

PEMANFAATAN DATA ASTER GDEM DAN SRTM UNTUK PEMODELAN ALIRAN LAHAR GUNUNG KELUD PASCA ERUPSI 2014

Azzadiva Ravi Sawungrana
azzadv@outlook.com

Taufik Hery Purwanto
taufik@ugm.ac.id

Abstract – *Kelud Volcano is one of the most hazardous volcano in Indonesia due to its lahar activity. The use of ASTER GDEM and SRTM was based on the fact that those data are easily obtained. This study uses Iverson's algorithm which predicts lahar hazard zone using three parameters: volume, starting-points, and elevation-data. Laharz has two main coefficients: cross sectional coefficient and planimetric area coefficient. Both were made on the basis of hypothetical debris flow and non-volcanic lava-flow in the subtropical zone which may not correspond with Kelud Volcano, Indonesia. Results show that Laharz may provide optimal accuracy for Kelud's physical characteristic on $C = 0,02$ and $K = 200$ for ASTER GDEM and $K = 175$ for SRTM. The final optimal accuracy is 75% for ASTER GDEM and 56% for SRTM. The accuracy indicates that 30 m spatial resolution DEM still need improvements to reach the best accuracy with detailed output.*

Keyword – *Kelud, Laharz, Lahar modelling, ASTER GDEM, SRTM*

Intisari – Gunungapi Kelud merupakan salah satu gunungapi yang paling berbahaya di Indonesia karena aktivitas laharnya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memahami kemampuan ASTER GDEM dan SRTM dalam pemodelan aliran lahar serta memperkirakan aliran lahar Gunungapi Kelud di masa mendatang. Penelitian ini menggunakan algoritma-Iverson yang memprediksi zona bahaya lahar menggunakan tiga parameter: volume, titik awalan, dan data ketinggian. Laharz sendiri memiliki dua koefisien yang membangun modelnya : koefisien area potongan melintang (C) dan koefisien area planimetrik (K). Kedua koefisien ini berperan penting dalam pemodelan Laharz, namun keduanya dibuat dengan dasar aliran debris hipotetik dan aliran lahar volkanik di zona subtropis yang kemungkinan tidak sesuai dengan Gunungapi Kelud, Indonesia. Hasil menunjukkan bahwa Laharz dapat memberikan akurasi optimal pada C senilai 0,02 dan K senilai 200 untuk ASTER GDEM dan K senilai 175 untuk SRTM dengan akurasi berturut-turut 75% dan 56%. Akurasi ini menunjukkan urgensi dari resolusi temporal dalam bidang penelitian vulkanologi.

Kata Kunci – Kelud, Kelut, Laharz, ASTER GDEM, SRTM

I. Latar Belakang

Gunung Kelud merupakan salah satu gunung di Indonesia dengan aktivitas yang sangat aktif dan dengan daya ledak mencapai skala 4 *Volcano Eruption Index* (VEI). Sejarah letusan menyatakan bahwa daur aktivitas Gunung Kelud berkisar antara 15 sampai dengan 30 tahun dengan kegiatan erupsi utama terjadi di bagian kawah yang berisi air pada ketinggian >1600 m dpl dengan letusan berupa semburan lahar primer dengan suhu hingga 200⁰ C (Kusumadinata et. al., 1979; Zaennudin et. al., 1986). Keeksplosifan letusan Gunung Kelud ini diakibatkan oleh keterlibatan air danau bervolume relatif besar dan dengan kubah lava yang memperbesar efek letusan.

Kusumadinata et. al. (1979) mencatat bahwa G. Kelud pernah menghasilkan beberapa kubah lava tahun 1376 dan sumbat lava tahun 1920 yang kemudian dihancurkan lagi oleh letusan-letusan yang terjadi kemudian.

Gunung Kelud dianggap sebagai salah satu gunungapi paling berbahaya di Pulau Jawa karena frekuensi erupsinya yang tinggi. Aktivitas erupsinya berupa lahar yang mematikan dengan gelombang dan aliran piroklastik yang diklaim pernah membunuh lebih dari 15.000 jiwa sejak tahun 1500 dan mengakibatkan kerusakan parah dengan area kerusakan yang luas. Kawah Kelud terkenal dengan potensinya yang mampu melepaskan lahar kapanpun terjadi erupsi. Erupsi 1586 memproduksi salah satu dari lahar terburuk dalam catatan sejarah erupsi vulkanik dan merenggut 10.000 nyawa. (Universite Libre de Bruxells, 2002)

Secara relatif Gunung Kelud dikelilingi oleh beberapa kota dan kabupaten yang memiliki populasi tinggi seperti Kota dan Kabupaten Kediri di sebelah barat, Kabupaten Blitar di sebelah selatan, Kota Batu dan Kota Malang di sebelah timur, serta Kabupaten Jombang di sebelah utara. Posisi relatif terhadap kota dan kabupaten yang memiliki populasi tinggi seperti ini membuat Gunung Kelud menjadi salah satu gunungapi di Indonesia yang memiliki faktor resiko tinggi.

Penginderaan jauh sebagai salah satu teknologi modern dapat menjadi salah satu solusi dari masalah resiko erupsi Gunung Kelud ini sekaligus melihat potensi keuntungan yang bisa didapatkan akibat aktivitas Gunung Kelud. Data penginderaan jauh ini didapatkan dengan harga yang murah, namun dengan cakupan yang luas.

Alasan inilah yang membuat penginderaan jauh menjadi penting untuk kajian vulkanologi, khususnya untuk resiko erupsi Gunung Kelud.

ASTER GDEM dan SRTM merupakan data *digital elevation model* (DEM) yang dapat digunakan untuk memperkirakan aliran massa yang mungkin dikeluarkan oleh Gunung Kelud saat mengalami erupsi. Data DEM ini dapat digunakan sebagai dasar pemodelan yang menggunakan basis pemodelan berupa kondisi topografi. Ketersediaan data setelah erupsi eksplosif Gunung Kelud terakhir (13 Februari 2014) menjadi masalah karena hanya SRTM saja yang merilis DEM setelah kejadian tersebut. Adapun ASTER GDEM merilis data terbaru pada Gunung Kelud setelah erupsi tahun 2007 dan sebelum erupsi 2014. Terlepas dari ketersediaan data, ASTER GDEM dan SRTM yang tersedia secara gratis mampu menjadi analisis awal dalam penentuan kawasan berbahaya pada beberapa kejadian erupsi gunungapi di Indonesia. Namun masalah yang mungkin terjadi adalah data ASTER GDEM dan SRTM yang bukan data ketinggian bumi tanpa penutup lahan namun bumi dengan penutup lahannya, sehingga sangat mungkin model yang digunakan mengalami gangguan dari penutup lahan ini.

Berdasarkan perumusan masalah di atas maka timbul beberapa pertanyaan penelitian berikut :

1. Apakah peran yang dapat dilakukan oleh penginderaan jauh dalam prediksi bencana erupsi Gunungapi Kelud pasca erupsi 2014?
2. Bagaimanakah kemampuan SRTM v3 dan ASTER GDEM v2 1 arc-second dalam pemodelan aliran lahar di Gunungapi Kelud pasca erupsi 2014?
3. Bagaimanakah kemampuan algoritma Iverson et al. dalam pemodelan aliran lahar di Gunungapi Kelud pasca erupsi 2014?

II. Tinjauan Pustaka

2.1 Penginderaan Jauh

Penginderaan jauh adalah seni, ilmu, dan teknologi untuk memperoleh informasi mengenai objek fisik dan lingkungan melalui perekaman, pengukuran, dan interpretasi citra dan secara digital merepresentasikan pola tenaga yang diperoleh dari sensor tanpa kontak langsung.

2.2 Digital Elevation Model (DEM)

Data ketinggian sangat penting dalam aplikasi geosains yang memanfaatkan data ketinggian untuk pemetaan geologi hingga pemodelan tiga dimensi bumi. Contoh data-data yang menggunakan data ketinggian ini adalah ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), LiDAR (*Light Detection and Ranging*) secara terestris dan menggunakan wahana terbang, NEXTMap, SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) dan batimetri. Pemanfaatan data-data ini mencakup pada pemetaan longsor lahan, abrasi, deposit glasial dan pemetaan bahayanya, dan lain-lain. Data-data ketinggian ini disebut dengan data *Digital Elevation Model* (Fleming et. al., 2010).

2.3 SRTM

SRTM dikembangkan oleh NASA, tepatnya pada *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) sebagai kerjasama antara NASA, *the United States National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), dan *the German and Italian Space Agencies* (Crippen, 2010). Misi SRTM ini mengumpulkan data sebesar 12 *terabytes* hampir pada semua permukaan bumi antara 60⁰ utara hingga 56⁰ selatan hanya dalam 11 hari pada Februari 2000. Pengukuran elevasi didapatkan dari analisis sinyal radar saluran C dan diproses oleh JPL. Resultan DEM mendapatkan hasil 1 arc-second (30 m), dengan resolusi vertikal absolut lebih baik daripada spesifikasi misi sebesar 16 (Rodriguez et. al., 2006)

2.4 ASTER GDEM

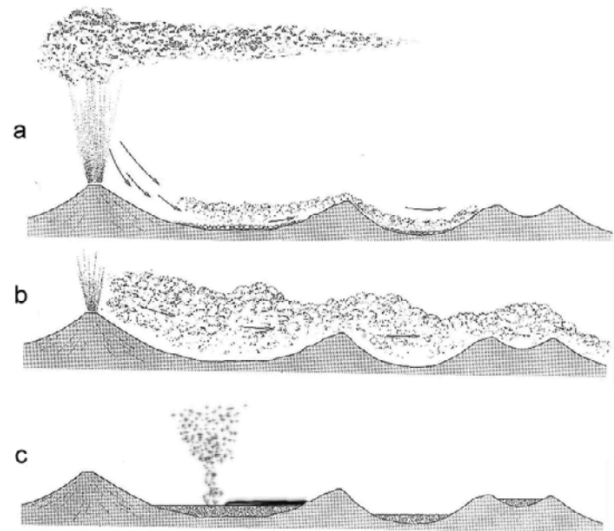
Di sisi yang lain, terdapat misi lain yang serupa dengan SRTM yaitu ASTER. ASTER telah mengumpulkan data DEM bumi mulai dari 8⁰ lintang utara hingga 8⁰ lintang selatan. ASTER adalah salah satu sensor yang beroperasi pada Terra, satelit yang diluncurkan pada Desember 1999 sebagai bagian dari misi *Earth Observing System* (EOS) milik NASA (Abrams, 2000).

Resolusi spasial ASTER beragam terkait dengan panjang gelombangnya yaitu 15 m pada saluran tampak dan inframerah dekat, 30 m pada saluran inframerah pendek, dan 90 m pada saluran inframerah thermal. Terdapat saluran tambahan yang menjadi kunci dari produksi data DEM oleh ASTER yang dinamakan dengan saluran 3B dengan nadir yang sama dengan saluran 3 (inframerah dekat) namun dengan menggunakan

sudut tembak ke belakang dengan sudut sebesar 28⁰ memberikan pasangan citra stereo pada ASTER (Crippen, 2010).

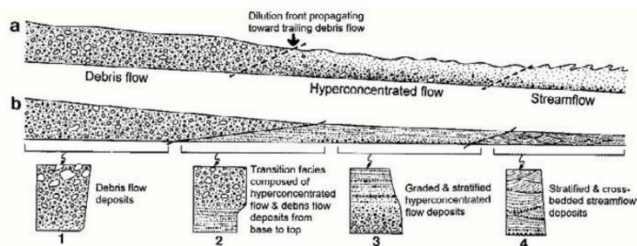
2.5 Lahar

Lahar adalah hasil tidak langsung dari aktivitas vulkan yang besar berupa aliran lumpur (Scarath, 1994). Lahar merupakan salah satu dari gaya yang bersifat destruktif yang berasosiasi dengan erupsi. Menurut Scarath (1994) lahar merupakan bahaya yang sangat mengancam di Indonesia dan kata lahar sendiri didapatkan dari Indonesia. Kecepatan aliran lahar membuatnya sangat mematikan.



Gambar 1. Mekanisme deposisional deposit aliran piroklastik. a : erupsi kolom yang diikuti aliran piroklastik. b : memperlihatkan propagasi lateralis aliran piroklastik. c : kondisi deposit aliran piroklastik setelah erupsi. (sumber : Daag, 2003 hal. 14)

Sohn, Rhee, & Kim (1999) memberikan diagram skematik (**Gambar 2**) yang memperlihatkan hubungan antara aliran lahar (dari aliran debris, aliran hiperkonsentrasi, hingga aliran *stream*). **Gambar 2a** memperlihatkan kejadian aliran tunggal yang diawali dengan aliran debris, diteruskan dengan aliran hiperkonsentrasi, dan akhirnya aliran *stream*. Deposit yang dihasilkan ditampilkan dalam **Gambar 2b**. Dengan identifikasi struktru stratigrafi deposit tipe aliran dapat ditentukan. Aliran debris memberikan deposit yang kasar. Deposit aliran hiperkonsentrasi dicirikan oleh tekstur pasir hingga kerikil, sortasi yang buruk, dan tidak adanya *cross-bedding*. (Daag, 2003)



Gambar 2. Diagram skematik Sohn. (sumber ; Sohn et. al., 1999 hal. 26)

III. Daerah Penelitian

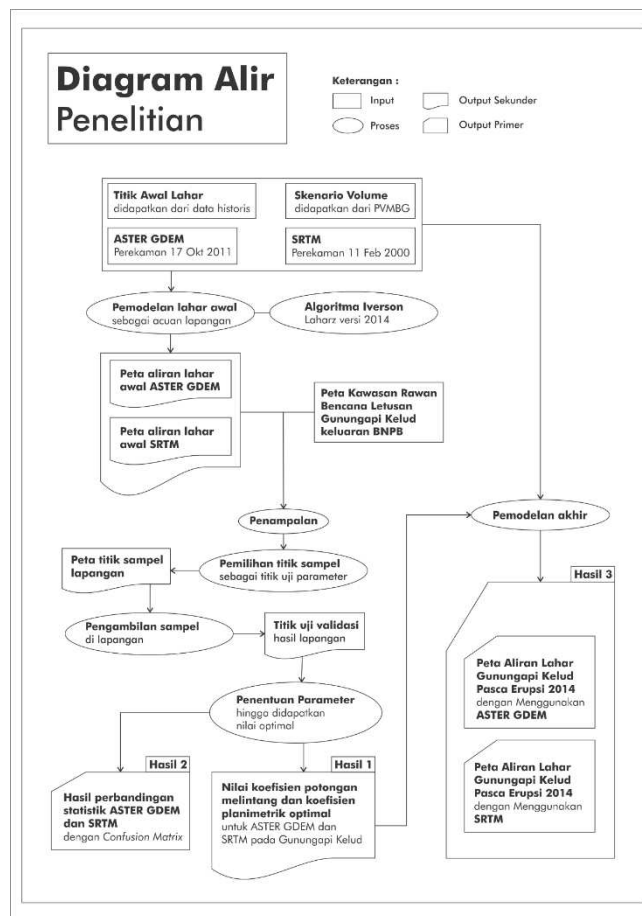
Gunungapi Kelud dipilih pada penelitian ini karena bahaya Gunungapi Kelud yang besar dengan kerawanan yang tinggi akibat kedekatannya dengan daerah padat penduduk. Gunungapi Kelud juga merupakan gunungapi yang unik karena memiliki ciri khas kubah lava dalam proses erupsi. Penelitian tentang pemodelan erupsi dan/atau aliran massa di Gunungapi Kelud terbilang masih langka, sehingga untuk pemantauan dan mitigasi bencana penelitian semacam ini masih sangat dibutuhkan dari berbagai sudut pandang dari berbagai bidang. Area penelitian yang dipilih adalah area yang secara historik dilalui oleh aliran lahar Gunungapi Kelud dan juga tentunya hasil dari model. Secara administrasi area ini meliputi sebagian daerah Kabupaten Malang, sebagian daerah Kota Kediri, dan sebagian daerah Kabupaten dan Kota Blitar.

Daerah penelitian yang digunakan dibatasi dengan batas koordinat UTM dari 9093425 mU hingga 9155855 mU dan 613282 mT hingga 657472 mT yang meliputi sungai-sungai yang memiliki hulu dari Gunungapi Kelud, diantaranya adalah Kali Konto, Kali Ngabo, Kali Sumberagung, Kali Lahar (Petungkabong), Kali Gedog, Kali Temas, Kali Ngaglik-Bladak, Kali Putih, dan Kali Semut.

IV. Metode

Data sumber berupa titik awalan dan volume didapatkan dari sumber historis baik dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) ataupun sumber lainnya. Langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan pemodelan dengan menggunakan parameter default pada kedua data DEM untuk kemudian dijadikan dasar penentuan titik sampel lapangan bersama dengan peta eksisting.

Hasil lapangan berupa titik-titik validasi kemudian digunakan untuk mencari dan menentukan parameter koefisien potongan melintang dan koefisien planimetrik optimal di Gunungapi Kelud.



Gambar 3. Diagram alir penelitian.

V. Hasil dan Pembahasan

Laharz memerlukan input yang sederhana, tidak kompleks, dengan berdasarkan eksperimen dan aliran asli baik vulkanik maupun non-vulkanik. Input yang sederhana ini membuat Laharz digunakan secara meluas bahkan hingga pengembangannya untuk aliran *rockfall*. Input yang diperlukan dalam Laharz yaitu :

Pertama, DEM : *Digital Elevation Model* merupakan input data paling dasar yang diperlukan dalam pemodelan ini. DEM dalam format *Digital Surface Model* maupun *Digital Terrain Model* dapat digunakan dalam pemodelan ini. DEM menjadi dasar arah dan akumulasi aliran yang dapat merumuskan besar kecilnya lahar nantinya. Ketelitian DEM secara vertikal dan horizontal menjadi penentu utama kualitas hasil dari model. Hal ini dikarenakan aliran lahar akan mengikuti

besaran piksel dari piksel bernilai besar menuju ke piksel bernilai rendah.

Prinsip ini merupakan prinsip yang serupa dengan prinsip fluida dimana fluida akan mengalir dari tempat tinggi menuju ke tempat yang rendah dengan tekanan dan suhu yang relatif sama. Dua data DEM yang digunakan antara lain adalah data SRTM 1-arsec dan ASTER GDEM 1-arsec. Data ASTER GDEM 1-arsec digunakan sebagai uji validasi model dengan tanggal perekaman pada 17 Oktober 2011 dan SRTM 1-arsec digunakan sebagai sumber model untuk prediksi dengan tanggal *update* pada 2 Januari 2015. Data ASTER GDEM 1-arsec memiliki resolusi vertikal relatif sebesar 16 m dan SRTM 1-arsec memiliki resolusi vertikal relatif sebesar 12,5 m (Forkuor & Maathuls, 2012).

Resolusi vertikal relatif sebesar ini jelas akan mempengaruhi hasil, terutama pada bentuklahan lereng bawah gunungapi hingga dataran fluvial gunungapi karena sungai akan cenderung memiliki kedalaman yang dangkal sehingga kedalaman sungai yang tidak mencapai 12,5 meter tidak akan terbaca. Kondisi itu adalah jika piksel secara utuh dilewati oleh sungai. Terdapat kondisi lain yang lebih sering terjadi dimana piksel yang terbentuk merupakan piksel campuran, baik antara sungai, tanah di sebelahnya, maupun vegetasi yang mengelilingi, sehingga data DEM dari ASTER GDEM dan SRTM ini memiliki kemungkinan kesalahan yang masih tinggi.

Namun, data DEM ASTER GDEM dan SRTM memiliki kelebihan pada ketersediaannya yang gratis dan mencakup seluruh dunia. Sehingga apabila pemodelan lahar dengan menggunakan ASTER GDEM dan SRTM dapat diandalkan, biaya dalam mitigasi bencana gunungapi dapat dipangkas. Dari penjabaran di atas dapat ditarik beberapa perkiraan kesalahan : 1. Sungai dengan kedalaman yang kurang dari 12,5 m akan mengalami kesalahan yang sedang hingga parah, 2. Sungai dengan lebar yang kurang dari 30 meter kemungkinan besar juga akan mengalami kesalahan pemodelan, 3. Sungai dengan tutupan vegetasi yang lebat akan mengalami kesalahan pemodelan pula.

Kedua, volume. Seperti yang telah dijabarkan dalam subbab sebelumnya, volume yang dihasilkan pada erupsi Gunungapi Kelud pada tahun 2014 yang lalu serta yang akan digunakan dalam pemodelan adalah sebesar >50 juta m³. Volume ini merupakan volume total dari

deposisi material vulkanik berupa lapili kerikil, pasir, hingga abu. Volume ini menjadi potensi lahar setelah tahun 2014 yang dilepaskan secara signifikan pada musim hujan tahun 2015 menurut beberapa warga di sekitar Kali Bladak, Kali Putih, Kali Semut, dan Kali Konto. Adapun Gunungapi Kelud memiliki setidaknya 10 sungai utama yang mengalir dari puncak gunung sehingga dapat dengan sederhana ditarik beberapa skenario.

Skenario pertama adalah jika aliran dengan volume material 50 juta m³ mengalir semua sungai dengan nilai yang sama, 50 juta m³ : 10 = 5 juta m³. Skenario-skenario volume berikutnya dibuat dengan interval yang sama dengan asumsi semua sungai memiliki potensi yang mirip. Skenario berikutnya adalah 10 juta m³, 20 juta m³. Skenario terakhir tidak mengikuti interval namun langsung pada volume 50 juta m³ dengan asumsi setiap sungai mampu mengalirkan volume maksimal yang terjadi.

Ketiga, sumber aliran. Algoritma Laharz membutuhkan sumber aliran sebagai titik awal aliran. Titik awal aliran ini akan mempengaruhi kemana aliran akan menuju. Sumber aliran ini dapat diasosiasikan dengan kawah-kawah yang berada di area Gunungapi Kelud. Hanya saja algoritma Laharz memiliki kelemahan dimana algoritma ini tidak bisa memecah aliran. Aliran yang terjadi hanya bisa mengalir dari satu arah. Sehingga untuk mengakomodasi kesepuluh sungai utama dan beberapa sungai yang lebih kecil yang berhulu di area puncak Gunungapi Kelud maka digunakan sepuluh koordinat ditambah empat koordinat untuk sumber aliran lahar.

Parameterisasi dalam perangkat lunak lahar ini digunakan untuk mendapatkan konstanta yang sesuai dengan keadaan lapangan di Gunungapi Kelud. Parameterisasi ini dimaksudkan untuk merevisi konstanta yang telah dibuat oleh Iverson et. al. (1998) secara statistik menggunakan 27 data lahar pada sembilan gunungapi dan beberapa gunungapi hipotetik. Kesembilan gunungapi ini merupakan gunungapi yang berada di Meksiko dan Amerika Serikat yang beriklim sub-tropis yang tentu saja berbeda dengan iklim dan geologi-geomorfologi Indonesia. Oleh karena perbedaan inilah parameterisasi perlu dilakukan

4.1 Penentuan Parameter ASTER GDEM

Penentuan parameter ASTER GDEM dilakukan dengan menggunakan awalan parameter *default*, lalu mulai menggunakan nilai C yang

disarankan oleh Castruccio dan Clavero (2015) dengan nilai akurasi optimal pada parameter keenam ($K=200$) dengan nilai akurasi sebesar 0,75 atau 75%. Pengukuran statistik lainnya digunakan untuk melengkapi pemahaman terhadap sifat data. Hasil dari pengukuran statistik penentuan parameter ASTER GDEM adalah sebagai berikut : **Tabel 1** Tabel hasil statistik penentuan parameter Laharz dengan menggunakan ASTER GDEM
Sumber : Pengolahan data

Secara umum dapat terlihat bahwa hasil aliran lahar ASTER GDEM memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi di kisaran 0,76 hingga 0,9 yang menunjukkan banyaknya keadaan lahar ditebak dengan benar, Sensitivitas ini sendiri memiliki nilai optimal pada nilai penentuan parameter 6 ($C=0,2$; $K=200$) dan 7 ($C=0,2$; $K=225$) dengan nilai 0,905. Keadaan sensitivitas sebesar ini menunjukkan banyaknya jumlah titik uji dan lahar hasil model bertampalan dengan nilai benar “merupakan lahar” yang besar.

Akurasi, yang merupakan unsur terpenting karena digunakan untuk melihat kualitas seberapa benar model, bervariasi dengan pola yang meningkat hingga puncaknya pada penentuan parameter ke 6 ($C=0,2$; $K=200$) dengan nilai akurasi sebesar 0,75 atau 75%. Akurasi ini menunjukkan seberapa banyak lahar pasca erupsi eksplosif 2014 di lapangan yang ditebak benar dan banyak non lahar serta lahar sebelum erupsi 2014 yang ditebak benar. Akurasi sebesar ini menunjukkan kualitas yang baik mengingat ketelitian vertikal dan horizontal yang hanya berturut-turut sebesar 16 meter dan 30 meter.

Error Rate merupakan kebalikan dari akurasi. Error rate ini dihitung berdasarkan banyaknya kesalahan, baik kesalahan dalam menyatakan bahwa lahar pasca erupsi 2014 bukan merupakan lahar maupun lahar sebelum pasca erupsi 2014 maupun kesalahan dalam menyatakan bahwa non lahar atau lahar sebelum erupsi 2014 dinyatakan sebagai lahar pasca 2014.

False positive rate menunjukkan seberapa banyak kesalahan model dalam menentukan lahar pasca erupsi 2014. FPR terendah dimiliki oleh penentuan parameter keenam dengan nilai 0,545. Sedangkan specificity menunjukkan seberapa banyak tebakan negatif (bukan lahar atau lahar sebelum erupsi 2014) benar. Specificity tertinggi juga dimiliki oleh penentuan parameter keenam dengan nilai 0,45. Hal ini menunjukkan bahwa

akurasi yang cukup tinggi pada penentuan parameter keenam didapatkan dari penebakan positif yang ditunjukkan dalam tingkat presisi. Tingkat presisi tertinggi ini pun dimiliki oleh penentuan parameter keenam dengan nilai sebesar 0,76 yang menunjukkan besarnya tebakan positif (lahar pasca erupsi 2014) benar. Dalam tingkat akurasi yang sama bisa didapatkan nilai presisi, FPR, dan specificity yang berbeda seperti pada

Parameter				
	1 (default)	2 (K=100)	3 (K=125)	4 (K=150)
ACC	0,5625	0,53125	0,625	0,6875
ERR	0,4375	0,46875	0,375	0,3125
SEN	0,764702	0,85714	0,88235	0,89474
FPR	0,666667	0,72222	0,66667	0,61538
SPE	0,333333	0,27778	0,33333	0,38462
PRE	0,565217	0,48	0,6	0,68
PRV	0,53125	0,4375	0,53125	0,59375
	5 (K=175)	6 (K=200)	7 (K=225)	
ACC	0,71875	0,75	0,71875	Akurasi
ERR	0,28125	0,25	0,28125	Error Rate
SEN	0,9	0,90476	0,90476	Sensitivity
FPR	0,58333	0,54545	0,63636	False Positive Rate
SPE	0,41667	0,45455	0,36364	Specificity
PRE	0,72	0,76	0,73077	Presisi
PRV	0,625	0,65625	0,65625	Prevalensi

penentuan parameter ketujuh dan penentuan parameter kelima yang memiliki akurasi yang berbeda namun memiliki presisi, FPR, dan specificity yang berbeda. Hal ini mungkin terjadi akibat dari perbedaan tebakan benar yang berbeda namun berjumlah benar yang sama sehingga menghasilkan akurasi yang sama. Prevalensi, menunjukkan seberapa sering kondisi lahar pasca 2014 (benar) benar-benar terjadi di seluruh sampel, atau dengan kata lain prevalensi ini menunjukkan kejadian lahar 2014 seberapa sering dibandingkan dengan keseluruhan sampel. Prevalensi tertinggi dimiliki oleh parameter keenam yang memiliki jumlah lahar 2014 aktual terbanyak.

Hasil pengukuran statistik dari penentuan parameter pada ASTER GDEM menunjukkan akurasi tertinggi pada nilai parameter $C=0,02$ dan $K=200$ yang memberikan akurasi sebesar 0,75 atau 75%. Akurasi yang cukup baik untuk diandalkan dalam analisis aliran lahar di Gunungapi Kelud.

4.2 Penentuan Parameter SRTM

Penentuan parameter SRTM dilakukan serupa dengan penentuan parameter ASTER GDEM. Hal yang perlu diingat dari hasil yang didapatkan adalah resolusi temporal SRTM yang tidak diperbaharui sejak waktu peluncurannya, yakni 11 Februari 2000. Oleh karenanya, SRTM memiliki kemungkinan besar untuk memiliki hasil statistik yang lebih buruk walaupun akurasi geometrik vertikalnya lebih baik daripada ASTER GDEM.

Tabel 2 Hasil statistik penentuan parameter Laharz dengan menggunakan SRTM.

	Parameter		
	1 (default)	2 (K=100)	3 (K=125)
ACC	0,46875	0,40625	0,5
ERO	0,53125	0,59375	0,5
SEN	0,75	0,875	0,90909
FPR	0,7	0,75	0,71429
SPE	0,3	0,25	0,28571
PRE	0,3913	0,28	0,4
PRV	0,375	0,25	0,34375
	4 (K=150)	5 (K=175)	6 (K=200)
ACC	0,5	0,5625	0,53125
ERO	0,5	0,4375	0,46875
SEN	0,90909	0,92308	0,91667
FPR	0,71429	0,68421	0,7
SPE	0,28571	0,31579	0,3
PRE	0,4	0,48	0,44
PRV	0,34375	0,40625	0,375

Sumber : Pengolahan data

Hasil statistik dari penentuan parameter SRTM menunjukkan Sensitivity yang tinggi pula dengan nilai tertinggi pada penentuam parameter 5 ($C=0,02;K=175$) dengan nilai 0,92 yang menunjukkan banyaknya model positif (lahar pasca erupsi 2014) ditebak dengan benar. Hal ini juga menunjukkan banyaknya titik uji dan lahar hasil model yang bertampalan. Namun akurasi, yang merupakan unsur terpenting pada statistik penentuan parameter ini bernilai menengah dengan nilai tertinggi ada pada penentuan parameter 5 yakni 0,56 atau 56%, dengan kata lain hanya 56% model yang memiliki tebakan akurat. Akurasi sebesar ini sangat kurang untuk digunakan sebagai acuan perencanaan wilayah yang membutuhkan keakuratan sumber data yang tinggi untuk mengurangi *error propagation*. SRTM memiliki ketelitian vertikal yang lebih baik daripada ASTER GDEM karena sensornya yang

berupa SAR dibandingkan dengan ASTER GDEM yang menggunakan data ketinggian yang didapatkan dari stereo foto. Hanya saja ASTER GDEM lebih *up to date* sehingga data ketinggian di dalamnya menjadi lebih valid karena terdapat erupsi efusif 2007. Error rate terendah yang merupakan kebalikan dari akurasi tertinggi tentu saja dimiliki oleh penentuan parameter ke 5 dan tertinggi dimiliki penentuan parameter kedua hingga mencapai 0,6 atau 60% dari model salah.

FPR terendah dimiliki oleh parameter kelima yang menunjukkan sedikitnya kesalahan model pada parameter kelima dalam menentukan tebakan positif (lahar pasca erupsi 2014) yakni sebesar 0,68 atau 68%. Artinya 68% dari tebakan positif salah. Hal ini menunjukkan bahwa tebakan positif dalam pemodelan dengan menggunakan SRTM merupakan kesalahan atau dengan kata lain aliran lahar hasil model tidak melalui tempat yang semestinya dilalui di lapangan. Specificity tertinggi dimiliki oleh parameter kelima dengan nilai 0,32 yang menunjukkan banyaknya tebakan negatif (bukan lahar pasca erupsi 2014) benar. Nilai ini juga sangat kecil, mengindikasikan bahwa model mendeteksi area bukan lahar atau bukan lahar pasca erupsi 2014 merupakan lahar. Presisi tertinggi dimiliki oleh parameter kelima pula dengan nilai sebesar 0,48 atau 48%. Artinya, hanya 48% dari tebakan positif (lahar pasca erupsi 2014) yang ditebak benar. Dapat disimpulkan bahwa akurasi yang rendah dari SRTM ini dikarenakan oleh banyaknya tebakan positif dan negatif dari model yang salah. Prevalensi tertinggi juga dimiliki oleh penentuan parameter kelima dengan nilai 0,4 atau 40% yang menunjukkan hanya 40% dari tebakan benar (lahar pasca erupsi 2014) terjadi di seluruh sampel. Akurasi tertinggi dimiliki oleh parameter kelima dengan nilai 56%.

Perbandingan akurasi optimal ASTER GDEM yang sebesar 75% dengan akurasi optimal SRTM yang sebesar 56% menunjukkan dominasi ASTER GDEM karena sifatnya yang lebih *up to date* mengingat terjadi erupsi efusif pada tahun 2007 yang sangat mungkin mempengaruhi pola aliran dari Gunungapi Kelud. Perbandingan dari hasil statistik yang lain pun didominasi oleh ASTER GDEM dengan tingkat presisi yang tinggi pula. Akurasi yang lebih tinggi tentu saja menunjukkan sifat klasifikasi prediksi yang lebih baik. Akurasi tertinggi pada penentuan parameter ini, seperti yang telah disampaikan sebelumnya,

adalah parameter keenam dengan nilai akurasi sebesar 0,66. Nilai ini sedikit lebih besar daripada parameter kelima dan parameter ketujuh yang memiliki akurasi dengan besaran yang sama, yakni 0,64. Akurasi tertinggi yang belum mencapai 0,7 ini termasuk akurasi yang rendah.

Kesimpulan yang dapat diambil adalah pembaharuan dalam analisis pemodelan Gunungapi, khususnya aliran lahar, merupakan faktor yang sangat penting dan bahkan lebih penting daripada ketelitian vertikal dari data DEM yang berselisih sekitar 4-5 meter. Parameter optimal yang didapatkan pada masing-masing DEM saling mendekati satu sama lain, yakni ASTER GDEM dengan parameter optimal $C=0,02$ dan $K=200$ (sesuai dengan penelitian Castruccio dan Clavero [2015]) serta SRTM dengan parameter optimal $C=0,02$ dan $K=175$.

Parameterisasi yang dilakukan secara repetitif memberikan gambaran baik tentang kelebihan dan kekurangan model karena pengulangan dan akurasi yang bisa didapatkan. Jika dibandingkan dengan model lain dengan sumber data yang sama, model algoritma Iverson et al. (1998) jauh lebih mudah dilakukan karena hanya memerlukan data masukan berupa data DEM. Algoritma ini memiliki beberapa kekurangan, yakni :

1. Ketidakmungkinan aliran terpecah menjadi beberapa aliran yang lebih kecil. Aliran fluida di lapangan tentu saja dapat memecah mengikuti percabangan outlet. Padahal percabangan ini digunakan di lapangan sebagai salah satu solusi mitigasi bencana aliran lahar yang memecah aliran utama agar tidak terlalu besar kepada outlet-outlet yang lebih kecil dengan proporsi masing-masing. Oleh karenanya, ketidakmampuan aliran bercabang ini akan sangat mempengaruhi akurasi model.
2. Area inundasi sangat tergantung pada awalan yang ditentukan oleh pengguna sehingga sangat diperlukan data aliran lahar atau prediksi aliran lahar sebelumnya. Lahar di lapangan cenderung terjadi dengan sangat mengikuti bentuk morfologi gunungapi.
3. Tidak adanya kecepatan awal lahar (V_0) yang dapat terjadi pada aliran lahar panas (lahar letusan) yang merupakan salah satu karakteristik dari Gunungapi Kelud yang mempengaruhi kecepatan dan jarak jangkauan lahar dari pusat awalan.

4. *Underestimation* yang terjadi menyebar di wilayah dengan relief yang datar yang ditunjukkan dengan aliran yang meruncing-runcing, yang tentunya sangat tidak mungkin untuk aliran fluida.
5. Tidak ada pertimbangan akumulasi aliran jika terdapat aliran yang bertemu. Salah satu karakter fluida adalah menyatu dengan aliran fluida lain yang memiliki viskositas dan rho yang sama. Aliran yang bertemu tentunya juga akan menambah besaran volume yang menyatu, membentuk aliran yang lebih besar, dan lebih berbahaya dalam kaitannya dengan bahaya aliran lahar.
6. Aliran lahar mengalir serentak, berhenti, lalu mengendap, tidak seperti yang terjadi di lapangan dimana aliran lahar mengalir sembari mengendap. Lahar di lapangan cenderung mengalir dengan beberapa gelombang aliran, bukan satu aliran besar.
7. Skenario volume aliran sangat sulit untuk didapatkan sekaligus berbahaya jika pengumpulan data volume aliran memang ingin dilakukan.
8. Kondisi sungai dianggap statis, tidak dinamis. Pemodelan ini menganggap bahwa saat terjadi aliran lahar tidak terjadi perubahan 1 mm pun pada outlet yang dilewati, padahal dengan massa jenis aliran sebesar aliran lahar debris sangat tidak mungkin tidak terjadi perubahan pada outlet.
9. Hujan tidak diperhitungkan dalam pemodelan ini, padahal hujan merupakan salah satu faktor pemicu utama aliran lahar. Faktor hujan dalam pemodelan ini sudah dianggap menyatu dalam parameter volume.
10. Zonasi puncak dalam *hazard zone proximal* sangat tidak efektif untuk gunungapi dengan karakteristik seperti Gunungapi Kelud yang memiliki puncak rendah serta tak beraturan dan ukuran kawah yang cukup besar.

VI. Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan pada bab sebelumnya, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. ASTER GDEM dan SRTM dapat dimanfaatkan dalam pemodelan aliran lahar dengan tingkat akurasi tertentu yang dipengaruhi oleh resolusi spasial dan

geometrik dari data DEM tersebut dan resolusi temporal data yang secara langsung berefek pada pembaharuan data.

2. ASTER GDEM memiliki akurasi lebih tinggi daripada SRTM untuk pemodelan aliran lahar Gunungapi Kelud pasca erupsi 2014 dengan menggunakan algoritma Iverson dengan nilai akurasi sebesar 75% berbanding 56%.
3. Koefisien potongan melintang (C) dan koefisien planimetrik (K) pada algoritma Iverson yang paling optimal untuk menggambarkan keadaan fisik Gunungapi Kelud dengan menggunakan ASTER GDEM dan SRTM adalah 0,02 untuk koefisien potongan melintang (C) dan 200 (ASTER GDEM) serta 175 (SRTM) untuk koefisien planimetrik (K).

Daftar Pustaka

Abrams, M. (2000). *The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform*. International Journal of Remote Sensing 21, 847-859.

Castruccio, A., & Clavero, J. (2015). *Lahar simulation at active volcanoes of the Southern Andes: implications for hazard assessment*. Natural Hazards 77, 693-716.

Crippen, R. E. (2010). *Global topographical exploration and analysis with the SRTM and ASTER elevation models*. Dalam C. Fleming, S. H. Marsh, & J. R. Giles, Elevation Models for Geoscience (hal. 5-15). London: Special Publications.

Fleming, C., Marsh, S., & Giles, J. (2010). *Introduction elevation models for geosciences*. Dalam C. Fleming, S. H. Marsh, & J. R. Giles, Elevation Models for Geoscience (hal. 1-4). London: Special Publications.

Iverson, R., Schilling, S., & Vallance, J. (1998). *Objective delineation of lahar inundation hazard zones*. Dalam GSA Bulletin (hal. 972-984)

Rodriguez, E., Morris, C., & Belz, J. (2006). *A global assessment of the SRTM performance*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 72, 249-260.

Scarth, A. (1994). *Volcanoes An Introduction*. London: UCL Press Limited.

Sohn, Y., Rhee, C., & Kim, B. (1999). *Debris Flow and Hyperconcentrated Flood-Flow Deposits in an Alluvial Fan, Northwestern Part of the Cretaceous Yongdong Basin, Central Korea*. Journal of Geology, Vol. 107, 111-132.

Universite Libre de Bruxells. (2002, February 19). Kelud Volcano. Diambil kembali dari IAVCEI Commission of Volcanic Lakes: www.ulb.ac.be/sciences/cvl/DKIPART2.pdf.