

# Model Prediksi Gerakan Tanah dengan Ambang Hujan

*A Prediction Model of Landslide Based a Rainfall Threshold*

**Dio Fairuz Akhbar, Agus Setyo Muntohar**

*Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*

**Abstrak.** Tanah longsor merupakan salah satu bencana alam yang sering terjadi di Indonesia dikarenakan negara tersebut berada di wilayah cincin api. Tanah longsor dapat diprediksi dengan pemodelan empirik ambang hujan yang digunakan sebagai sistem peringatan dini. Model ambang yang digunakan sebagai sistem peringatan dini longsor perlu dilakukan validasi agar diketahui tingkat keakuratan ambang hujan dalam memprediksi kejadian hujan yang memicu longsor dan tidak longsor. Penelitian ini menggunakan pendekatan model empirik intensitas hujan – durasi (*Intensity – Duration/ID*) dan memakai 220 data hujan pemicu longsor berbasis satelit TRMM yang tersebar di wilayah Indonesia. Intensitas hujan anteseden dan lama waktu hujan anteseden digunakan dalam pemodelan ambang hujan ini. Ambang hujan dievaluasi menggunakan metode analisis ROC. Metode ini menggunakan tujuh indek statistik dan kurva ROC dalam menentukan tingkat keakuratan ambang hujan. Dari hasil penelitian diperoleh persamaan empirik  $I = 9.65D^{-0.505}$  dengan nilai intensitas hujan prediksi yang dihasilkan semakin rendah bahkan mendekati nol pada interval waktu 1 – 30 hari. Hasil analisis ROC pada ambang hujan menunjukkan bahwa model memiliki tingkat keakuratan yang cukup bagus dan dapat digunakan sebagai sistem peringatan dini tanah longsor meskipun masih memiliki tingkat kesalahan yang cukup besar.

Kata-kata kunci: Tanah longsor, sistem peringatan dini, ambang hujan, analisis ROC, tingkat keakuratan.

**Abstract.** Landslide is one of the natural disasters are common in Indonesia because the country is in the ring of fire. Landslides can be predicted by the empirical modeling of threshold rainfall that are used as early warning system. In order to model of threshold can be used as early warning system of landslide, it is necessary to validate to know the accuracy level of rainfall threshold in predicting the incidence of rainfall that triggered landslides and not a landslide. In this study, modeling was done with model empirical (intensity – duration/ID) approach using the 220 data of rainfall that triggered landslide with satellite-based TRMM in the territory of Indonesia. The intensity of the antecedent rainfall and the duration of antecedent rainfall used in modelling of rainfall threshold. Rainfall threshold is validated with ROC analysis. This method uses seven index statistic and ROC curve to determine the accuracy rate of the rainfall threshold. The results obtained empirical equation  $I = 9.65D^{-0.505}$  with value of rainfall intensity prediction generated increasingly low even close to zero in the interval time 1 – 30 days. The results of the analysis of the ROC on the rainfall threshold is indicate that the model has a pretty good accuracy rate and can be used as early warning system of landslide even though it still has a fairly large error rate.

Keywords: Landslide, early warning system, rainfall threshold, ROC analysis, accuracy rate

## 1. Pendahuluan

Tanah longsor adalah salah satu bencana alam yang sering terjadi di negara tropis salah satu di Indonesia. Salah satu pemicu terjadinya tanah longsor adalah curah hujan yang sangat tinggi. Tingginya curah hujan dapat menyebabkan kondisi tanah menjadi tidak stabil dan menyebabkan keruntuhan lereng. Curah hujan pemicu tanah longsor dapat diprediksi menggunakan pemodelan ambang hujan yang digunakan dalam sistem peringatan dini. Pemodelan ambang hujan dibuat dengan

mengevaluasi intensitas hujan dan durasi hujan dari data *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) berbasis *Multi Satellite Precipitation Analysis* (TMPA) (Mathew et al., 2014). Setiap model ambang yang dibuat memiliki tingkat keakuratan dalam memprediksi kejadian tanah longsor yang berbeda-beda. Sehingga sering dilakukan evaluasi model ambang dengan beberapa metode, salah satunya analisis ROC.

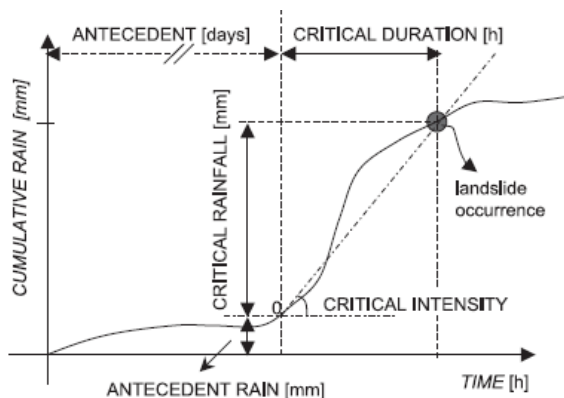
Kejadian hujan yang memicu tanah longsor terbagi menjadi dua kategori yaitu hujan kritis dan anteseden. Gambar 1 menampilkan kejadian hujan yang dapat



memicu tanah longsor (Aleotti, 2004). Hujan kritis adalah jumlah curah hujan yang mengalami peningkatan intensitas hujan yang drastis dan dapat memicu longsor. Hujan kritis dapat menjadi pemicu tanah longsor apabila curah hujan yang dihasilkan sangat besar melebihi batas maksimum. Sedangkan hujan anteseden merupakan kejadian hujan berturut-turut yang diukur dari sebelum kejadian hujan kritis hingga awal terjadinya hujan. Hujan anteseden dapat menjadi pemicu longsor jika permeabilitas tanah rendah. Kedua jenis hujan tersebut dapat dijadikan sebagai parameter dalam menentukan model ambang hujan. Tetapi pengukuran hujan anteseden dalam pemodelan ambang merupakan cara yang lebih sederhana daripada dengan hujan kritis. Pengukuran hujan pemicu longsor ditentukan dengan pendekatan model empirik (*empirical based model*) dengan membuat sebuah kurva empirik (*ID – Curve*) dan menghasilkan sebuah persamaan empirik (Aleotti, 2004; Guzzetti et al., 2007; Muntohar, 2009).

Setiap model ambang hujan yang dibuat perlu dievaluasi agar diketahui tingkat akurasi ambang dalam memprediksi kejadian tanah longsor akibat hujan. Tingkat akurasi tersebut dapat ditentukan dengan metode analisis ROC. Metode ini menggunakan nilai indeks statistik dan kurva ROC yang mewakili tingkat akurasi dari model ambang hujan (Fawcett, 2006; Zou et al., 2007).

Penelitian ini merupakan pengembangan dari sebelumnya yang dilakukan oleh Rohmaniah (2017). Tujuan utama penelitian ini untuk menentukan model empirik ambang hujan berdasarkan intensitas hujan anteseden dan durasi. Model empirik tersebut dievaluasi tingkat akurasinya dengan metode analisis



Gambar 1 Parameter hujan pemicu longsor (Aleotti, 2004)

ROC. Dengan demikian, model ambang hujan dapat digunakan sebagai sistem peringatan dini tanah longsor.

## 2. Pengumpulan Data dan Analisis

### Data Kejadian Longsor

Data yang digunakan pada penelitian ini menggunakan 100 lokasi kejadian longsor yang sudah digunakan sebelumnya oleh saudari Rohmaniah (2017) dan dilakukan penambahan data kejadian longsor sebanyak 120 lokasi pada interval waktu 2010-2018 sehingga total data yang digunakan adalah 220 data kejadian longsor. Data kejadian longsor yang dibutuhkan meliputi lokasi kejadian, tanggal kejadian dan koordinat lokasi kejadian. Lokasi dan tanggal kejadian longsor diperoleh melalui situs laporan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), Pusat Krisis Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, surat kabar dan sumber daring. Sedangkan untuk koordinat lokasi kejadian diperoleh dengan *Google Earth*.

Persebaran lokasi kejadian longsor dapat dilihat pada Gambar 2. Kejadian longsor di wilayah Indonesia sering terjadi di pulau Jawa dan Sumatera. Sedangkan untuk wilayah Kalimantan, Sulawesi, Papua dan Ambon sangat jarang terjadi tanah longsor.

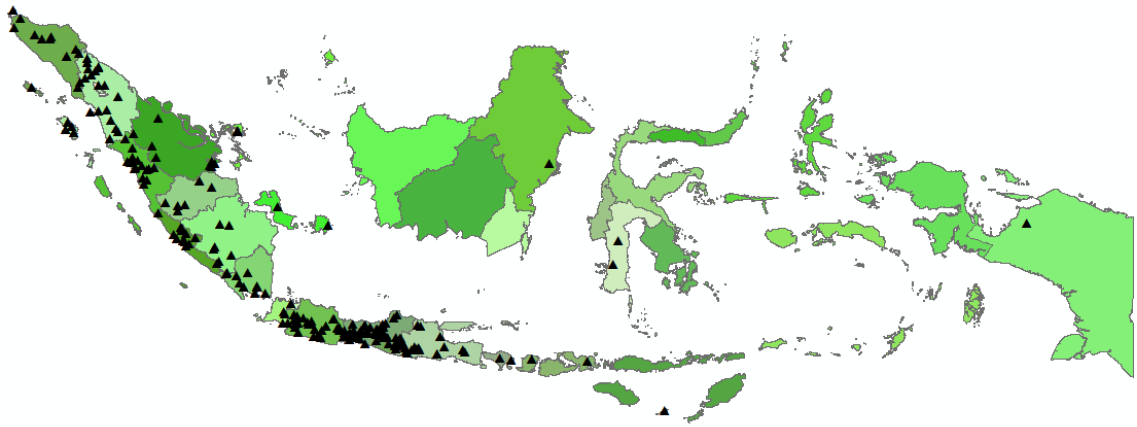
### Data Curah Hujan

Penelitian ini menggunakan data rekaman curah hujan berkala / *time series*, yaitu data hujan yang dikumpulkan dari waktu ke waktu yang bertujuan untuk menggambarkan suatu perkembangan peristiwa hujan tersebut. Data curah hujan diperoleh melalui satelit *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) dari NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) yang diunduh melalui situs <http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.

### Pengukuran Hujan Anteseden dan Kritis

Parameter yang digunakan dalam memodelkan ambang hujan anteseden yaitu intensitas dan durasi hujan anteseden, akan tetapi intensitas dan durasi hujan kritis juga perlu ditentukan agar diketahui nilai intensitas hujan di hari terjadinya longsor. Gambar 3 menyajikan penentuan parameter-parameter tersebut. Grafik batang berwarna putih adalah intensitas hujan dan grafik berwarna hitam adalah intensitas hujan kumulatif yang terjadi





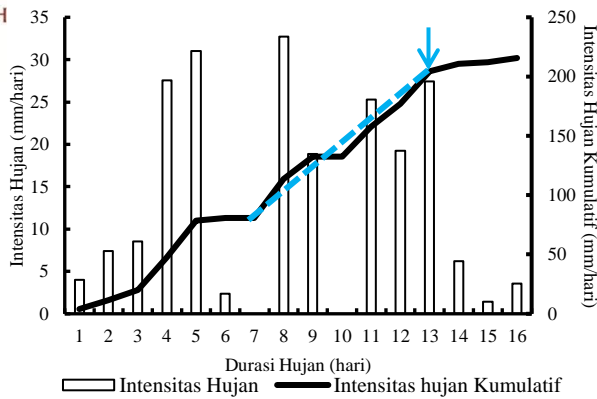
Gambar 2 Peta sebaran lokasi kejadian longsor

dari tanggal 01/09/2013 hingga 16/09/2013. Sedangkan, tanda panah berwarna biru menunjukkan hari kejadian longsor pada bulan tersebut. Tanggal 1/09/2013 sampai 06/09/2013 dianggap sebagai hujan anteseden dan tanggal 07/09/2013 sampai 13/09/2013 dianggap sebagai hujan kritis.

$$I_{at} = \frac{R_{at}}{D_{at}} \quad (1)$$

$$I_{cr} = \frac{R_{cr}}{D_{cr}} \quad (2)$$

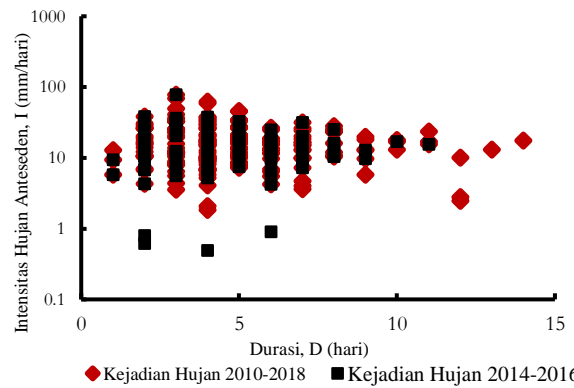
Hubungan antara nilai intensitas hujan anteseden dan lama waktu hujan anteseden inilah yang akan digunakan dalam pemodelan ambang hujan anteseden yang dapat dilihat pada Gambar 4. Hasil grafik merupakan Persebaran kejadian hujan yang memicu longsor pada tahun 2014-2016 dan tahun 2010-2018.



Gambar 3 Grafik hubungan intensitas hujan dan durasi hujan

### Pemodelan Empirik Ambang Hujan Anteseden

Pemodelan empirik dapat dilakukan ketika seluruh data curah hujan pada tiap kejadian longsor sudah dibuat grafik intensitas hujan kumulatif dan diperoleh perubahan nilai curah hujan anteseden ( $R_{at}$ ), perubahan nilai curah hujan kritis ( $R_{cr}$ ), lama waktu hujan anteseden ( $D_{at}$ ) dan lama waktu hujan kritis ( $D_{cr}$ ). Keempat parameter tersebut akan digunakan untuk menentukan nilai intensitas hujan anteseden ( $I_{at}$ ) dan intensitas hujan kritis ( $I_{cr}$ ) menggunakan persamaan 1 dan persamaan 2.



Gambar 4 Titik data semua lokasi untuk kurva empirik hujan anteseden

Dari 220 grafik intensitas hujan kumulatif kejadian longsor kemudian diolah untuk digunakan dalam model empirik. Pemodelan dibuat menjadi suatu kurva yang dikenal sebagai *I-D Curve*. Kurva empirik (*I-D Curve*) dibuat menggunakan analisis regresi dengan menentukan batas terendah pada kurva berdasarkan sebaran titik data. Setelah itu, ditentukan persamaan empirik dengan analisis

regresi pada kurva ambang hujan. Persamaan yang digunakan dalam analisis regresi pada kurva ambang hujan bawah dapat dilihat pada persamaan 3 (Guzzetti et al., 2007).

$$I = c + \alpha \cdot D^\beta \quad (3)$$

Dimana, I adalah intensitas hujan, D adalah lama waktu hujan. Sedangkan, c,  $\alpha$ , dan  $\beta$  adalah parameter empirik.

### Analisis ROC

Analisis ROC (*Receiver Operating Characteristic*) metode untuk menggambarkan, mengatur dan mengklasifikasikan beberapa kategori yang ditentukan pada sebuah model statistik berdasarkan kinerjanya (Fawcett, 2006; Mathew, 2014; Zou et al., 2007). Penelitian ini menggunakan analisis ROC dalam menentukan tingkat keakuratan pada model ambang hujan dalam memprediksi kejadian hujan yang memicu longsor maupun tidak longsor.

### Tabel probabilitas

Tabel probabilitas atau disebut *confusion matrix* merupakan langkah awal dalam menentukan sebuah kondisi dengan membuat sebuah model klasifikasi (*classified*) dan contoh (*instance*). Model klasifikasi dan contoh yang digunakan pada penelitian ini adalah kejadian longsor aktual dan kejadian longsor prediksi. Dari kedua model yang sudah ditentukan dapat dibuat tabel probabilitas yang merupakan hubungan kejadian longsor aktual dengan kejadian longsor prediksi yang ditiap kolom kejadian dibagi menjadi dua kategori yaitu longsor (1) dan tidak longsor (0). Akan tetapi, untuk kejadian prediksi dikategorikan longsor, apabila intensitas hujan (I) lebih besar dari intensitas hujan prediksi ( $I_{pred}$ ) dan dikategorikan tidak longsor jika intensitas hujan (I) lebih kecil dari intensitas hujan prediksi ( $I_{pred}$ ). Tabel 1 menampilkan *confusion matrix* antara kejadian longsor aktual dengan kejadian longsor prediksi yang menghasilkan empat kondisi yang dapat terjadi. *True Positive* terjadi jika curah hujan memicu longsor pada kejadian aktual dan kejadian yang diprediksi (1,1). *True Negative* adalah curah hujan yang terjadi tidak memicu longsor pada kejadian aktual maupun kejadian prediksi (0,0). *False Positive* terjadi jika curah hujan tidak memicu longsor pada kejadian aktual, tetapi menurut

prediksi, hujan dapat memicu longsor (0,1). *False Negative* adalah curah hujan yang terjadi dapat memicu longsor pada kejadian aktual, tetapi menurut prediksi tidak memicu longsor (1,0). *False positive* dan *False negative* juga disebut *Error type I* dan *Error type II* (Frattini, et al., 2010).

Tabel 1 Tabel probabilitas untuk analisis model ambang hujan (Peres dan Cancelliere, 2014)

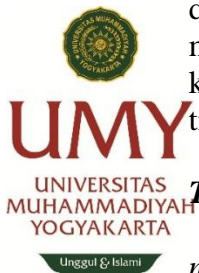
	Kejadian Longsor Aktual		
	Longsor (1)	Tidak longsor (0)	
Kejadian Longsor prediksi	Longsor (I > $I_{pred,1}$ )	<i>True Positive, TP</i>	<i>False Positive, FP</i>
	Tidak longsor (I < $I_{pred,0}$ )	<i>False Negative, FN</i>	<i>True Negative, TN</i>

### Indek statistik

Menurut Frattini et al. (2010) bahwa tingkat akurasi dari model empirik diperoleh melalui analisis statistik antara hasil dari model dan data yang diamati. Dari kedua data tersebut dapat diperoleh nilai indek yang mengukur tingkat keakuratan model empirik dalam memprediksi kejadian longsor.

Terdapat tujuh indek statistik yang digunakan untuk menganalisis tingkat keakuratan model ambang hujan (Fawcett, 2006; Frattini et al, 2010). Tabel 2 menampilkan persamaan – persamaan yang digunakan untuk menentukan indek statistik antara lain:

- (i) *True Positive Rate* menyatakan tingkat kemampuan ambang hujan dalam mengidentifikasi kejadian hujan yang memicu longsor.
- (ii) *False Positive Rate* menyatakan tingkat kesalahan ambang hujan dalam mengidentifikasi kejadian hujan yang tidak memicu longsor.
- (iii) *True Negative Rate* menyatakan tingkat kemampuan ambang hujan dalam mengidentifikasi kejadian hujan yang tidak memicu longsor.
- (iv) *False Negative Rate* menyatakan tingkat kesalahan ambang hujan dalam mengidentifikasi kejadian hujan yang memicu longsor.
- (v) *Positive Prediction Power* menyatakan Pengukuran untuk mengetahui probabilitas



dari kejadian hujan benar-benar dapat memicu longsor.

- (vi) *Negative Prediction Power* menyatakan Pengukuran untuk mengetahui probabilitas dari kejadian hujan benar-benar tidak memicu longsor.
- (vii) *True Skill Statistic* merupakan rasio antara *True Positive Rate* dengan *False Positive Rate*.

Tabel 2 Indek Statistik (dimodifikasi dari Fawcett, 2006; Frattini, et al., 2010)

Indek	Persamaan
<i>True Positive Rate</i>	$TPR = \frac{TP}{TP+FN}$
<i>False Positive Rate</i>	$FPR = \frac{FP}{FP+TN}$
<i>True Negative Rate</i>	$TNR = 1 - FPR$
<i>False Negative Rate</i>	$FNR = 1 - TPR$
<i>Positive Prediction Power</i>	$PPP = \frac{TP}{FP+TP}$
<i>Negative Prediction Power</i>	$NPP = \frac{TN}{FN+TN}$
<i>True Skill Statistic</i>	$TSS = TPR - FPR$



### Kurva ROC

Metode analisis ROC juga dapat mengukur keakuratan dari ambang hujan dalam bentuk kurva ROC. Kurva ini merupakan hubungan antara indek *True Positive Rate* dan *False Positive Rate* yang di tiap titiknya menunjukkan tingkat kemampuan ambang hujan dalam memprediksi kejadian longsor. Tingkat keakuratan tinggi apabila kurva ROC yang dihasilkan bernilai mendekati 1 atau disebut juga *perfect classification*.

### Area Under Curve (AUC)

Area yang berada dibawah kurva merupakan wilayah yang menunjukkan tingkat keakuratan dari model empirik dan dihitung dengan metode perhitungan yang disebut *Area Under Curve* (AUC). AUC merupakan daerah berbentuk persegi yang nilainya selalu berada diantara 0 dan 1. *Random Performance* menghasilkan nilai AUC sebesar 0.5 dikarenakan kurva yang didapatkan berupa garis diagonal antara titik (0,0) dengan titik (1,1). Jika AUC yang dihasilkan < 0.5, maka model statistik yang dievaluasi memiliki tingkat keakuratan yang sangat rendah dan mengindikasikan bahwa model tersebut sangat

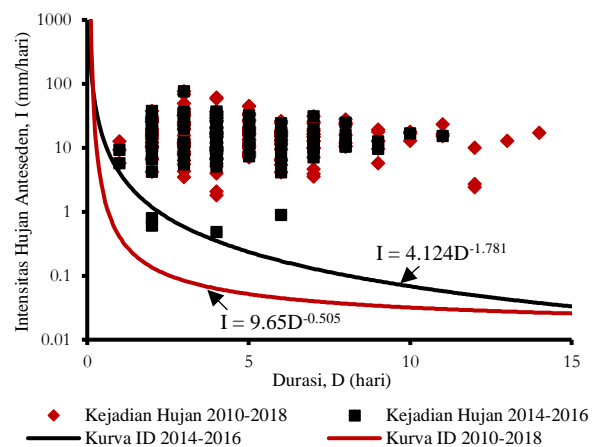
buruk jika digunakan (Fawcett, 2006; Zou et al., 2007).

## 3. Hasil dan Pembahasan

### Model empirik ambang hujan

Kurva ID anteseden menampilkan model ambang hujan dan persamaan empirik yang disajikan pada Gambar 5. Model ambang hujan pada penelitian yang dilakukan oleh Rohmaniah (2017) menggunakan 100 data lokasi kejadian longsor tahun 2014-2016 didapatkan persamaan empirik  $I = 4.124D^{-1.781}$ . Lalu, persamaan empirik dikembangkan dengan menambahkan data lokasi kejadian longsor menjadi 220 data pada interval waktu 2010-2018 dan diperoleh persamaan empirik  $I = 9.65D^{-0.505}$ . Ambang hujan menghasilkan persamaan empirik yang berbeda, pada ambang hujan (2010-2018) menghasilkan persamaan empirik yang lebih tinggi dibandingkan dengan ambang hujan (2014-2016). Model ambang hujan yang dianalisis adalah persamaan empirik dengan 220 data kejadian longsor.

Persamaan empirik dari kurva ID ambang hujan anteseden 2010-2018 menghasilkan intensitas hujan prediksi yang semakin rendah bahkan mendekati nol dengan interval waktu 1 – 30 hari. Hal ini terjadi dikarenakan persamaan didapatkan berdasarkan *Power law decay* yang memberikan prediksi curah hujan kurang dari 1 mm/hari atau mendekati nol jika lama waktu hujan sangat panjang (Muntohar, 2009).



Gambar 5 Kurva ambang hujan anteseden

### Evaluasi ambang hujan dengan analisis ROC

Berdasarkan 220 lokasi kejadian longsor yang tersebar di wilayah Indonesia, diperoleh

5468 kejadian hujan yang diambil dalam kurun waktu 30 hari. Seluruh kejadian hujan dianalisis menggunakan analisis ROC dan diperoleh jumlah kejadian hujan yang menyebabkan longsor (TP), tidak longsor (TN), *Error Type I* (FP) dan *Error Type II* (FN). Jumlah kejadian tersebut disajikan pada Tabel 3. Serta diperoleh indek statistik untuk ambang hujan yang disajikan pada Tabel 4.

Hasil analisis ROC juga disajikan dalam bentuk kurva ROC pada Gambar 6a. Batas bawah kurva (*Area Under Curve*) dari ambang hujan menunjukkan tingkat keakuratan dalam mendeteksi kejadian hujan yang memicu longsor dan tidak longsor sebesar 65 %. Garis diagonal merupakan nilai *Random Performance* sebesar 50 % dengan asumsi sumbu  $y = x$ . Gambar 6b menunjukkan luasan dari Batas bawah kurva (*Area Under Curve*) dan ambang hujan menghasilkan tingkat keakuratan yang cukup bagus dikarenakan hasil yang didapatkan melebihi nilai *Random Performance*.

Tabel 3 Jumlah kejadian TP, TN, FP dan FN

Kejadian	Jumlah kejadian
<i>True Positive</i> (TP)	179
<i>True Negative</i> (TN)	2063
<i>False Positive</i> (FP)	3185
<i>False Negative</i> (FN)	41

Tabel 4 Indek statistik analisis ROC

Indek statistik	Hasil keakuratan
<i>True Positive Rate</i> (TPR)	81 %
<i>False Positive Rate</i> (FPR)	61 %
<i>True Negative Rate</i> (TNR)	39 %
<i>False Negative Rate</i> (FNR)	19 %
<i>Positive Prediction Power</i> (PPP)	5 %
<i>Negative Prediction Power</i> (NPP)	98 %
<i>True Skill Statistic</i> (TSS)	21 %

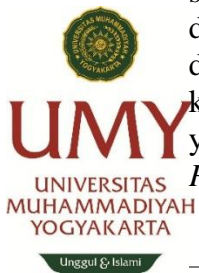
*True Positive Rate* menghasilkan tingkat persentase yang tinggi dalam mengidentifikasi kejadian hujan yang memicu longsor, sehingga nilai *False Negative Rate* rendah. Nilai persentase *True Negative Rate* biasanya > 90 %, yang menyatakan bahwa ambang hujan sangat bagus menghindari kesalahan alarm pada sistem peringatan dini (Rosi et al., 2017). Akan tetapi, *True Negative Rate* pada ambang ini menghasilkan tingkat persentase yang rendah dalam mengidentifikasi kejadian hujan yang tidak memicu longsor, yang dapat

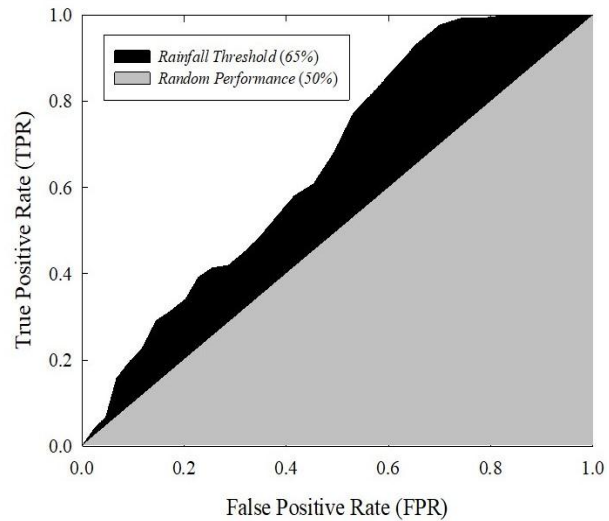
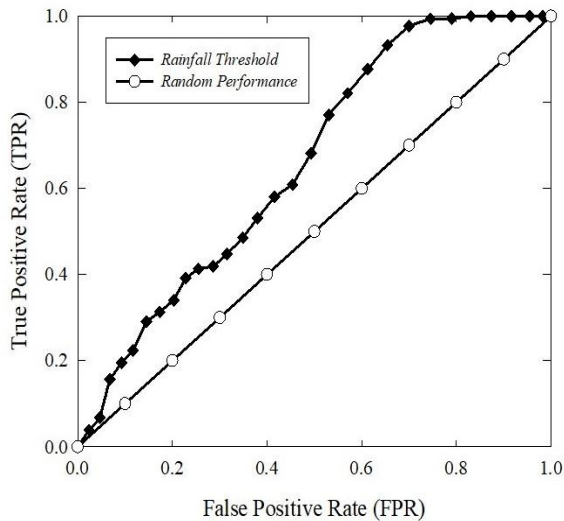
menyebabkan tingkat kesalahan alarm yang besar pada sistem peringatan. Rendahnya nilai TNR disebabkan karena jumlah kejadian *False Positive* yang lebih besar dari pada *True Negative*, Sehingga menyebabkan nilai FPR menjadi besar dan membuat ambang hujan tidak cocok digunakan sistem peringatan untuk kejadian hujan yang tidak memicu longsor. Hal ini dapat terjadi dikarenakan ambang hujan yang ditetapkan, dipengaruhi oleh nilai intensitas hujan prediksi yang tidak pasti sehingga menyebabkan muncul kondisi *False Positive* (Guzzetti et al., 2007).

Nilai PPP yang didapatkan pada ambang hujan sangat rendah. Hal ini menyebabkan peluang ambang hujan mengklasifikasi dengan tepat kejadian hujan yang benar-benar dapat memicu longsor masih sangatlah kecil. Serta, masih ada kemungkinan besar bahwa ambang hujan salah dalam mengklasifikasi kejadian hujan yang dapat memicu longsor meskipun nilai TPR tinggi. Nilai NPP pada umumnya > 90 % dapat dikatakan ambang memiliki probabilitas yang sangat bagus untuk kejadian hujan yang tidak memicu longsor (Rosi et al., 2017). Nilai NPP yang diperoleh pada penelitian ini sangatlah bagus bahkan mendekati 100 %, sehingga peluang ambang hujan dalam mengklasifikasi kejadian hujan yang benar-benar tidak memicu longsor sangat tinggi. Meskipun nilai TNR rendah, tetapi memiliki peluang benar-benar tidak terjadi longsor sangat tepat.

Indek TSS dinyatakan dalam angka interval [0,1], jika TSS = 0 maka TPR = FPR dan TSS = 1 untuk tingkat prediksi yang sempurna apabila TPR = 1 dan FPR = 0 (Peres dan Cancelliere, 2014). Karena nilai *False Positive Rate* tinggi, menyebabkan nilai *True Skill Statistic* (TSS) rendah. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini didapatkan nilai TSS sebesar 0.21 yang artinya ambang hujan masih memiliki tingkat prediksi yang rendah.

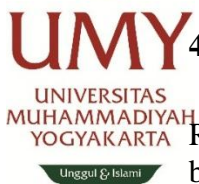
Apabila nilai akurasi yang didapatkan > 50 %, dapat dikatakan bahwa ambang hujan dapat digunakan sebagai sistem peringatan dini (Mathew et al., 2014). Berdasarkan *Area Under Curve* yang diperoleh dari kurva ROC, ambang hujan memiliki keakuratan yang cukup bagus dan dapat digunakan sebagai sistem peringatan





(a) (b)  
Gambar 6 Kurva ROC (a) dan Area Under Curve (b) untuk model ambang hujan

dini tanah longsor meskipun masih memiliki tingkat kesalahan yang cukup besar.



#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan dan analisis ROC yang didapatkan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Ambang hujan (2010-2018) menghasilkan persamaan empirik  $I = 9.65D^{-0.505}$ , lebih tinggi dibandingkan ambang hujan (2014-2016) yang hanya menghasilkan persamaan  $I = 4.124D^{-1.781}$ . Serta, kedua ambang hujan menghasilkan nilai intensitas hujan yang semakin rendah bahkan mendekati nol dengan interval waktu 1 – 30 hari. Penambahan data lokasi kejadian longsor dapat mempengaruhi hasil persamaan yang didapatkan, yang menyebabkan nilai intensitas hujan harian menjadi lebih besar.
2. Model ambang hujan memiliki tingkat akurasi yang cukup bagus dalam memprediksi kejadian hujan yang memicu longsor dan tidak longsor. Dengan demikian dapat digunakan sebagai sistem peringatan dini (*early warning system*).

#### 5. Daftar Pustaka

Aleotti, P., 2004, A warning system for rainfall-induced shallow failures, *Engineering Geology*, 73 (3–4), 247–265.  
Fawcett, T., 2006., An introduction to ROC analysis, *Pattern Recognition Letters*, 27 (8), 861–874.

Frattini, P., Crosta, G. dan Carrara, A., 2010, Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models, *Engineering Geology*, 111 (1–4), 62–72.  
Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. dan Stark, C., P., 2007, Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 267, 239–267.  
Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., Wolff, D.B., Adler, R.F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K.P. dan Stocker, E.F., 2007, The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales, *Journal of Hydrometeorology*, 8 (1), 38–55.  
Mathew, J., Babu, D.G., Kundu, S., Kumar, K.V. dan Pant, C.C., 2014, Integrating intensity-duration-based rainfall threshold and antecedent rainfall-based probability estimate towards generating early warning for rainfall-induced landslides in parts of the Garhwal Himalaya, India, *Landslides*, 11 (4), 575–588.  
Muntohar, A.S, 2009, Proposal Ambang Hujan Untuk Peringatan Dini Tanah Longsor, *Application Research for Disaster and Humanitarian*. Institute Research for Community Development (IRCD), University Club Universitas Gadjah

Mada, Yogyakarta, 19 December 2009, 1 – 22.

Peres, D.J., dan Cancelliere, A., 2014, Derivation and evaluation of landslide-triggering thresholds by a Monte Carlo approach, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18 (12), 4913–4931.

Piciullo, L., Gariano, S.L., Melillo, M., Brunetti, M.T., Peruccacci, S., Guzzetti, F. dan Calvello, M., 2017, Definition and performance of a threshold-based regional early warning model for rainfall-induced landslides, *Landslides*, 14 (3), 995–1008.

Postance, B., Hillier, J., Dijkstra, T. dan Dixon, N., 2017, Comparing threshold definition techniques for rainfall-induced landslides: A national assessment using radar rainfall, *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, 553 – 560.

Reichenbach, P., Cardinali, M., De Vita, P. dan Guzzetti, F., 1998, Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (central Italy),

*Environmental Geology*, 35 (2–3), 146–159.

Rosi, A., Peternel, T., Jemec-aufli, M., Komac, M. dan Casagli, N., 2017, Advancing Culture of Living with Landslides, *World Landslide Forum LJUBLJANA Slovenia EU*, 177 – 182.

Rossi, M., Kirschbaum, D., Luciani, S., Mondini, A.C. dan Guzzetti, F., 2012, TRMM satellite rainfall estimates for landslide early warning in Italy: Preliminary results, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 8523 (2), 11–17.

Su, F., Hong, Y. dan Lettenmaier, D.P., 2008, Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and Its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin, *Journal of Hydrometeorology*, 9 (4), 622–640.

Zou, K.H., O'Malley, A.J. dan Mauri, L., 2007, Receiver-operating characteristic analysis for evaluating diagnostic tests and predictive models, *Circulation*, 115 (5), 654–657.

