



**KAJIAN LAJU INFILTRASI PADA LERENG YANG TERTUTUP ABU VULKANIK  
BERDASARKAN EKSPERIMEN SKALA LABORATORIUM**  
***STUDY ON THE INFILTRATION RATE FOR SLOPE COVERED BY VOLCANIC ASH BASED  
ON A LABORATORY-SCALE EXPERIMENT***

**Joko Nugroho<sup>1)\*</sup> Indratmo Soekarno<sup>2)</sup> F. Tata Yunita<sup>3)</sup> Arno Adi Kuntoro<sup>4)</sup>**

<sup>1,2,4)</sup>Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha No. 10 Bandung, Jawa Barat, Indonesia

<sup>3)</sup>Balai Hidrolika dan Geoteknik Keairan

Jl. Ir. H. Juanda No. 193 Bandung, Jawa Barat, Indonesia

\*correspondence email: [joko@si.itb.ac.id](mailto:joko@si.itb.ac.id)

Diterima: 5 Oktober 2021; Direvisi: 8 Pebruari 2022; Disetujui: 18 Pebruari 2022

**ABSTRACT**

Indonesia has 129 active volcanoes; therefore, the volcanic-related disasters risk is relatively high. Lahar flood is a secondary post-eruption disaster, which is triggered by the rainfall due to the movement of volcanic material by the runoff. After the eruption, there will be some significant changes in the watershed characteristics, especially the land cover, slope, and eruption material. This condition increases the possibility of the lahar flood events. Several studies have indicated an increase in runoff due to volcanic ash deposits on slopes. In this regard, the aim of this research is to understand the effects of volcanic ash layer on the slope on the infiltration rate. The physical model laboratory in the form of a laboratory-scale demonstration plot (demplot) were used, where the parameters reviewed include the slope, the volcanic ash thickness, and the rainfall intensity. The results indicate that the infiltration rate on the slopes covered with volcanic ash decreases with the average decrease in the ratio of infiltration to total rainfall about 1.6% per 1 cm thickness of the volcanic ash layer. In addition, the decrease in infiltration rate per 1 cm thickness of volcanic ash on a slope with a slope of 8° was higher (2.3%), compared to a slope of 15° (0.7%). The Philip's infiltration model fits better with the actual measurement data than the Green-Ampt one. The significant parameter in influencing the infiltration rate of the volcanic ash layer with Philip's model based on sensitivity analysis is sorptivity.

**Keywords:** Infiltration rate, Philip, Green-Ampt, volcanic ash, physical model test.

**ABSTRAK**

Indonesia memiliki 129 gunung berapi aktif, sehingga risiko bencana terkait gunung berapi tinggi. Banjir lahar merupakan bencana sekunder yang terjadi pasca erupsi gunung berapi yang dipicu oleh hujan akibat material erupsi terbawa oleh aliran hujan ke hilir. Pasca erupsi, terjadi perubahan karakteristik Daerah Aliran Sungai (DAS) yang cenderung signifikan, terutama pada tutupan lahan, kemiringan lereng dan material erupsi. Hal ini mengakibatkan peningkatan kemungkinan terjadinya banjir lahar. Beberapa penelitian mengindikasikan peningkatan limpasan permukaan (runoff) akibat terhambatnya infiltrasi oleh endapan abu vulkanik pada lereng. Dengan memperhatikan hal-hal tersebut, maka tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh lapisan abu vulkanik pada lereng terhadap laju infiltrasi. Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental uji model hidraulik (UMH) berupa demonstration plot (demplot) skala laboratorium, dimana parameter yang ditinjau meliputi kemiringan lereng, ketebalan abu vulkanik serta intensitas hujan. Dari penelitian ini diperoleh laju infiltrasi pada lereng yang tertutup abu vulkanik menurun oleh ketebalan lapisan abu vulkanik dengan rata-rata penurunan rasio infiltrasi terhadap total hujan sekitar 1,6% per 1 cm ketebalan abu vulkanik. Selain itu, penurunan laju infiltrasi per 1 cm ketebalan abu vulkanik pada lereng dengan kemiringan 8° lebih tinggi (2,3%), dibandingkan lereng 15° (0,7%). Model infiltrasi Philip memberikan hasil yang lebih mendekati data pengukuran aktual dibandingkan model infiltrasi Green-Ampt. Parameter yang signifikan dalam mempengaruhi laju infiltrasi pada lapisan abu vulkanik dengan model Philip berdasarkan analisis sensitivitas adalah sorptivitas.

**Kata Kunci:** Laju infiltrasi, Philip, Green-Ampt, abu vulkanik, uji model fisik.

## PENDAHULUAN

Indonesia memiliki 129 gunung berapi aktif atau  $\pm 13\%$  gunung berapi di dunia, yang merupakan bagian dari cincin api Pasifik (*Pacific Ring of Fire*) (Simandjuntak & Barber, 1996; Zaennudin, 2010). Meskipun Indonesia berada pada urutan ketiga sebagai negara dengan gunung berapi terbanyak di dunia setelah Rusia dan Jepang, namun Indonesia merupakan negara dengan tingkat risiko bencana gunung berapi tertinggi di dunia. Hal ini sebagai konsekuensi dari tingginya frekuensi aktifitas vulkanik di Indonesia. Dengan kondisi tersebut wilayah Indonesia merupakan wilayah dengan tingkat kerawanan bencana yang tinggi, khususnya terkait kegunungberapian.

Selain bencana primer, pasca terjadinya erupsi juga terdapat potensi bencana sekunder, yaitu banjir lahar (Yunita et al., 2015). Banjir lahar merupakan fenomena banjir di daerah gunung berapi yang terjadi pasca erupsi sebagai akibat deposit material erupsi di puncak yang terbawa oleh aliran hujan sehingga menimbulkan aliran massa material vulkanik bercampur air (Kusumosubroto, 2013).

Beberapa penelitian telah mengkaji fenomena banjir lahar pasca erupsi, khususnya terkait hubungan antara curah hujan (*rainfall*) dan limpasan permukaan (*runoff*), serta angkutan sedimennya. Letusan gunung berapi dapat secara drastis mengubah kondisi hidrologi dan angkutan sedimen pada DAS yang berada dekat sumber erupsi (Gran et al., 2011; Major & Mark, 2006). Dalam periode setelah erupsi, pola aliran sungai yang berhulu di gunung berapi akan berubah secara signifikan, kejadian banjir lahar menjadi mudah terjadi, bahkan dengan pemicu curah hujan yang rendah. Penelitian terkait dampak erupsi terhadap perubahan hidrologi ini telah dilakukan di berbagai gunung berapi, di antaranya di Miyakejima (Tagata et al., 2005), Sakurajima (Miyata et al., 2016; Teramoto et al., 2006), Montserrat (Alexander et al., 2010), St. Helens (Major & Mark, 2006), Kelud dan Chaiten (Jones et al., 2017). Penyebab perubahan pola banjir ini terutama disebabkan oleh perubahan mendadak dari tutupan lahan di sekitar kawasan gunung berapi karena tertutup oleh material letusan. Material erupsi, baik abu vulkanik maupun piroklastik, telah mengakibatkan hilangnya vegetasi dan mengurangi kapasitas infiltrasi, serta menurunkan kekasaran (*roughness*) alami permukaan lereng (Major et al., 1996). Menurunnya kapasitas infiltrasi berdampak pada meningkatnya limpasan permukaan (*runoff*) dan penurunan kekasaran lereng mengakibatkan meningkatnya kecepatan limpasan permukaan. Kedua faktor ini

berpotensi mengakibatkan pergerakan aliran material vulkanik di lereng.

Penelitian-penelitian yang telah disebutkan sebelumnya, pada umumnya berfokus pada hubungan curah hujan dan aliran limpasan, dan tidak secara langsung mengkaji dampak terhadap laju infiltrasi. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh lapisan abu vulkanik pada lereng terhadap laju infiltrasi. Dengan memahami perubahan laju infiltrasi tersebut, diharapkan diperoleh gambaran lebih jelas mengenai kontribusi penurunan laju infiltrasi terhadap peningkatan aliran limpasan di lereng yang memicu terbentuknya aliran lahar.

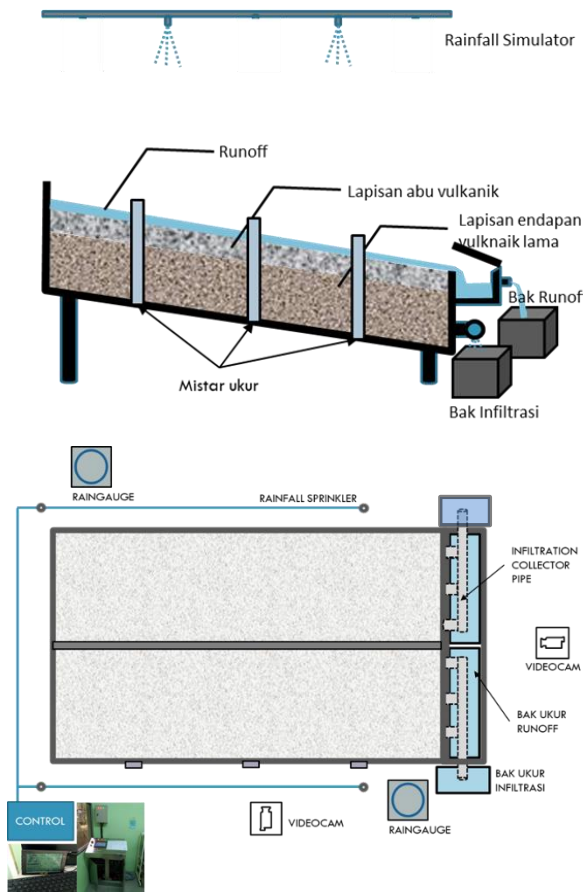
Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental demplot skala laboratorium di Laboratorium Lahar Balai Teknik Sabo Yogyakarta. Lokasi tersebut dipilih karena tersedianya fasilitas laboratorium yang diperlukan dan tersedianya sumber material vulkanik yang diperlukan dalam eksperimen.

## METODOLOGI

### Uji Model Fisik Eksperimen Skala Laboratorium

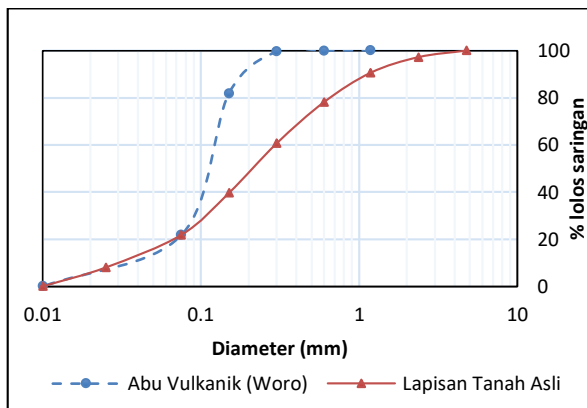
Penelitian ini menggunakan metode eksperimen skala laboratorium dengan *rainfall simulator* untuk melihat pengaruh endapan material vulkanik terhadap mekanisme pembentukan aliran lahar. Berdasarkan kajian literatur, parameter penentu terjadinya banjir lahar pasca erupsi, selain kemiringan lereng dan curah hujan adalah karakteristik dan ketebalan lapisan endapan vulkanik baru yang mempengaruhi laju infiltrasi dan kekasaran permukaan tanah. Oleh sebab itu, dalam eksperimen ini akan diujikan beberapa skenario intensitas hujan, kemiringan lereng dan ketebalan abu vulkanik untuk melihat pengaruh variasi parameter terhadap laju infiltrasi.

Uji model fisik dilakukan dengan membuat demplot di laboratorium berukuran 3,00 m x 0,75 m dengan material lereng menggunakan pasir dan abu vulkanik bergradasi serupa kondisi di lapangan, atau berskala 1:1. Demplot tersebut merepresentasikan permukaan lereng dengan kemiringan tertentu yang tertutup abu vulkanik dengan variasi ketebalan 0 cm; 1 cm; 2,5 cm; dan 5 cm. Gradasi material dan curah hujan dalam uji model fisik menyerupai kondisi alami di lapangan. Simulasi hujan menggunakan perangkat simulator hujan artifisial (*Artificial Rainfall Apparatus*) di Laboratorium Lahar Balai Teknik Sabo Yogyakarta. Hujan yang dihasilkan oleh simulator berupa hujan yang konstan terhadap waktu. *Layout* demplot serta instrumen pengukuran dan observasi disajikan dalam **Gambar 1**.



Sumber: Ilustrasi penulis  
**Gambar 1** Layout Demplot Uji Model Fisik

Karakteristik material yang digunakan pada demplot berdasarkan sampling abu vulkanik dari erupsi Gunung Merapi tanggal 3 Maret 2020 dan 27 Maret 2020. Sedangkan material lapisan dasar mengacu pada karakteristik material lereng Gunung Merapi pada DAS Gendol. Gradasi abu vulkanik dan lapisan dasar dalam uji model fisik disajikan dalam **Gambar 2**.



Sumber: Hasil analisis  
**Gambar 2** Gradasi lapisan abu vulkanik dan lapisan dasar

Pengamatan (*observation*) dan pengukuran yang dilakukan selama eksperimen meliputi intensitas curah hujan, volume infiltrasi, volume aliran limpasan, waktu mulai terjadinya infiltrasi dan waktu mulai terjadinya aliran limpasan.

Dari hasil uji model fisik, dilakukan analisis pendekatan laju infiltrasi pada lapisan abu vulkanik menggunakan 2 metode, yaitu persamaan Philips dan Green-Ampt untuk kemudian dibandingkan. Persamaan Philip untuk kumulatif dan laju infiltrasi adalah (Chow et al., 2008):

$$F_{t+\Delta t} = F_t + K\Delta t - \frac{S^2}{2(f_t - K)^2} + S \left[ \Delta t + \frac{S^2}{4(f_t - K)^2} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$f_{t+\Delta t} = K + S \left( \frac{S + \sqrt{S^2 + 4KF_{t+\Delta t}}}{4F_{t+\Delta t}} \right) \dots\dots\dots (2)$$

Sedangkan Persamaan Green-Ampt untuk kumulatif dan laju infiltrasi sebagai berikut (Chow et al., 2008):

$$F_{t+\Delta t} = F_t + K\Delta t + \psi\Delta\theta \ln \left[ \frac{F_{t+\Delta t} + \psi\Delta\theta}{F_t + \psi\Delta\theta} \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$f_{t+\Delta t} = K \left( \frac{\psi\Delta\theta}{F_{t+\Delta t}} + 1 \right) \dots\dots\dots (4)$$

dimana  $F$  adalah kumulatif infiltrasi;  $f$  adalah laju infiltrasi;  $K$  adalah konduktivitas hidrolis;  $S$  adalah sorptivitas;  $\psi$  adalah *wetting front soil suction head*;  $\Delta\theta$  adalah peningkatan kadar air dan  $t$  adalah waktu.

Untuk menentukan kesesuaian kedua model terhadap data aktual dari hasil UMH digunakan nilai Root Mean Squate Error (RMSE) sebagai pembanding dengan formula sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \dots\dots\dots (5)$$

dimana  $S_i$  adalah nilai prediksi dari model;  $O_i$  adalah nilai observasi dan  $n$  adalah jumlah data yang dianalisis.

Dari model yang dipilih, dilakukan juga analisis sensitivitas untuk menentukan signifikansi variasi nilai parameter dalam model terhadap nilai infiltrasi. Signifikansi parameter ini dianalisis menggunakan pendekatan analisis sensitivitas orde-1 yang diwakilkan dengan *Condition Number* (CN). Nilai CN merepresentasikan laju perubahan variabel tidak bebas (*dependent variable*) terhadap laju perubahan variabel bebas (*independent variable*) sebagaimana formula berikut ini (Jung, 2010; Turner, 2006):

$$CN_k = \frac{k\Delta c}{c\Delta k} \dots\dots\dots (6)$$

dimana  $CN_k$  adalah *Condition Number* untuk parameter bebas  $k$ ;  $k$  adalah nilai parameter bebas

yang ditinjau;  $c$  adalah nilai parameter tidak bebas;  $\Delta k$  adalah perubahan nilai parameter independen dan  $\Delta c$  adalah perubahan nilai parameter tidak bebas.

**Kalibrasi Rainfall Simulator**

*Rainfall simulator* yang digunakan merupakan suatu sistem simulasi hujan buatan dalam laboratorium yang terdiri dari pompa yang mengalirkan air dari bak tampungan ke jaringan *sprinkler*. Jaringan *sprinkler* tersebut bekerja berdasarkan sistem katup, dimana terdapat 6 katup pengaturan *sprinkler* untuk 6 tingkatan hujan.

Kalibrasi *rainfall simulator* yang dilakukan meliputi kalibrasi diameter butir hujan dan keseragaman hujan yang dihasilkan oleh rainfall simulator. Intensitas hujan yang diujicobakan dalam kalibrasi ini konstan, namun dalam kalibrasi dicoba beberapa variasi intensitas hujan yang berkisar antara 18-74 mm/jam. Kalibrasi *rainfall simulator* dilakukan pada area seluas 3,00 m x 2,00 m yang akan digunakan dalam uji model fisik. Kalibrasi diameter butir hujan dilakukan dengan menggunakan *Flour Method* (Metode Tepung) (Hudson, 1963) dan banyak digunakan dalam penelitian yang menggunakan *rainfall simulator* (Horne, 2017; Sousa Júnior et al., 2017). Kalibrasi diameter butir hujan dilakukan dengan menempatkan tepung terigu dalam nampan di bawah *sprinkler* selama 2-3 detik, lalu didiamkan 24 jam dalam suhu ruang. Tepung yang sudah menggumpal akibat percikan hujan tersebut kemudian diayak menggunakan saringan saringan 4,65; 2,36; 1,18; 0,60; dan 0,30, tiap gradasi tersebut kemudian dioven selama 24 jam. Hasil gradasi tersebut lalu ditimbang dan diplot dalam grafik, dimana diameter butir hujan rata-rata adalah nilai  $d_{50}$  dari grafik.

Nilai diameter butir hujan yang dihasilkan oleh simulator kemudian dibandingkan dengan diameter hujan alami. Beberapa penelitian telah memformulasikan hubungan antara diameter butiran dan intensitas hujan dengan formula umum berikut (Abd Elbasit et al., 2010; Assouline, 2009; Ngezahayo et al., 2021; Smith et al., 2009; Yakubu et al., 2014):

$$D = aI^b \dots\dots\dots (7)$$

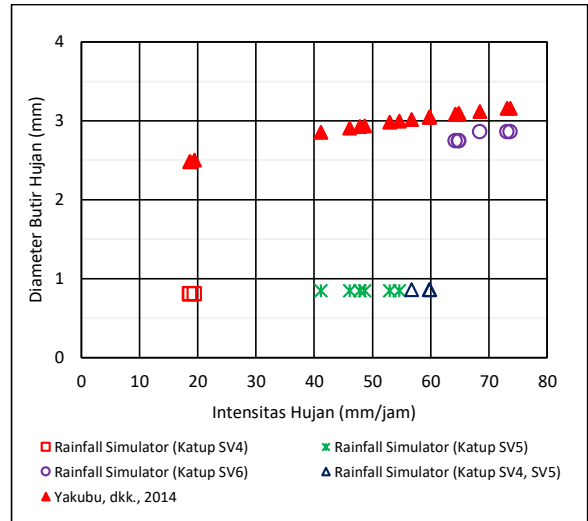
dimana  $D$  adalah diameter butir hujan (mm) dan  $I$  adalah intensitas hujan (mm/jam), serta nilai  $a$  dan  $b$  adalah koefisien yang dipengaruhi oleh kondisi regional.

Dalam penelitian ini digunakan formula Yakubu, et al. (2016) yang diperoleh dari hasil observasi butir hujan di daerah Peninsula Malaysia. Formula ini dipilih karena memiliki kedekatan wilayah dengan Indonesia sehingga diharapkan

dapat mewakili karakteristik curah hujan di wilayah kajian. Berikut ini adalah formulasi hubungan diameter butir hujan dan intensitasnya menurut Yakubu, et al. (2016) adalah:

$$D = 1,483I^{0,176} \dots\dots\dots (8)$$

**Gambar 3** menampilkan grafik perbandingan diameter butir hujan alami dan butir hujan *rainfall simulator*.



Sumber: Hasil analisis

**Gambar 3** Perbandingan diameter butir hujan alami dan butir hujan dari *rainfall simulator*

Dari hasil kalibrasi diperoleh diameter butir hujan yang dihasilkan oleh *sprinkler* untuk berbagai variasi intensitas hujan pada bukaan katup 4 dan 5 sebesar 0,81-0,86 mm. Sedangkan pada bukaan katup 6 diameter butir hujan yang dihasilkan sebesar 2,75-2,86 mm. Diameter butir hujan yang dihasilkan oleh *sprinkler* katup 6 memberikan nilai yang paling mendekati diameter butir hujan alami.

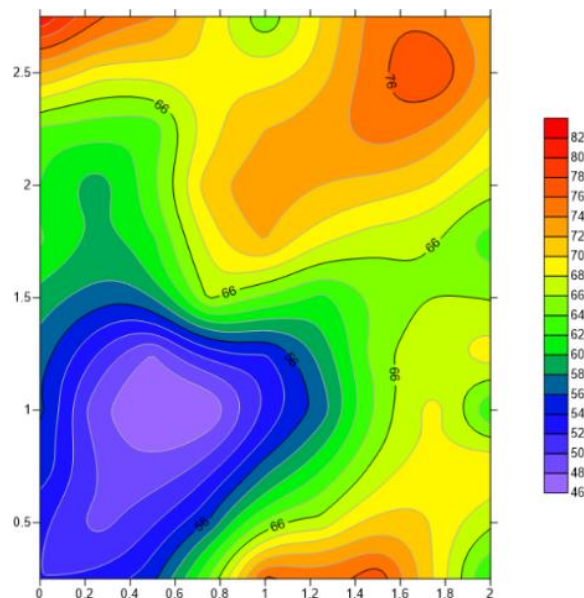
Kalibrasi keseragaman curah hujan dilakukan dengan melakukan pengukuran curah hujan pada area demplot dengan jarak interval pengukuran setiap 50 cm. Keseragaman curah hujan ( $C_u$ ) yang dihasilkan oleh *rainfall simulator* dihitung dengan menggunakan formula yang dibuat oleh Christiansen (1943) (Kara et al., 2008; Maroufpoor et al., 2010):

$$C_u = 100 \left( \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}} \right) \dots\dots\dots (9)$$

dimana  $x_i$  adalah tinggi hujan pada titik  $i$ ,  $\bar{x}$  adalah rata-rata tinggi hujan dari seluruh titik pengukuran, dan  $n$  adalah jumlah titik pengukuran tinggi hujan.

Berdasarkan persyaratan ASTM tentang rainfall simulator untuk model erosi lahan (*Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product (RECP) Performance in Protecting Hillslopes*

from Rainfall-Induced Erosion, 2019), nilai koefisien keseragaman curah hujan harus memenuhi minimal 70%. Dari hasil kalibrasi diperoleh bahwa curah hujan yang dihasilkan oleh rainfall simulator memenuhi syarat nilai keseragaman pada intensitas hujan antara 45 – 75 mm/jam. Pola spasial curah hujan pada area demplot disajikan dalam **Gambar 4**, dengan nilai keseragaman  $C_u$  sebesar 89%.



Sumber: Hasil analisis

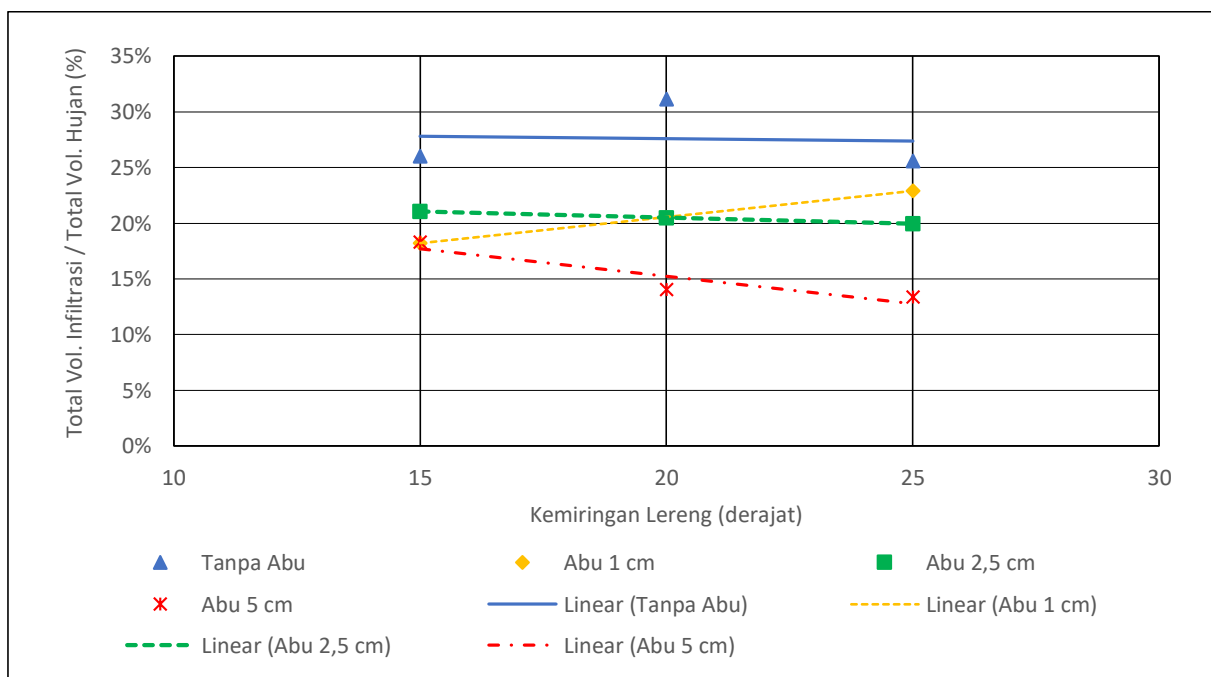
**Gambar 4** Pola Spasial Curah Hujan dalam mm pada Area Demplot ( $C_u=89\%$ )

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pengaruh Kemiringan Lereng terhadap Laju Infiltrasi

Dalam uji model dilakukan pengamatan terhadap aliran infiltrasi yang keluar di hilir dasar demplot. Volume infiltrasi ini diukur dan diproporsikan terhadap volume total curah hujan. Hasil uji model menunjukkan infiltrasi cenderung meningkat dengan bertambahnya kemiringan lereng pada kondisi lereng tanpa abu vulkanik dan dengan abu vulkanik 1 cm. Sedangkan pada kondisi lereng tertutup abu vulkanik 2,5 cm dan 5 cm laju infiltrasi cenderung menurun dengan bertambahnya kemiringan lereng. Grafik pengaruh kemiringan lereng terhadap rasio infiltrasi dan total hujan disajikan dalam **Gambar 5** berikut.

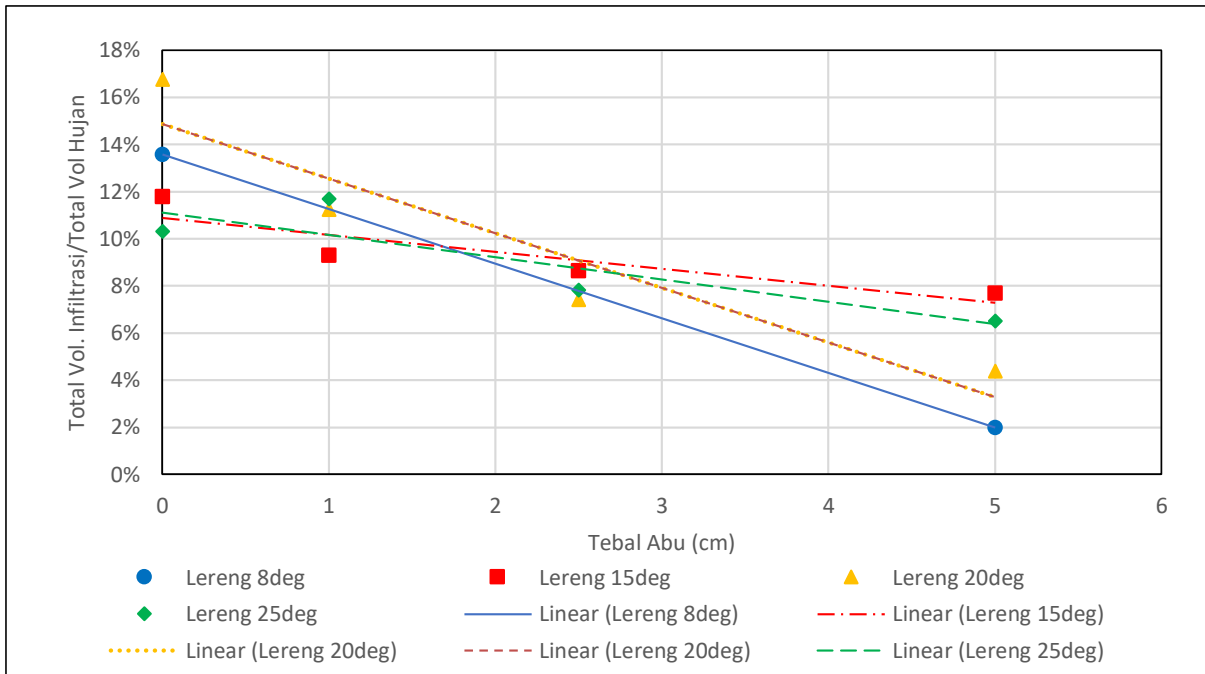
Perbedaan pengaruh kemiringan lereng terhadap pola infiltrasi dipengaruhi oleh terjadinya retak (*crack*) pada lapisan demplot akibat perubahan stabilitas lereng. Keretakan lereng menyebabkan terganggunya stabilitas lapisan dan disusul dengan keruntuhan lereng (*longsor*), khususnya pada kemiringan lereng yang curam, yaitu  $20^\circ$  dan  $25^\circ$ . Proses keruntuhan lereng diawali dengan adanya retakan dalam arah melintang lereng, lalu limpasan permukaan terbentuk dan mulai terjadi proses erosi oleh limpasan permukaan khususnya pada mulai dari retakan hingga hilir demplot tersebut. Erosi di area kaki demplot mengakibatkan terganggunya stabilitas lereng sehingga akhirnya lereng longsor. Kelongsoran terjadi sekitar menit ke-59,25 hingga hingga 75,00.



Sumber: Hasil analisis

**Gambar 5** Pengaruh kemiringan lereng terhadap volume infiltrasi





Sumber: Hasil analisis

**Gambar 6** Pengaruh ketebalan abu vulkanik terhadap infiltrasi

Terjadinya retak pada lereng menyebabkan pengaruh hambatan lapisan abu vulkanik berkurang sehingga proses infiltrasi dan penjumlahan pada lapisan tanah dasar (bawah) menjadi lebih cepat. Oleh karena itu, untuk kasus retak/ longsor ini proses infiltrasi pada model lereng sudah terganggu sehingga tidak digunakan dalam analisis model infiltrasi. Dalam hal ini model infiltrasi hanya menggunakan data UMH pada kemiringan lereng 15°, dimana tidak terjadi retak lereng.

Perbedaan pengaruh tersebut juga dipengaruhi oleh kadar air pada kondisi awal lapisan pasir demplot. Pada demplot dengan kemiringan lereng 15° kadar air awal rata-rata sekitar 8,70%, kemiringan lereng 20° kadar air awal rata-rata sekitar 6,42%, sedangkan kemiringan lereng 25° kadar air awal rata-rata sekitar 7,14%. Hal ini menunjukkan bahwa kadar air kondisi awal demplot pada kemiringan lereng 15° lebih tinggi dari pada kadar air awal demplot dengan kemiringan lereng 20° dan 25°. Perbedaan kondisi awal kadar air lapisan pasir ini merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kapasitas infiltrasi. Oleh sebab itu, nilai kadar air awal menjadi salah satu data kondisi awal dalam perhitungan infiltrasi.

Penelitian terkait hubungan antara kemiringan lereng dan infiltrasi sudah banyak dilakukan, namun hasilnya masih belum memberikan hubungan yang jelas karena hasilnya cukup bervariasi. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa laju infiltrasi menurun dengan

bertambahnya kemiringan lereng (Chen et al., 2016; Fox et al., 1997). Menurunnya laju infiltrasi dipengaruhi oleh terhambatnya proses penggenangan (*ponding*) pada permukaan tanah yang miring karena kecepatan aliran limpasan (*runoff*) menjadi lebih tinggi. Selain itu, hujan pada lereng yang miring tidak jatuh tegak lurus pada permukaan tanah sehingga mengurangi tinggi hujan yang merupakan parameter penentu infiltrasi.

Hubungan yang bervariasi antara kapasitas infiltrasi dengan kemiringan lereng dijumpai pada penelitian yang dilakukan oleh Duhita et al. (2021) dan Huang et al. (2017). Hal ini disebabkan oleh adanya dinamika interaksi antara limpasan permukaan, proses erosi dan deposisi temporal pada kemiringan lereng yang curam (Duhita et al., 2021). Perbedaan pola infiltrasi tersebut menunjukkan bahwa proses infiltrasi, khususnya pada kemiringan lereng yang curam, dipengaruhi oleh interaksi beberapa faktor seperti karakteristik tanah dan sudut jatuh hujan (Huang et al., 2017).

Dari berbagai hasil penelitian ini serta didukung oleh beberapa penelitian sebelumnya, tampak bahwa pada lereng dengan kemiringan curam, dalam hal ini lebih dari 15°, proses infiltrasi menjadi lebih kompleks berinteraksi dengan proses lain seperti limpasan permukaan dan erosi lereng. Sementara itu, proses-proses tersebut juga ditentukan oleh banyak faktor, diantaranya jenis tanah dan tingkat kejenuhannya, sudut jatuh dan energi jatuh hujan, serta kecepatan aliran permukaan.

### Pengaruh Ketebalan Lapisan Abu Vulkanik terhadap Infiltrasi

Erupsi mengakibatkan hilangnya vegetasi dan tertutupnya permukaan wilayah sekitar gunung berapi dengan fragmen material vulkanik (*tephra*), sehingga menyebabkan perubahan karakteristik hidrologi wilayah tersebut, dimana limpasan permukaan menjadi lebih tinggi. Dalam beberapa literatur, disebutkan bahwa meningkatnya limpasan permukaan tersebut disebabkan karena lapisan material vulkanik menghambat proses infiltrasi. Demikian pula dari hasil uji model fisik yang telah dilakukan, terindikasi bahwa volume infiltrasi yang mengalir di hilir demplot mengalami reduksi ketika ada lapisan abu vulkanik di atas lereng. Hal ini ditunjukkan oleh pola rasio infiltrasi yang keluar di hilir demplot terhadap volume curah hujan, sebagaimana terlihat dalam **Gambar 6**.

Dari **Gambar 6** terlihat prosentase volume Infiltrasi menurun dengan bertambahnya ketebalan lapisan abu vulkanik. Pada kondisi lereng tanpa abu vulkanik rasio infiltrasi berkisar antara 10-17%. Pada lereng tertutup abu vulkanik 1 cm, rasio infiltrasi berkisar antara 9-12%. Pada lereng tertutup abu vulkanik 2,5 cm, rasio infiltrasi berkisar antara 7-9%. Sementara pada lereng tertutup abu vulkanik 5cm, rasio infiltrasi berkisar antara 2-8%. Rata-rata penurunan rasio infiltrasi terhadap total hujan sekitar 1,6% per 1 cm ketebalan abu vulkanik. Penurunan rasio infiltrasi per cm ketebalan abu vulkanik pada lereng dengan kemiringan  $8^{\circ}$  dan  $20^{\circ}$  adalah sekitar 2,3%, untuk lereng dengan kemiringan  $15^{\circ}$  penurunan rasio infiltrasi sekitar 0,7%, sedangkan pada lereng dengan kemiringan  $25^{\circ}$  penurunan rasio infiltrasi sekitar 0,9%.

Penelitian yang secara khusus mengkaji hubungan antara ketebalan abu vulkanik terhadap laju infiltrasi masih jarang dilakukan. Hal ini salah satunya disebabkan oleh sulitnya mendapatkan material yang cukup untuk melakukan eksperimen maupun pengujian laboratorium karena material abu vulkanik pada lereng cenderung tipis dan mudah hanyut terbawa oleh limpasan permukaan ketika terjadi hujan sehingga akan hilang dalam beberapa kali hujan. Salah satu penelitian menunjukkan pola yang serupa. Berdasarkan penelitian terkait laju infiltrasi pada lereng curam yang tertutup abu vulkanik, ditemukan bahwa laju infiltrasi semakin berkurang seiring bertambahnya ketebalan lapisan abu (*Sanyoto & Rahardjo, 2020*). Namun demikian, beberapa penelitian yang mengkaji fenomena perubahan karakteristik infiltrasi pada lereng pasca erupsi menunjukkan adanya lapisan deposisi abu vulkanik di lereng mereduksi kapasitas infiltrasi, menyebabkan

terhambatnya resapan dan penyimpanan air sehingga meningkatkan risiko limpasan dan terbentuknya lahar (*Major et al., 1996*). Penurunan kapasitas infiltrasi bahkan ditemukan berdampak hingga beberapa tahun setelah erupsi, dengan besaran  $1/4$ - $1/3$  kali dari kapasitas infiltrasi sebelum erupsi (*Major & Yamakoshi, 2005*). Penyebabnya antara lain karena abu vulkanik memiliki nilai porositas dan konduktivitas hidrolis yang rendah dibandingkan lapisan tanah di bawahnya (*Hendrayanto et al., 1995; Pierson & Major, 2014*). Hal ini diakibatkan oleh kondisi gradasi material abu vulkanik yang sangat halus, dimana gradasi materialnya kurang dari 2 mm, dengan 60% diantaranya berdiameter 0,075-0,15 mm. Pada material pasir yang bergradasi halus rongga-rongga antarpartikelnya menjadi lebih kecil daripada material dengan gradasi kasar sehingga ruang untuk dilewati oleh partikel air menjadi lebih sempit pada lapisan abu vulkanik.

Selain itu, karakteristik lapisan abu vulkanik tersebut tidak hanya ditentukan oleh sifat fisiknya saja. Namun juga dipengaruhi oleh peran rintik hujan dalam pembentukan kerak struktural pada permukaan material vulkanik di lereng (*Tarasenko et al., 2019*). Menurut Tarasenko et al. pengerasan kerak tersebut terutama dipengaruhi oleh pemadatan partikel abu oleh rintik hujan, bukan dengan penyemenan partikel melalui pengendapan garam sekunder. Pada saat jatuh, butir hujan memiliki energi kinetik yang besarnya ditentukan oleh diameter butir hujan. Energi kinetik inilah yang memberikan dampak pada lapisan abu vulkanik yang semula lepas (*loose*) sehingga memadat. Hal ini terlihat dengan berkurangnya ketebalan abu vulkanik pada 5-10 menit setelah hujan, meskipun tidak terjadi erosi di lereng.

### Komparasi Model Laju Infiltrasi pada Lereng Tertutup Abu Vulkanik

Infiltrasi adalah proses masuknya air dari permukaan ke dalam tanah. Banyak faktor yang mempengaruhi proses infiltrasi, termasuk diantaranya kondisi permukaan tanah dan tutupannya, porositas tanah, konduktivitas hidrolis dan kandungan air tanah. Dalam pemodelan ini, hanya akan ditinjau pengaruh tutupan abu vulkanik terhadap laju infiltrasi, dimana untuk variabel properti tanah terkait infiltrasi, seperti porositas dan kandungan air tanah berdasarkan data primer, sedangkan untuk nilai konduktivitas hidrolis, sorptivitas dan tinggi hisap (*wetting front soil suction head*) diambil berdasarkan data literatur dengan menyesuaikan pada klasifikasi karakteristik tanah/ pasir dan abu vulkanik yang ditinjau. Nilai parameter yang digunakan dalam Model Philip dan Green-Ampt disajikan dalam **Tabel 1**.

**Tabel 1** Nilai Parameter Model Infiltrasi

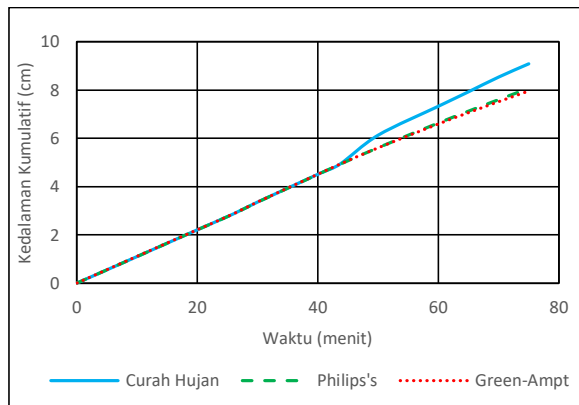
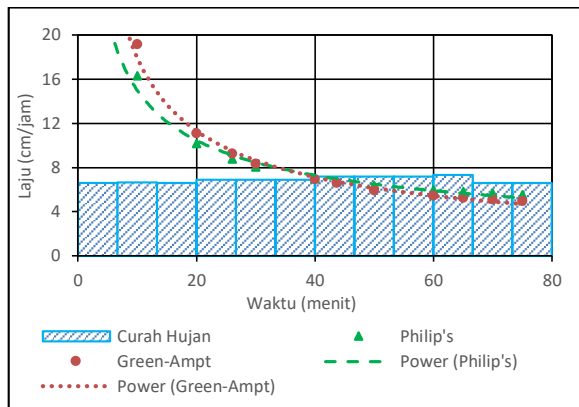
Lapisan Tanah	Parameter Philip		Parameter Green-Ampt			
	Konduktivitas hidraulik, K (cm/jam)*	Sorptivitas, S (cm/jam <sup>0.5</sup> )*	Konduktivitas hidraulik, K (cm/jam)*	Tinggi hisap, $\psi$ (cm)*	Kenaikan kadar air (Water content increment), $\Delta\theta^{**}$	$\psi\Delta\theta$ (cm)
Abu vulkanik	0,65	7,30	0,65	2,35	0,45	1,05
Pasir vulkanik	2,99	5,13	2,99	16,53	0,36	5,99

Sumber:

\*Nilai berdasarkan Tabel parameter Infiltrasi Green-Ampt untuk berbagai jenis tanah (Chow et al., 2008).

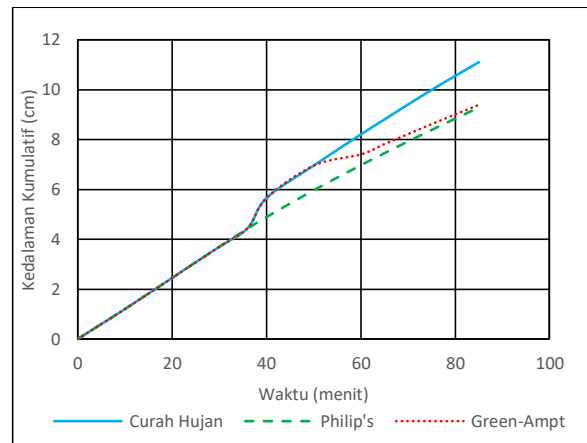
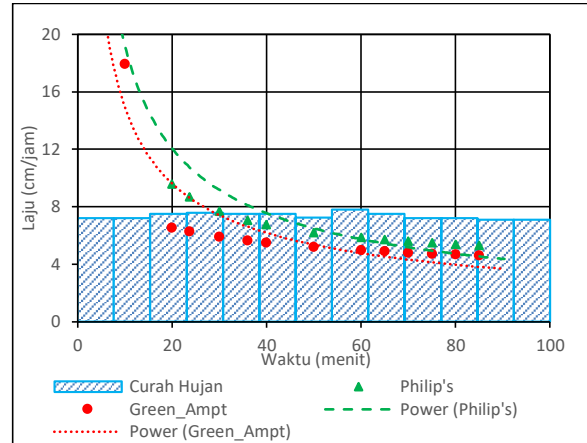
\*\*Nilai berdasarkan perhitungan rumus:  $\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e$ , dimana  $S_e$  = adalah saturasi efektif dan  $\theta_e$  adalah porositas efektif.

Dalam uji model ini, pada kemiringan lereng 20° dan 25° terjadi keruntuhan lereng sebelum terbentuk aliran limpasan, aliran limpasan baru terbentuk pada kemiringan lereng 15°. Untuk membuat pemodelan laju infiltrasi berdasarkan hasil uji model, demplot harus mencapai kondisi jenuh yang ditandai dengan terjadinya aliran limpasan. Oleh sebab itu, analisis model persamaan infiltrasi hanya dapat dilakukan pada hasil uji model dengan kemiringan lereng 15°, dimana terjadi aliran limpasan di permukaan demplot. Model infiltrasi yang digunakan adalah Metode Philip dan Green-Ampt. Kurva infiltrasi pada lereng dengan lapisan abu 1 cm dan 5 cm dengan kemiringan 15° disajikan dalam **Gambar 7** dan **Gambar 8**.



Sumber: Hasil analisis

**Gambar 7** Kurva Laju dan Kumulatif Infiltrasi pada Lereng 15° dengan Abu Vulkanik 1 cm



Sumber: Hasil analisis

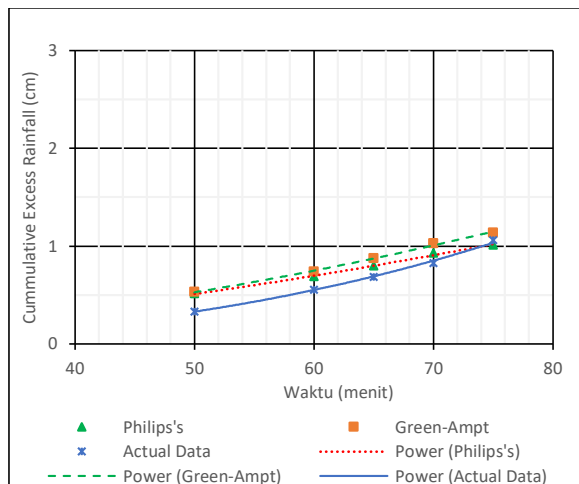
**Gambar 8** Kurva Laju dan Kumulatif Infiltrasi pada Lereng 15° dengan Lapisan Abu Vulkanik 5 cm

Pada lereng yang tertutup abu vulkanik 1cm, limpasan permukaan (*runoff*) mulai terbentuk pada menit ke-43,67, sedangkan pada lereng tertutup abu vulkanik 5cm *runoff* mulai muncul di permukaan demplot pada menit ke-60. Pada demplot dengan lapisan abu vulkanik lebih tebal *runoff* yang terbentuk lebih lambat dan lebih kecil dibandingkan pada lapisan abu yang lebih tipis. Hal ini disebabkan karena pada kondisi lereng tertutup abu vulkanik terjadi peningkatan volume air yang ditahan oleh lapisan demplot tersebut. Kenaikan volume air yang ditahan oleh lapisan tanah pada



kondisi lereng tertutup abu vulkanik berkisar antara 5-15%. Penyebab meningkatnya volume air tertahan adalah ukuran butir abu vulkanik yang sangat halus, mengakibatkan partikel ini memiliki gaya kapiler yang tinggi (Ningsih & Purnama, 2012). Saat lapisan abu vulkanik mulai jenuh, maka kemudian terbentuk *runoff* di permukaan demplot. Untuk lereng dengan lapisan abu vulkanik 1 cm, air yang terserap tersebut lebih cepat dialirkan ke hilir (keluar demplot) sebagai aliran bawah permukaan, sedangkan pada lereng tertutup abu vulkanik air lebih lama tertahan di lapisan abu vulkanik. Massa air yang tertahan pada lapisan abu vulkanik ini yang mengakibatkan stabilitas lereng terganggu. Oleh sebab itu, pergerakan sedimen di lereng yang tertutup abu vulkanik pada uji model ini, cenderung merupakan gerakan massa sedimen karena keruntuhan lereng akibat massa air yang diserap oleh lapisan abu vulkanik.

Pada **Gambar 9** dan **Gambar 10** disajikan perbandingan *excess rainfall* hasil perhitungan berdasarkan model matematis infiltrasi terhadap data aktual. Data aktual *excess rainfall* yang digunakan sebagai pembanding tersebut berasal dari pengukuran saat uji model fisik skala laboratorium pada lereng yang tertutup lapisan abu vulkanik. Model infiltrasi Philip's dan Green-Ampt memberikan hasil yang cukup memuaskan. Dari kurva perbandingan *excess rainfall* perhitungan terhadap data aktual diperoleh nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) pada kondisi lereng tertutup abu vulkanik 1 cm untuk Model Philip dan Green Ampt tidak jauh berbeda, nilai RMSE berturut-turut adalah 0,48 dan 0,54.

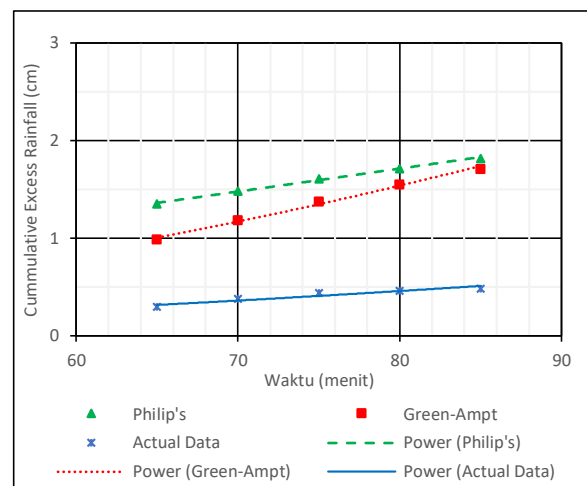


Sumber: Hasil analisis

**Gambar 9** Perbandingan *Excess Rainfall* Perhitungan terhadap Data Aktual pada Lereng 15° dengan Lapisan Abu Vulkanik 1 cm

Namun, untuk demplot dengan ketebalan abu vulkanik 5 cm perbedaan nilai RMSE cukup signifikan, Model Infiltrasi Philip lebih mendekati data aktual dibandingkan Model Infiltrasi Green-Ampt. Nilai RMSE pada kondisi ini secara berurutan untuk Model Philip dan Green-Ampt adalah 0,22 dan 1,06. Hal ini disebabkan dalam formula infiltrasi Philip tidak hanya memperhitungkan parameter konduktivitas hidrolis, tetapi juga terdapat parameter *sopktivitas* yang cukup signifikan dan mewakili perilaku daya serap kapiler dari abu vulkanik dalam menentukan tren grafik model.

Hasil ini sejalan dengan penelitian perbandingan model infiltrasi pada tanah bertekstur kasar yang homogen yang dilakukan oleh Al-Azawi (1998). Perbandingan enam persamaan model infiltrasi pada kasus tersebut menunjukkan bahwa Model Philip's memberikan representasi yang sangat baik dibandingkan Model Kostiakov, Modified Kostiakov, Green Ampt dan Holtan Overton (Al-Azawi, 1985). Hal yang sama juga dikemukakan oleh Igbadun, H. et al (2016) yang melakukan penelitian pada demplot percobaan di Teknik Pertanian di Samaru, Zaria untuk jenis tanah lempung berpasir halus. Hasil penelitian menunjukkan Model Philip's memberikan hasil yang relatif baik dibandingkan Model Kostiakov, Modified Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Natural Resources Conservation Service (NRCS), Green-Ampt, Smith-Parlange, Talsma-Parlange, Swartzendruber dan Horton (Igbadun et al., 2016).



Sumber: Hasil analisis

**Gambar 10** Perbandingan *Excess Rainfall* Perhitungan terhadap Data Aktual pada Lereng 15° dengan Lapisan Abu Vulkanik 5 cm

Namun, hasil penelitian yang berbeda dihasilkan dari penelitian Igbadun, H.E. and Idris, U.D. (2007). Penelitian tersebut menemukan bahwa Model Kostiaikov memberikan hasil yang lebih akurat daripada Model Philip's pada tanah hidromorfik di Samura, Nigeria (Igbadun & Idris, 2008). Tanah hidromorfik ini biasanya terletak di dataran rendah dan terbentuk dari proses pelapukan batuan vulkanik asam dan batu pasir, serta sering digenangi oleh air. Satu atau beberapa model infiltrasi memberikan hasil lebih baik untuk kasus lokasi tertentu, namun kurang akurat pada lokasi lain. Hal ini menunjukkan bahwa kesesuaian suatu model salah satunya ditentukan oleh jenis dan kondisi tanah. Oleh karena itu, dalam menentukan model infiltrasi yang sesuai untuk suatu lokasi penting untuk selalu melakukan uji perbandingan antara beberapa model terlebih dahulu agar diperoleh model yang dapat merepresentasikan proses infiltrasi di lokasi yang ditinjau.

Dalam model infiltrasi Philip terdapat 2 parameter utama yang mempengaruhi laju infiltrasi, yaitu konduktivitas hidraulik dan sorptivitas (lihat **Tabel 1**). Untuk mengetahui signifikansi pengaruh kedua parameter tersebut terhadap laju infiltrasi dalam model infiltrasi Philip maka dilakukan analisis sensitivitas dengan menggunakan *Condition Number* (CN). Variasi nilai parameter bebas yang diambil berdasarkan variasi 50%, 75%, 125% dan 150% dari nilai parameter abu vulkanik sebagai nilai acuan (**Tabel 2**).

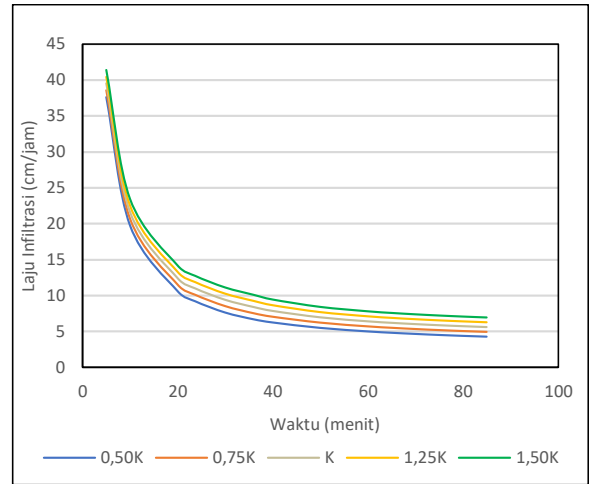
**Tabel 2** Variasi Nilai Parameter Bebas

Variasi Nilai	Parameter Bebas	
	K (cm/jam )	S (cm/jam <sup>0,5</sup> )
50%	0,33	3,65
75%	0,49	5,48
Nilai Acuan	0,65	7,30
125%	0,81	9,13
150%	0,98	10,95

Sumber: Hasil analisis

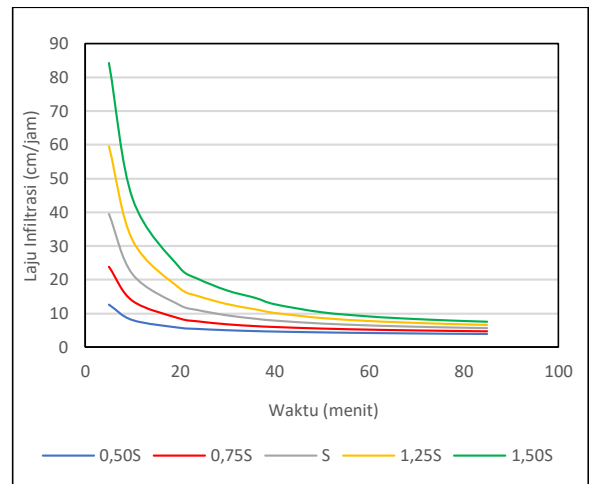
Berdasarkan variasi nilai parameter independen tersebut diperoleh perubahan nilai laju infiltrasi dari waktu ke waktu masing-masing terhadap parameter konduktivitas hidraulik dan sorptivitas sebagaimana disajikan dalam **Gambar 11** dan **Gambar 12**. Dari grafik terlihat bahwa perubahan laju infiltrasi berbanding lurus dengan perubahan nilai konduktivitas hidraulik dan sorptivitas. Dari grafik terlihat juga laju infiltrasi secara signifikan berubah dengan perubahan nilai sorptivitas. Namun demikian perubahan nilai

tersebut relatif terhadap besaran nilai parameter independen yang ditinjau. Untuk melihat signifikansi perubahan tersebut secara lebih akurat maka dihitung nilai CN yang merupakan parameter tak berdimensi yang mewakili laju perubahan parameter tersebut.



Sumber: Hasil analisis

**Gambar 11** Laju Infiltrasi untuk variasi nilai K

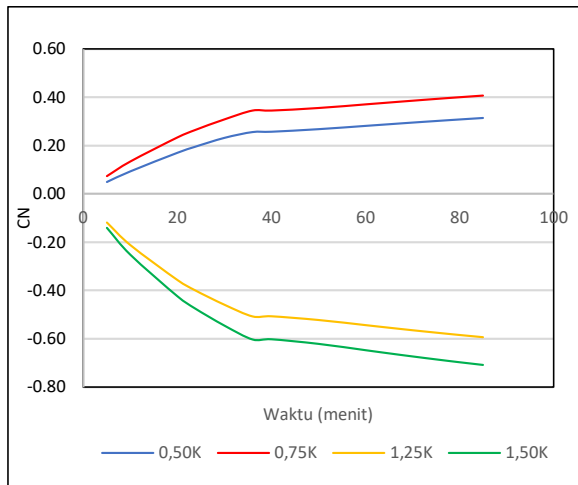


Sumber: Hasil analisis

**Gambar 12** Laju Infiltrasi untuk variasi nilai S

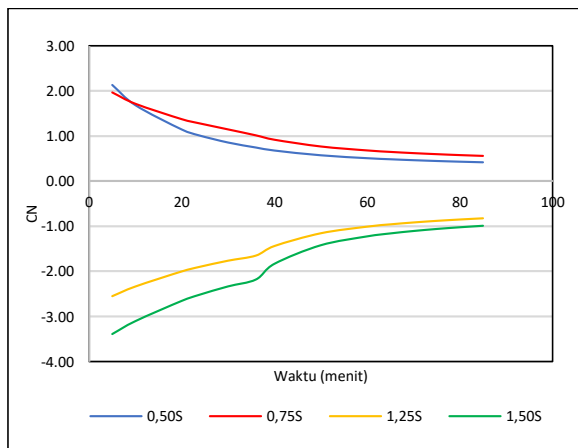
Dari hasil perhitungan, nilai CN untuk parameter K berkisar antara -0,71 sampai dengan 0,41, sedangkan untuk parameter S berkisar antara -3,39 sampai dengan 2,13. Berdasarkan nilai CN tersebut, perubahan parameter sorptivitas memberikan perubahan lebih signifikan terhadap laju infiltrasi dibandingkan parameter konduktivitas. Perubahan laju infiltrasi terhadap nilai sorptivitas terlihat paling besar pada periode awal infiltrasi, kemudian mereduksi dengan bertambahnya waktu. Sebaliknya pengaruh perubahan nilai konduktivitas hidraulik terhadap laju infiltrasi terlihat semakin meningkat dengan

bertambahnya waktu, walaupun nilai CN parameter ini tidak signifikan jika dibandingkan dengan nilai CN sorptivitas. Nilai CN untuk parameter konduktivitas hidraulik dan sorptivitas disajikan dalam **Gambar 13** dan **Gambar 14**.



Sumber: Hasil analisis

**Gambar 13** Condition Number (CN) parameter K



Sumber: Hasil analisis

**Gambar 14** Condition Number (CN) parameter S

## KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari kegiatan penelitian ini adalah laju infiltrasi menunjukkan pola penurunan akibat adanya lapisan abu vulkanik, dimana makin tebal lapisan abu vulkanik maka laju infiltrasinya lebih lambat. Rata-rata penurunan rasio infiltrasi terhadap total hujan sekitar 1,6% per 1 cm ketebalan abu vulkanik. Penurunan infiltrasi ini disebabkan karena porositas dan konduktivitas abu vulkanik yang rendah sehingga menghambat proses penyerapan atau penampungan air pada lapisan ini. Selain itu, terjadi proses fisik pemadatan pada lapisan permukaan abu vulkanik oleh rintik hujan sehingga membentuk lapisan tipis yang kedap.

Namun pengaruh kemiringan lereng terhadap laju infiltrasi memberikan pola bervariasi, khususnya pada lereng yang curam. Proses infiltrasi pada lereng yang curam dipengaruhi oleh interaksi multifaktor yang kompleks dari proses limpasan permukaan dan erosi lereng, diantaranya jenis tanah dan tingkat kejenuhannya, sudut jatuh hujan, energi jatuh hujan, serta kecepatan aliran permukaan. Hal tersebut yang mengakibatkan proses tersebut memiliki perilaku yang beragam. Interaksi proses limpasan permukaan dan erosi lereng juga akan mempengaruhi proses infiltrasi dari waktu ke waktu karena pada lereng yang curam kecepatan limpasan permukaan lebih tinggi sehingga secara perlahan lapisan abu vulkanik akan tererosi.

Berdasarkan pemodelan, fungsi infiltrasi yang sesuai untuk lereng yang tertutup lapisan abu vulkanik dengan tipikal material vulkanik Merapi adalah model infiltrasi Philip. Formula infiltrasi Philip tidak hanya memperhitungkan parameter konduktivitas hidraulik, tetapi juga terdapat parameter sorptivitas yang cukup signifikan dan mewakili perilaku daya serap kapiler dari abu vulkanik. Hal ini didukung juga berdasarkan analisis sensitivitas, dimana parameter yang signifikan dalam mempengaruhi laju infiltrasi model Philip adalah sorptivitas. Namun demikian, kalibrasi model infiltrasi ini masih didasarkan pada data pengukuran proses infiltrasi pada lereng yang tertutup abu vulkanik skala laboratorium sehingga masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memperoleh model yang lebih akurat dengan melakukan kalibrasi model terhadap pengukuran aktual laju infiltrasi, konduktivitas hidraulik dan sorptivitas pada lereng tertutup abu vulkanik di lapangan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat terlaksana atas dukungan berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Pengembangan Teknologi Industri, Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Ristek/BRIN selaku institusi yang mendanai penelitian ini melalui Program INSINAS. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Balai Teknik Sabo Yogyakarta atas dukungan akses fasilitas Laboratorium Lahar dalam pelaksanaan uji model fisik.

## DAFTAR PUSTAKA

Abd Elbasit, M. A. M., Yasuda, H., Salmi, A., & Anyoji, H. (2010). Characterization of rainfall generated by drifter-type rainfall

- simulator using piezoelectric transducers and its impact on splash soil erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(4), 466–475.  
<https://doi.org/10.1002/esp.1935>
- Al-Azawi, S. A. (1985). Experimental Evaluation of Infiltration Models. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, 24(2), 77–88.  
<https://www.jstor.org/stable/43944562>
- Alexander, J., Barclay, J., Sušnik, J., Loughlin, S. C., Herd, R. A., Darnell, A., & Crossweller, S. (2010). Sediment-charged flash floods on Montserrat: The influence of synchronous tephra fall and varying extent of vegetation damage. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 194(4), 127–138.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.05.002>
- Assouline, S. (2009). Drop size distributions and kinetic energy rates in variable intensity rainfall: Kinetic energy rates in variable intensity rainfall. *Water Resources Research*, 45(11), W11501(1-7).  
<https://doi.org/10.1029/2009WR007927>
- Chen, L., Wu, S., & Minghui, Y. (2016). How does slope gradient affect runoff and soil erosion on hillslopes? *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2016, EP33D-1033.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (2008). *Applied hydrology* ([Nachdr.], internat. ed. 1988). McGraw-Hill.
- Duhita, A. D. P., Rahardjo, A. P., & Hairani, A. (2021). Effect of Slope on Infiltration Capacity and Erosion of Mount Merapi Slope Materials. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 7(1), 71–84.  
<https://doi.org/10.22146/jcef.58350>
- Fox, D. M., Bryan, R. B., & Price, A. G. (1997). The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma*, 80(1–2), 181–194.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00075-X)
- Gran, K. B., Montgomery, D. R., & Halbur, J. C. (2011). Long-term elevated post-eruption sedimentation at Mount Pinatubo, Philippines. *Geology*, 39(4), 367–370.  
<https://doi.org/10.1130/G31682.1>
- Hendrayanto, Kobashi, S., Mizuyama, T., & Kosugi, K. (1995). Hydrological characteristics of new volcanic ash deposit. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 8(5), 484–491.  
<https://doi.org/10.3178/jjshwr.8.484>
- Horne, M. (2017). Thesis: *Design and Construction of a Rainfall Simulator for Large-Scale Testing of Erosion Control Practices and Products* [Auburn University].  
<https://etd.auburn.edu/handle/10415/5593>
- Huang, J., Kang, Q., Yang, J. X., & Jin, P. W. (2017). Multifactor analysis and simulation of the surface runoff and soil infiltration at different slope gradients. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 82, 012019.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/82/1/012019>
- Hudson, N. (1963). Raindrop size distribution in high intensity storms. *Rhodesian Journal of Agricultural Research*, 1(1), 6–11.
- Igbadun, H. E., & Idris, U. D. (2008). Performance Evaluation of Infiltration Models in a Hydromorphic Soil. *Nigerian Journal of Soil and Environmental Research*, 7(1), 53–59.  
<https://doi.org/10.4314/njser.v7i1.28418>
- Igbadun, H. E., Othman, M. K., & Ajayi, A. S. (2016). Performance of Selected Water Infiltration Models in Sandy Clay Loam Soil in Samaru Zaria. *Global Journal of Researches in Engineering*, 16(4), 9–14.  
[https://globaljournals.org/GJRE\\_Volume16/2-Performance-of-Selected-Water.pdf](https://globaljournals.org/GJRE_Volume16/2-Performance-of-Selected-Water.pdf)
- Jones, R., Thomas, R. E., Peakall, J., & Manville, V. (2017). Rainfall-runoff properties of tephra: Simulated effects of grain-size and antecedent rainfall. *Geomorphology*, 282, 39–51.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.023>
- Jung, N. (2010). *Ecohydraulic modelling of eutrophication for reservoir management: Dissertation* (1st Ed.). CRC Press.  
<http://site.ebrary.com/id/11007123>
- Kara, T., Ekmekci, E., & Apan, M. (2008). Determining the Uniformity Coefficient and Water Distribution Characteristics of Some Sprinklers. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11(2), 214–219.  
<https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.214.219>
- Kusumosubroto, H. (2013). *Aliran Debris dan Lahar* (1st ed.). Graha Ilmu.
- Major, J. J., Janda, R. J., & Daag, A. S. (1996). Watershed disturbance and lahars on the east side of Mount Pinatubo during the mid-June 1991 eruptions. In C. G. Newhall & R.S. Punongbayan (Eds.), *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo* (pp. 895–919). University of Washington Press; USGS Publications Warehouse.  
<http://pubs.er.usgs.gov/publication/70217604>

- Major, J. J., & Mark, L. E. (2006). Peak flow responses to landscape disturbances caused by the cataclysmic 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington. *Geological Society of America Bulletin*, 118(7-8), 938-958. <https://doi.org/10.1130/B25914.1>
- Major, J. J., & Yamakoshi, T. (2005). Decadal-scale change of infiltration characteristics of a tephra-mantled hillslope at Mount St Helens, Washington. *Hydrological Processes*, 19(18), 3621-3630. <https://doi.org/10.1002/hyp.5863>
- Maroufpoor, E., Faryabi, A., Ghamarnia, H., & Moshrefi, G. Y. (2010). Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler irrigation systems under different field conditions in Kurdistan Province (Northwest of Iran). *Soil and Water Research*, 5(No. 4), 139-145. <https://doi.org/10.17221/42/2009-SWR>
- Miyata, S., Ahemad, H., Fujita, M., Tsujimoto, H., & Teratani, T. (2016, October). Temporal change of infiltration characteristics of volcanic ash layer and its effect on rainfall runoff processes. *Integrated Study on Mitigation of Multimodal Disasters Caused by Ejection of Volcanic Product*. SATREPS Workshop, Kyoto, Japan. <http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/new2/wp-content/uploads/2016/11/AbstractsWorkshop2016.pdf>
- Ngezahayo, E., Burrow, M., & Ghataora, G. (2021). Calibration of the Simple Rainfall Simulator for Investigating Soil Erodibility in Unpaved Roads. *International Journal of Civil Infrastructure*, 4, 144-156. <https://doi.org/10.11159/ijci.2021.018>
- Ningsih, S., & Purnama, Ig. L. S. (2012). Kajian Laju Infiltrasi Tanah Dan Imbuan Airtanah Lokal Sub DAS Gendol Pasca Erupsi Merapi 2010. *Jurnal Bumi Indonesia*, 1(2), 218-226.
- Pierson, T. C., & Major, J. J. (2014). Hydrogeomorphic Effects of Explosive Volcanic Eruptions on Drainage Basins. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42(1), 469-507. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054913>
- Sanyoto, N. A., & Rahardjo, A. P. (2020). *Pengaruh ketebalan abu vulkanik terhadap kapasitas infiltrasi pada material lereng terbuka Gunung Merapi*. Universitas Gadjah Mada.
- Simandjuntak, T. O., & Barber, A. J. (1996). Contrasting tectonic styles in the Neogene orogenic belts of Indonesia. In *Geological Society Special Publication* (pp. 185-201). <http://sp.lyellcollection.org/>
- Smith, J. A., Hui, E., Steiner, M., Baeck, M. L., Krajewski, W. F., & Ntelekos, A. A. (2009). Variability of rainfall rate and raindrop size distributions in heavy rain: Rainfall rate and raindrop size distribution. *Water Resources Research*, 45(4), W04430(1-12). <https://doi.org/10.1029/2008WR006840>
- Sousa Júnior, S. F. de, Mendes, T. A., & Siqueira, E. Q. de. (2017). Development and calibration of a rainfall simulator for hydrological studies. *RBRH*, 22(0). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0217170015>
- Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product (RECP) Performance in Protecting Hillslopes from Rainfall-Induced Erosion* (Standard for Test Method ASTM-D6459-19; p. 10). (2019). American Society for Testing and Materials.
- Tagata, S., Yamakoshi, T., Doi, Y., Kurihara, J., Terada, H., & Sakai, N. (2005). Post-Eruption Characteristics of Rainfall Runoff and Sediment Discharge at the Miyakejima Volcano, Japan. (*Proceedings of Symposium Sediment Budget 1*, 291, 291-301. <https://iahs.info/uploads/dms/13006.09%2037-45%20S11-13%20Tagata.pdf>
- Tarasenko, I., Bielders, C. L., Guevara, A., & Delmelle, P. (2019). Surface crusting of volcanic ash deposits under simulated rainfall. *Bulletin of Volcanology*, 81(5), 30. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1289-6>
- Teramoto, Y., Shimokawa, E., & Jitousono, T. (2006). Effects of volcanic ash on the runoff process in Sakurajima Volcano. *Proceedings of the INTERPRAEVENT International Symposium "Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides"*, 1, 303-310. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.552.4228&rep=rep1&type=pdf>
- Turner, E. R. (2006). Thesis: *Comparison of Infiltration Equations and their Field Validation with Rainfall Simulation*. University of Maryland.
- Yakubu, M. L., Yusop, Z., & Yusof, F. (2014). The Modelled Raindrop Size Distribution of Skudai, Peninsular Malaysia, Using Exponential and Lognormal Distributions. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2014/361703>

- Yunita, F. T., Prinadiastari, I., & Ridwan, B. W. (2015). *Konsep Penataan Ruang di Daerah Rawan Bencana Sedimen: Teknologi Sabo sebagai Elemen Pengendali Banjir Lahar dalam Penataan Ruang di Kawasan Merapi* (1st ed.). Pusat Litbang Sumber Daya Air, Badan Litbang Kementerian PUPR. <https://simantu.pu.go.id/personal/img-post/autocover/d22a846c4a836b568d3ec6ce5927c285.pdf>
- Zaennudin, A. (2010). The characteristic of eruption of Indonesian active volcanoes in the last four decades. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 1(2), 113-129. <http://dx.doi.org/10.34126/jlbg.v1i2.10>