOGI)	.474	3	1	450.0	165.462	3	448.0	.000
4	Lineamen (LINEAMEN)	.417	4	1	450.0	156.515	4	447.0	.000
5	Jarak ke jalan (JALAN)	.399	5	1	450.0	134.188	5	446.0	.000
6	Aspek cerun (ASPEK)	.391	6	1	450.0	115.362	6	445.0	.000
7	Ketinggian topografi (TOPO)	.384	7	1	450.0	101.667	7	444.0	.000
8	Guna tanah (GTANAH)	.379	8	1	450.0	90.680	8	443.0	.000

df = darjah kebebasan

Pada setiap langkah, pemboleh ubah yang meminimumkan nilai Wilk's keseluruhan dimasukkan

dengan LITOLOGI, ASPEK, GTANAH, TOPO, TANIH, LINEAMEN, CURAM dan JALAN didefinisikan seperti dalam Jadual 2. Nilai skor diskriminan ini digunakan untuk menentukan kumpulan bagi setiap kes yang tidak diketahui statusnya. Skor diskriminan setiap subjek akan dihitung dengan memasukkan nilai pemboleh ubahnya (data mentah) bagi setiap pemboleh ubah dalam (2). Penentuan kelas adalah berdasarkan kepada nilai sentroid kumpulan. Jadual 3(b) menunjukkan sentroid bagi kumpulan cerun stabil (0) dan kegagalan cerun (1) masing-masing ialah -1.294 dan 1.260. Nilai ini bermaksud sekiranya nilai skor diskriminan adalah hampir kepada sentroid ini, maka ia akan dikelaskan kepada kumpulan tersebut. Secara khusus, sempadan fungsi diskriminan mengasingkan dua kumpulan ini (cerun stabil dan kegagalan cerun) dihitung menggunakan purata kedua-dua sentroid ini. Nilai fungsi diskriminan bagi mengasingkan kedua-dua kumpulan ini (dinyatakan sebagai g) boleh dihitung menggunakan (3) seperti berikut;

$$g = (C_f + C_s)/2 \quad (3)$$

dengan C_f ialah sentroid kumpulan cerun gagal; dan C_s ialah sentroid kumpulan cerun stabil.

Oleh itu, nilai sempadan fungsi diskriminan ialah

$$g = (1.260 - 1.294)/2 = -0.017 \quad (4)$$

dengan menggunakan nilai g ini, sempadan keadaan memisahkan cerun gagal dan cerun stabil adalah seperti berikut;

Cerun stabil jika skor diskriminan (C) < -0.017, sebaliknya cerun gagal.

Seperti koefisien terpiawai dalam linear regresi, koefisien terpiawai dalam analisis diskriminan juga menentukan kepentingan relatif setiap pemboleh ubah (Field 2009).

Jadual 3(a) menunjukkan koefisien terpiawai bagi lapan pemboleh ubah yang mempengaruhi kegagalan cerun. Daripada lapan pemboleh ubah ini, kecuraman merupakan pemboleh ubah yang paling penting dalam mendiskriminasikan antara lokasi kegagalan cerun dengan lokasi cerun stabil, diikuti oleh litologi dan siri tanih. Keputusan ini jelas menunjukkan risiko sekiranya kecuraman cerun diubahkan dalam proses pembangunan sesebuah kawasan.

JADUAL 3(a). Koefisien tidak terpiawai dan terpiawai fungsi diskriminan

Pemboleh ubah	Fungsi 1	
	tidak terpiawai	terpiawai
Litologi (LITOLOGI)	1.6987	.530
Aspek cerun (ASPEK)	.4011	.199
Guna tanah (GTANAH)	-.1850	-.149
Ketinggian topografi (TOPO)	-.0014	-.228
Siri tanih (TANIH)	.3308	.404
Lineamen (LINEAMEN)	-.0003	-.312
Kecuraman (CURAM)	.0368	.812
Jarak kegagalan cerun ke jalan (JALAN)	-.0009	-.285
(Constant)	-4.4052	

JADUAL 3(b). Sentroid kumpulan

Kelas	Fungsi 1
Cerun stabil (0)	-1.294
Cerun gagal (1)	1.260

Fungsi diskriminan kononikal tidak terpiawai dinilai pada min kumpulan

Jadual 4 menunjukkan ketepatan pengkelasan kegagalan cerun model asal. Ketepatan bagi cerun stabil adalah 94.17%, manakala bagi kawasan kegagalan cerun pula adalah 90.83%. Ketepatan keseluruhan bagi model asal adalah sebanyak 92.5%.

JADUAL 4. Ketepatan pengkelasan

Jenis kegagalan cerun		Ramalan		Jumlah	
		0	1		
Sebenar	Bilangan	0	210	13	223
		1	21	208	229
	%	0	94.17	5.83	100.0
		1	9.17	90.83	100.0

Ketepatan keseluruhan= 92.5%,
0 - cerun stabil, 1- cerun gagal

PENGUJIAN MODEL

Pengujian model adalah penting untuk memastikan keberkesannya (Chapin & Kaiser 1979). Dalam kajian ini, pengujian telah dijalankan dengan menggunakan 30% daripada set data yang tidak digunakan dalam pembentukan model asal. Jadual 5 menunjukkan ketepatan pengujian model. Ketepatan bagi kawasan cerun stabil adalah 93.7% manakala bagi kawasan kegagalan cerun pula adalah 88.70%. Pengujian menunjukkan pencapaian model adalah baik dengan ketepatan keseluruhan bagi model asal sebanyak 91.20%.

PERBINCANGAN

Kajian ini menggunakan analisis diskriminan berdasarkan sepuluh pemboleh ubah. Ia mendapati lapan daripada sepuluh pemboleh ubah telah mendiskriminasikan kawasan kegagalan cerun secara signifikan. Antaranya adalah faktor jarak ke jalan, siri tanah, lineamen, ketinggian topografi, guna tanah, aspek cerun, litologi dan kecuraman. Hal ini kerana setiap pemboleh ubah yang signifikan menyumbang kepada kejadian kegagalan cerun lebih tinggi. Faktor kecuraman cerun adalah faktor yang sangat penting dalam membezakan kawasan kegagalan cerun (Simon et al. 2009). Hal ini kerana kegagalan cerun berkadar terus dengan kecuraman cerun (Nuriah et al. 2017). Pengaruh graviti yang semakin tinggi meningkatkan darjah kecuraman cerun, seterusnya meningkatkan kejadian kegagalan cerun (Nuriah et al. 2018). Faktor ketinggian topografi telah digunakan secara meluas untuk mencirikan kesan topografi di tempat itu dan saiz kawasan sumber tepu penjaan air larian (Beven & Kirkby 1979). Ketinggian topografi mempunyai korelasi dengan proses hakisan tanah, faktor ini akan menyumbang kepada kegagalan cerun. Semakin tinggi topografi kawasan tersebut, semakin

bertambah risiko kejadian kegagalan cerun. Kawasan kajian menunjukkan kawasan bertopografi tinggi telah meningkatkan kejadian kegagalan cerun. Di Pulau Pinang terdapat banyak kawasan bertanah tinggi yang dibangunkan telah menyumbang kepada peningkatan kejadian kegagalan cerun. Faktor guna tanah merupakan antara faktor yang signifikan ini kerana perubahan guna tanah membawa kepada hakisan tanah tinggi dan pembentukan saluran, mengurangkan produktiviti tanah, tanah pertanian, dan mengisi takungan hiliran seterusnya menyumbang kepada kegagalan cerun (Ayele et al. 2015; Ben Slimane et al. 2015; Gessesse et al. 2015; Haregeweyn et al. 2013; Kou et al. 2015). Selain itu, bagi faktor jarak kegagalan cerun ke jalan pula, pembinaan jalan raya dan mengurangkan tekanan dan tegasan di bahagian belakang cerun, mengakibatkan gangguan cerun dan seterusnya meningkatkan kejadian kegagalan cerun (Guo-liang et al. 2017). Faktor litologi juga memainkan peranan penting dalam hakisan dan kegagalan cerun. Tindak balas batuan terhadap cuaca dan hakisan adalah kriteria penting kepada litologi (Guo-liang et al. 2017). Hakisan secara eksklusif bergantung pada sifat litologi dan cuaca yang terdedah dengan permukaan bumi. Oleh itu, kepelbagaian jenis litologi memberi kesan kepada jenis litologi di kawasan kajian. Di kawasan kajian terdapat litologi jenis granit dan kuarteneri. Kegagalan cerun lazimnya berlaku pada litologi jenis granit. Di Pulau Pinang sebanyak 87.7% kegagalan cerun berlaku pada batuan granit (Nuriah et al. 2018, 2017). Aspek cerun merupakan antara pemboleh ubah yang signifikan dalam meningkatkan kejadian kegagalan cerun (Nagarajan et al. 2000). Nilai aspek adalah dari 0 hingga 360. Pengaruh aspek cerun terutamanya ditunjukkan dalam kesan perubahan cuaca mikro dan nisbah haba dan air (Conforti et al. 2011). Aspek cerun yang mempengaruhi tempoh cahaya matahari, hujan, kelembapan dan litupan

JADUAL 5. Ketepatan pengujian model

Jenis kegagalan cerun		Ramalan		Jumlah	Peratus
		0	1		
Bilangan	0	90	6	96	93.7
	1	11	87	93	88.7
Ketepatan keseluruhan					91.2

Nota: 0 - cerun stabil, 1- cerun gagal

tumbuhan, boleh mempengaruhi hakisan secara tidak langsung (Conforti et al. 2011). Linemen adalah struktur geologi yang terhasil akibat fenomena canggaan batuan (Bates & Jackson 1987). Ia merupakan garis yang lemah yang boleh menyumbang kepada kejadian kegagalan cerun. Cerun yang berada di kawasan ini kurang stabil dan lebih cenderung untuk mengalami kegagalan cerun. Lokasi yang berdekatan dengan lineamen menunjukkan kemungkinan kegagalan cerun yang semakin tinggi.

Model ini menghasilkan ketepatan sebanyak 91.23%. Pencapaian ini adalah setanding dengan beberapa kajian lampau. Lin et al. (2016) dalam kajian di Selatan Taiwan dengan menggunakan pemboleh ubah topografi telah menghasilkan ketepatan pengkelasan sebanyak 93.3%. Gorsevski et al. (2000) menggunakan 26 parameter persekitaran dalam memodelkan kegagalan cerun bagi Rocky Point, Idaho Tengah, Amerika Syarikat. Mereka mengambil kira risiko relatif dalam melakukan kesilapan semasa pengkelasan. Pendekatan ini menghasilkan berbagai hasil pengkelasan akhir. Ketepatan keseluruhan berbeza-beza daripada 53.6% hingga 66.0%. Baeza dan Corominas (2001) dalam kajian mereka memperoleh ketepatan keseluruhan sebanyak 88.5% dan 95.6% bagi kegagalan cerun. Antara faktor yang diambil kira adalah kecerunan cerun, kawasan tadahan air dan penggunaan tanah muncul sebagai faktor penentu yang paling penting. Ramos-Canon et al. (2016) pula dalam kajian mereka di Bogota, Colombia, menggunakan pemboleh ubah seperti keamatan hujan, hujan terdahulu dan hujan harian. Ketepatan model yang terhasil adalah 70%.

KESIMPULAN

Kertas ini melaporkan penggunaan GIS dan analisis statistik dalam meramalkan kejadian kegagalan cerun. Analisis diskriminan digunakan untuk mengkategorikan lokasi kejadian kegagalan cerun dan bukan kegagalan cerun. Kajian ini menunjukkan potensi analisis diskriminan dalam mengenal pasti faktor penting yang membezakan lokasi kegagalan cerun dan meramalkan kawasan yang akan berlaku kegagalan cerun. Antara faktor yang signifikan termasuklah litologi, jarak ke jalan, ketinggian topografi dan kecuraman. Model yang terhasil berjaya mengelaskan dengan tepat sebanyak 91.20% daripada kegagalan cerun. Model ini boleh menjadi mekanisme untuk memantau dan meramal kejadian kegagalan cerun masa depan. Keupayaan ramalan akan membolehkan perancang dan pembuat keputusan untuk menggambarkan kesan dasar perancangan tertentu mengenai pengagihan kawasan pertumbuhan masa depan sebelum ia dilaksanakan.

Walau bagaimanapun, beberapa faktor penyebab kejadian kegagalan cerun yang penting termasuklah geoteknikal cerun, jenis litupan tumbuhan, kajian lapangan dan pengeluaran peta geologi (sudut dan strata dip) yang terperinci, tidak diambil kira oleh kerana kesukaran mendapatkan data berkaitan. Selain itu, peta inventori kegagalan cerun yang tidak lengkap di kawasan kajian ini menimbulkan masalah untuk mendapatkan peta kegagalan

cerun yang menyeluruh. Selain itu satu cara untuk meningkatkan prestasi model dan memperluaskan kawasan kajian pada skala yang lebih besar. Namun demikian, ia memerlukan rekod kegagalan cerun yang terperinci yang tidak tersedia buat masa ini. Walau bagaimanapun, keputusan positif yang diperoleh dalam kajian ini dapat disimpulkan bahawa analisis diskriminan merupakan kaedah signifikan dalam menilai faktor yang membezakan lokasi kegagalan cerun di Pulau Pinang.

RUJUKAN

- Akgul, A. & Bulut, F. 2007. GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. *Environ. Geol.* 51(8): 1377-1387.
- Akgun, A., Dag, S. & Bulut, F. 2008. Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology* 54(6): 1127-1143.
- Aleotti, P. & Chowdhury, R. 1999. Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives. *Bull. Eng. Geol. Env.* 58(1): 21-44.
- Althuwaynee, O.F. & Pradhan, B. 2017. Semi-quantitative landslide risk assessment using GIS-based exposure analysis in Kuala Lumpur City, Geomatics, *Natural Hazards and Risk* 8(2): 706-732. DOI: 10.1080/19475705.2016.1255670.
- Atkinson, P.M. & Massari, R. 1998. Generalized linear modeling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. *Comput. Geosci.* 24(4): 373-385.
- Ayalew, L. & Yamagishi, H. 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65(1): 15-31.
- Ayele, S., Raghuvanshi, T.K. & Kala, P.M. 2014. Application of remote sensing and GIS for landslide disaster management: A case from Abay Gorge, Gohatsion-Dejen section, Ethiopia. In *Landscape Ecology and Water Management*. Tokyo: Springer. hlm. 15-32.
- Baecher, G. & Christian, J. 2003. *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. 1st ed. Chichester: John Wiley.
- Baeza, C. & Corominas, J. 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Process & Landform* 26(12): 1251-1263.
- Bates, R.L. & Jackson, J.A. 1987. *Glossary of Geology*. Alexandria, Virginia: American Geological Institute. p. 788.
- Ben Slimane, A., Raclot, D., Evrard, O., Sanaa, M., Lefèvre, I. & Le Bissonnais, Y. 2015. Relative contribution of rill/interrill and gully/channel erosion to small reservoir siltation in mediterranean environments. *Land Degradation & Development* 27(3): 785-797. DOI: 10.1002/ldr.2387.
- Beven, K.J. & Kirkby, M.J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24: 43-69.
- Borga, M., Tonelli, F., dalla Fontana, G. & Cazorzi, F. 2005. Evaluating the influence of forest roads on shallow landsliding. *Ecol. Model.* 187: 85-98.
- Bromley, D.W. 1971. The use of discriminant analysis in selecting rural development strategies. *American Journal of Agricultural Economics* 53(2): 319-322.
- Budimir, M.E.A., Atkinson, P.M. & Lewis, H.G. 2015. A systematic review of landslide probability mapping using logistic regression. *Landslides* 12(3): 419-436.

- Bui, D.T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I. & Dick, O.B. 2012. Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh Province of Vietnam: A comparison of the Levenberg Marquardt and Bayesian regularized neural networks. *Geomorphology* doi:10.1016/j.geomorph.
- Caniani, D., Pascale, S., Sdao, F. & Sole, A. 2007. Neural networks and landslide susceptibility: A case study of the urban area of Potenza. *Natural Hazards* 45: 55-72.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. & Reichenbach, P. 1995. GIS technology in mapping landslide hazard. *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Netherlands: Springer. pp. 135-175.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V. & Reichenbach, P. 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms* 16(5): 427-445.
- Carro, M., de Amicis, M., Luzi, L. & Marzorati, S. 2003. The application of predictive modeling techniques to landslides induced by earthquakes, the case study of the 26 September 1997 Umbria-Marche Earthquake (Italy). *Eng. Geol.* 69: 139-159.
- Cevik, E. & Topal, T. 2003. GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Geology* (44): 949-962.
- Chapin, F.S. & Kaiser, E.J. 1979. *Urban Land Use Planning*. Urbana: University of Illinois Press.
- Chen, H., Lin, G.W., Lu, M.H., Shih, T.Y., Horng, M.J. & Wu, S.J. 2011. Effects of topography, lithology, rainfall and earthquake on landslide and sediment discharge in mountain catchments of Southeastern Taiwan. *Geomorphology* 133: 132-142.
- Choi, J., Oh, H.J., Won, J.S. & Lee, S. 2010. Validation of an artificial neural network model for landslide susceptibility mapping. *Environmental Earth Sciences* 60(3): 473-483. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0188-0>.
- Chung, C.J.F., Fabbri, A.G. & Van Westen, C.J. 1995. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Netherlands: Springer. pp. 107-133.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C. & Vescovi, P. 2002. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology* 48(4): 349-364.
- Conforti, M., Aucelli, P.P., Robustelli, G. & Scarciglia, F. 2011. Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (northern Calabria, Italy). *Nat. Hazards*. 56(3) 881-898.
- Dahal, R.K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S. & Paudyal, P. 2008. Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weight of evidence. *Geomorphology* 102: 496-510.
- Dai, F.C. & Lee, C.F. 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42(3): 213-228.
- Dai, F.C. & Lee, C.F. 2001. Frequency volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Eng. Geol.* 59(3-4): 253-266.
- Dong, J.J., Tsao, C.C., Yang, C.M., Wu, W.J., Lee, C.T., Lin, M.L., Zhang, W.F., Pei, X.J., Wang, G.H. & Huang, R.Q. 2017. The geometric characteristics and initiation mechanisms of the earthquake-triggered Daguangbao landslide. In *Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls*, edited by Hazarika, H., Kazama, M. & Lee, W. Tokyo: Springer. hlm. 203-213.
- Dragicevic, S., Lai, T. & Balram, S. 2015. GIS-based multicriteria evaluation with multiscale analysis to characterize urban landslide susceptibility in data-scarce environments. *Habitat International* 45: 114-125.
- Ercanoglu, M. & Gokceoglu, C. 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental Geology* 41(6): 720-730.
- Fatimah Shafinaz, A. 2005. Penggunaan sistem maklumat geografi untuk meramal keruntuhan cerun di Pulau Pinang. Tesis Ijazah Sarjana Kejuruteraan Awam Universiti Teknologi Malaysia (Tidak diterbitkan).
- Field, A. 2009. *Discovering Statistics using SPSS*. 3rd ed. Los Angeles: SAGE Publications Ltd.
- Frattoni, P., Crosta, G., Carrara, A. & Agliardi, F. 2008. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically based approaches. *Geomorphology* 94: 419-437.
- Gerrard, A.J. 1981. Soil and landforms: An integration of geomorphology and pedology. Department of Geography, University of Birmingham (Unpublished).
- Gessesse, B., Bewket, W. & Brauning, A. 2015. Model-based characterization and monitoring of runoff and soil erosion in response to land use/land cover changes in the Modjo watershed, Ethiopia. *Land Degrad. Dev.* 26: 711-724. doi: 10.1002/ldr.2276.
- Gigovic, L., Drobnjak, S. & Pamucar, D. 2019. The application of the hybrid GIS spatial multi-criteria decision analysis best-worst methodology for landslide susceptibility mapping. *International Journal of Geo-Information (ISPRS)* 8(79): 1-29.
- Gokceoglu, C., Sonmez, H. & Ercaglu, M. 2000. Discontinuity controlled probabilistic slope failure risk maps of the Altindag (settlement) region in Turkey. *Engineering Geology* 55: 227-296.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P. & Foltz, R.B. 2000. Spatial prediction of landslide hazard using discriminant analysis and GIS. *GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop Applications for the 21st Century*. Denver, Colorado. September 25-27.
- Guo, C., Montgomery, D.R., Zhang, Y., Wang, K. & Yang, Z. 2015. Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China. *Geomorphology* 248: 93-100.
- Guo-liang, D., Zhang, Y.S. & Iqbal, J. 2017. Landslide susceptibility mapping using an integrated model of information value method and logistic regression in the Bailongjiang watershed, Gansu Province, China. *Journal of Mountain Science* 14(2): 249-268. DOI: 10.1007/s11629-016-4126-9.
- Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F. & Cardinali, M. 2006. Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6: 115-131.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. & Reichenbach, P. 1999. Landslide evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31: 181-216.
- Guzzetti, F., Cardinali, M. & Reichenbach, P. 1994. The AVI Project: A bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy. *Environmental Management* 18(4): 623-633.
- Gupta, S.K., Shukla, D.P. & Thakur, M. 2018. Selection of weightages for causative factors used in preparation of

- landslide susceptibility zonation (LSZ). *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 9(1): 471-487.
- Hair, J.F., Anderson, E.R., Tatham, R.L. & Black, W.C. 1992. *Multivariate Data Analysis with Reading*. Edisi Ketiga. New York: Macmillan Publishing Company.
- Haregeweyn, N., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., Vente, J., Nyssen, J., Deckers, J. & Moeyersons, J. 2013. Assessing the performance of a spatially distributed soil erosion and sediment delivery model (watem/sedem) in Northern Ethiopia. *Land Degrad. Develop.* 24: 188-204. doi:10.1002/ldr.1121.
- Hong, H., Naghibi, S.A., Dashtpagerdi, M.M., Pourghasemi, H.R. & Chen, W. 2017. A comparative assessment between linear and quadratic discriminant analyses (LDA-QDA) with frequency ratio and weights-of-evidence models for forest fire susceptibility mapping in China. *Arab. J. Geosci.* 10: 167.
- Hong, H., Pourghasemi, H.R. & Pourtaghi, Z.S. 2016. Landslide susceptibility assessment in Lianhua County (China): A comparison between a random forest data mining technique and bivariate and multivariate statistical models. *Geomorphology* 259: 105-118.
- IBM. 2016. Discriminant Analysis. http://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSLVMB_22.0.0/com.ibm.spss.statistics.help/spss/base/idh_disc.htm.
- Ibrahim Komoo. 1989. Engineering Geology of Kuala Lumpur, Malaysia. *Proc. Int. Conf. Eng. Geology in Tropical Terrain*. Kuala Lumpur. hlm. 262-273.
- Ibrahim Abdullah & Juhari Mat Akhir. 1990. *Basic Dictionary of Geological Terms*. Bangi: Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Jaafari, A., Najari, A., Rezaeian, J., Sattarian, A. & Ghajar, I. 2015. Planning road network in landslide-prone areas: A case study from the Northern Forests of Iran. *Land Use Policy* 47: 198-208.
- Jaafari, A., Najafi, A., Rezaeian, J. & Sattarian, A. 2014. Modeling erosion and sediment delivery from unpaved roads in the north mountainous forest of Iran. *GEM - Int. J. Geomath.* 6(2): 343-356.
- Jabatan Perangkaan Malaysia. 2013. *Maklumat Asas Negeri Pulau Pinang*. Jabatan Pemetaan Malaysia.
- Kai, X., Qiang, G., Zhengwei, L., Jie, X., Yanshan, Q. & Chunfang, K. 2015. Landslide susceptibility evaluation based on BPNN and GIS: A Case of Guojiaba in The Three Gorges Reservoir Area. *International Journal of Geographical Information Science* 29(7): 1111-1124.
- Kanungo, D.P., Arora, M.K., Sarkar, S. & Gupta, R.P. 2006. A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. *Engineering Geology* 85: 347-366.
- Kazmi, D., Qasim, S., Harahap, I.S.H., Baharom, S., Imran, M. & Moin, S. 2016. A study on the contributing factors of major landslides in Malaysia. *Civil Engineering Journal* 2(12): 669-678.
- Klecka, W. 1980. *Discriminant Analysis*. California: Sage Publication.
- Klose, M., Gruber, D., Damn, B. & Gerold, G. 2014. Spatial databases and GIS as a tools for regional landslide susceptibility modeling. *Zeitschrift für Geomorphologie* 58(1): 1-36.
- Komac, M. 2006. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphology* 74(1): 17-28.
- Kou, M., Jiao, J., Yin, Q., Wang, N., Wang, Z., Li, Y. & Cao, B. 2016. Successional trajectory over 10 years of vegetation restoration of abandoned slope croplands in the hill-gully region of the loess plateau. *Land Degradation & Development* 27(4): 919-932.
- Lamelas, M.T., Marinoni, O., Hoppe, A. & Riva, J. 2008. Doline probability map using logistic regression and GIS technology in the central Ebro Basin (Spain). *Environ. Geol.* 54(5): 963-977.
- Lan, H.X., Zhou, C.H., Wang, L.J., Zhang, H.Y. & Li, R.H. 2004. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Engineering Geology* 76(1): 109-128.
- Lee, S. & Pradhan, B. 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* 4: 33-41.
- Lee, S. & Pradhan, B. 2006. Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia. *Journal of Earth System Science* 115(6): 661-672.
- Lee, S. & Jamsi, A.T. 2005. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environ. Geol.* 47: 982-990.
- Lee, S. & Min, K. 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Env. Geol.* 40: 1095-1113.
- Leoi, S., Chan, A. & Trisha, N. 2018. Malaysia among countries especially prone to landslides. *The Star*. 4 Dec.
- Lin, H.M., Chang, S.K., Wu, J.H. & Juang, C.H. 2009. Neural network-based model for assessing failure potential of highway slopes in the Alishan, Taiwan Area: Pre- and post-earthquake investigation. *Engineering Geology* 104(3-4): 280-289.
- Lin, M.L., Lin, S.C. & Lin, Y.C. 2016. Review of landslide occurrence and climate change in Taiwan. In *Slope Safety Preparedness for Impact of Climate Change*, edited by Ho, K., Lacasse, S. & Picarelli, L. London: CRC Press. hlm. 409-436. 10.1201/9781315387789-14.
- Mark, R.K. & Ellen, S.D. 1995. Statistical and simulation models for mapping debris-flow hazard. In *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Netherlands: Springer. pp. 93-106.
- Montgomery, C.W. 1997. *Env. Geol.* 5th ed. New York: WCB McGraw-Hill Co.
- Moore, I.D. & Gallant, J.C. 1991. Overview of hydrologic and water quality modeling. *Modeling the Fate of Chemicals in the Environmental*, edited by Moore, I.D. Canberra: Center for Resource and Environmental Studies, the Australian National University. hlm. 1-8.
- Morrison, D.G. 1967. On the interpretation of discriminant analysis. *Journal of Marketing Research* 6(2): 156-163.
- Moses, C. & Robinson, D. 2011. Chalk coast dynamics: Implications for understanding rock coast evolution. *Earth-Science Reviews* 109(3-4): 63-73.
- Mustafa Kamal. 2007. Climate change - Its effects on the agricultural sector in Malaysia. Paper presented at *National Seminar on Socio-Economic Impact of Extreme Weather and Climate Change*, organized by the Ministry of Science, Technology and Innovation, Putrajaya, Malaysia. 21- 22 June.
- Mwaniki, M.W., Moeller, M.S. & Schellmann. 2015. A comparison of Landsat (OLI) and landsat & (ETM+) in mapping geology and visualizing lineament: A case study of central region Kenya. *International Symposium on Remote Sensing of Environment*. 11-15 May, Berlin, Germany.
- Nagarajan, R., Roy, A., Kumar, R.V., Mukherjee, A. & Khire, M.V. 2000. Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bull. of Eng. Geol. and Env.* 58(4): 275-287.

- Nandi, A. & Shakoor, A. 2010. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Eng. Geol.* 110(1-2): 11-20.
- Nicholas, K.C. 1995. *Geohazards: Natural and Human*. New Jersey: Prentice Hall.
- Norusis, M.J. 1993. *SPSS: SPSS for Windows, Base System User's Guide Release 6.0*. SPSS Inc.
- Nuriah, A.M., Ruslan, R. & Wan, M.M.W.I. 2018. Pemodelan ruangan pelbagai jenis kegagalan cerun menggunakan rangkaian saraf buatan (ANN) di Pulau Pinang, Malaysia. *Jurnal Teknologi* 80(4): 135-146.
- Nuriah, A.M., Ruslan, R. & Wan, M.M.W.I. 2017. Pemodelan ruangan pelbagai jenis kegagalan cerun di Pulau Pinang menggunakan kaedah nisbah kekerapan. *Geografi* 5(2): 13-26.
- Nuriah, A.M., Ruslan, R. & Wan, M.M.W.I. 2016. Analisis taburan dan corak ruangan pelbagai jenis kegagalan cerun di Pulau Pinang, Malaysia. *International Journal of Environment, Society and Space* 4(2): 1-15.
- Ohlmacher, G.C. & Davis, J.C. 2003. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansa, USA. *Eng. Geol.* 2157: 1-13.
- Oh, H.J. & Pradhan, B. 2011. Application of a neuro-fuzzy model to landslide susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area. *Comput. Geosci.* 37: 1264-1276.
- Pachauri, A.K., Gupta, P.V. & Chander, R. 1998. Landslide zoning in a part of the Garhwal Himalayas. *Environ. Geol.* 36(3-4): 325-334.
- Pham, B.T., Tien Bui, D., Pourghasemi, H.R., Indra, P. & Dholakia, M.B. 2017. Landslide susceptibility assessment in the Uttarakhand area (India) using GIS: A comparison study of prediction capability of naïve bayes, multilayer perceptron neural networks, and functional trees methods. *Theor. Appl. Climatol.* 128: 255-273.
- Piegari, E., Cataudella, V., Di Maio, R., Milano, L., Nicodemi, M. & Soldovieri, M.G. 2009. Electrical resistivity tomography and statistical analysis in landslide modelling: A conceptual approach. *Journal of Applied Geophysics* 68(2): 151-158.
- Peng, M. & Zhang, L.M. 2012. Breaching parameters of landslide dams. *Landslides* 9(1): 13-31.
- Petley, D. 2017a. George Town: Another serious landslide in Penang. *The Landslide Blog - AGU Blogosphere*. 5 November 2017. Diakses pada 1 April 2019.
- Petley, D. 2017b. The Tanjung Bungah landslide: A very challenging site. *The Landslide Blog - AGU Blogosphere*. 24 Oktober 2017. Diakses pada 1 April 2019.
- Petley, D. 2018. George Town: Another major fatal landslide in Penang, Malaysia. *The Landslide Blog - AGU Blogosphere*. 24 Oktober 2018. Diakses pada 1 April 2019.
- Pourghasemi, H.R., Jirandeh, A.G., Pradhan, B., Xu, C. & Gokceoglu, C. 2013. Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran. *Journal of Earth System Science* 122(2): 349-369.
- Pourtaghi, Z.S. & Pourghasemi, H.R. 2014. GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the birjand township, southern Khorasan province, Iran. *Hydrogeol. J.* 22(3): 643-662.
- Pradhan, B. 2010. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. *Advances in Space Research* 45(10): 1244-1256.
- Pradhan, B. & Buchroithner, M.F. 2010. Comparison and validation of landslide susceptibility maps using an artificial neural network model for three test areas in Malaysia. *Environmental & Engineering Geoscience* 16(2): 107-126.
- Pradhan, B., Lee, S., Mansor, S., Buchroithner, M., Jamaluddin, M. & Khujaimah, Z. 2008. Utilization of optical remote sensing data and geographic information system tools for regional landslide hazard analysis by using binomial logistic regression model. *J Appl Remote Sens* 2: 1-11.
- Raja, N.B., Cicek, I., Turkoglu, N., Aydin, O. & Kawasaki, A. 2017. Landslide susceptibility mapping of the Sera River Basin using logistic regression model. *Nat. Hazards*. 85: 1323-1346.
- Ramos-Canon, A.M., Prada-Sarmiento, L.F., Trujillo-Vela, M.G., Macías, J.P. & Santos-R, A.C. 2016. Linear discriminant analysis to describe the relationship between rainfall and landslides in Bogotá, Colombia. *Landslides* 13: 671-681.
- Romeo, R. 2000. Seismically induced landslide displacements: A predictive model. *Eng. Geol.* 58: 337-351.
- Rece, A. & Capolongo, D. 2002. Probabilistic modeling of uncertainties in earthquake-induced landslide hazard assessment. *Comput. Geosci.* 28: 735-749.
- Sahoo, S. 2009. A semi quantitative landslide susceptibility assessment using logistic regression model and rock mass classification system: Study in a part of Uttarakhand Himalaya, India. Thesis Master of Science. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede the Netherlands (Tidak diterbitkan).
- Sarkar, S. & Kanungo, D.P. 2004. An integrated approach for landslide susceptibility mapping using remote sensing and GIS. *Photogram Eng. Remote Sensing* 70(5): 617-625.
- Sharma, L.P., Patel, N., Ghose, M.K. & Debnath, P. 2014. Application of frequency ratio and likelihood ratio model for geo-spatial modelling of landslide hazard vulnerability assessment and zonation: A case study from the Sikkim Himalayas in India. *Geocarto International* 29(2): 128-146.
- Shou, K.J. & Yang, C.M. 2015. Predictive analysis of landslide susceptibility under climate change conditions - A study on the Chingshui River Watershed of Taiwan. *Engineering Geology* 192: 46-62.
- Simon, N., Juhari Mat Akhir, Azlikamil Napiyah & Kee, T.H. 2009. Pemetaan potensi bencana tanah runtuh menggunakan faktor penilaian bencana tanah runtuh dengan pendekatan GIS. *Geological Society of Malaysia* 55: 47-53.
- Suzen, M.L. & Kaya, B.S. 2011. Evaluation of environmental parameters in logistic regression models for landslide susceptibility mapping. *International Journal of Digital Earth* 5: 338-355.
- Suzen, M.L. & Doyuran, V.A. 2004. Comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: Multivariate versus bivariate. *Environ. Geol.* 45: 665-679.
- Tjia, H.D. 1987. *Geomorfologi*. Kuala Lumpur: Dewan Bahasa dan Pustaka.
- Tsangaratos, P. & Ili, I. 2016. Landslide susceptibility mapping using a modified decision tree classifier in the Xanthi Perfection, Greece. *Landslides* 13: 305-320.
- Tunusluoglu, M.C., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A. & Sonmez, H. 2008. Extraction of potential debris source areas by logistic regression technique: A case study from Barla, Besparmak and Kapi Mountains (NW Taurids, Turkey). *Environ. Geol.* 54(1): 9-22.
- Vahidnia, M.H., Alesheikh, A.A., Alimohammadi, A. & Hosseinali, F. 2010. A GIS-based neuro-fuzzy procedure for integrating knowledge and data in landslide susceptibility mapping. *Comput. Geosci.* 36: 1101-1114.

- Van Westen, C.J., Rengers, N. & Soeters, R. 2003. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Nat. Hazards* 30: 399-413.
- Wang, H.B. & Sassa, K. 2005. Comparative evaluation of landslide susceptibility in Minamata area, Japan. *Environmental Geology* 47(7): 956-966.
- Wan Mohd Muhiyuddin, W.I. 2005. Pembentukan model ruangan kegagalan cerun bagi sub lembangan hulu Sungai Langat. Tesis PhD. Universiti Sains Malaysia (Tidak diterbitkan).
- Yalcin, A. 2008. GIS-Based landslides susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistic in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. *Catena*. 72(1): 1-12.
- Yalcin, A. & Bulut, F. 2007. Landslide susceptibility mapping using gis and digital photogrammetric techniques: A case study from Ardesen (NE-Turkey). *Nat. Hazards* 41: 201-226.
- Yesilnacar, E. & Topal, T. 2005. Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology* 79: 251-266.
- Youssef, A.M., Pradhan, B., Gaber, A.F.D. & Buchroithner, M.F. 2009. Geomorphological hazard analysis along the Egyptian red sea coast between Safaga and Quseir. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9(3): 751-766.
- Zeze, J.L., Pereira, S., Tavares, A.O., Bateira, C., Trigo, R.M., Quaresma, I., Santos, P.P., Santos, M. & Verde, J. 2014. Disaster: A GIS database on hydro-geomorphologic disasters in Portugal. *Nat. Hazards* 72: 503-532.
- Zhou, G., Esaki, T., Mitani, Y., Xie, M. & Mori, J. 2003. Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach. *Engineering Geology* 68(3): 373-386.

Nuriah Abd Majid*
 Institut Alam Sekitar dan Pembangunan (LESTARI)
 Universiti Kebangsaan Malaysia
 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
 Malaysia

Ruslan Rainis
 Bahagian Geografi, Pusat Pengajian Ilmu kemanusiaan
 Universiti Sains Malaysia
 11800 USM Penang, Pulau Pinang
 Malaysia

*Corresponding author; email: nuriah@ukm.edu.my

Received: 28 September 2018

Accepted: 22 April 2019