



MODELING AND SIMULATION OF TRAFFIC FLOWS ON INCLINED ROAD DURING EVACUATION PROCESS OF THE VOLCANO DISASTER WITH FINITE DIFFERENCE METHOD

Richasanty Septima S^{*}, Said Munzir, Salmawaty
Jurusan Matematika, Pascasarjana Matematika, Universitas Syiah Kuala
Jl. Syech Abdur Rauf No. 4 Darussalam – Banda Aceh
*Email: richaseptima@gmail.com

Abstract. *The research in this thesis was done to examine the model of traffic flow of volcanic disaster evacuation path for uphill and downhill roads. The assessment was focused on the area of disaster evacuation path from the Pante Raya Bener Meriah intersection to Takengon. This model is assessed for two different types of time when which a disaster occurs; the disaster occurred at night and the disaster occurred during the day, especially during peak hours (working hours). The model was developed with attention to the existence of inflow and outflow along the evacuation route. Furthermore, the model obtained is solved numerically by using finite difference method. The chosen approach of this method is upwind scheme with time and space steps using forward difference and backward difference. The solution of this model in the form of simulated vehicle density along evacuation pathways. The research conducted is in the form of a model of traffic flow on evacuation paths and restricted to the inflow and outflow without alternative path as well as the conditions of the road which are uphill and downhill, showed a high density of vehicles either at night or during the day. Uphill road conditions resulted in decreased vehicle speed and vehicle density will increase, while downhill road conditions resulted in increased vehicle speed and vehicle density will decrease, meaning that the road conditions which are uphill and downhill will greatly affect the process of evacuation. Degree vehicles of evacuation efficiency occurring at night without an alternative pathway produces a high efficiency so that it can be interpreted that the evacuation process in the evening was successful and runs better than the evacuation process during the day, and this is caused by the existence of vehicles on the road evacuation process started thus affecting the efficiency levels.*

Keywords : *Traffic flows, finite difference method, upwind scheme method, forward difference, backward difference, greenshield method, uphill road, downhill road.*

I. PENDAHULUAN

Sistem transportasi tidak luput dari adanya arus lalu lintas. Dalam pelaksanaannya, teori arus lalu lintas adalah kajian tentang gerakan pengendara dan kendaraan antara dua titik dan interaksi antar keduanya. Secara teoritis terdapat hubungan yang mendasar antar tiga parameter yaitu arus (*flow*), kecepatan (*speed*) serta kepadatan (*density*) (Tamin, 2008). Salah satu permasalahan yang sering terjadi pada lalu lintas adalah kemacetan. Jika arus lalu lintas mendekati kapasitas, kemacetan mulai terjadi. Kemacetan semakin meningkat apabila arus begitu besarnya sehingga kendaraan sangat berdekatan satu sama lain. Kemacetan total apabila kendaraan harus berhenti atau bergerak lambat [1]. Penelitian yang telah membahas tentang kemacetan diantaranya adalah yang menganalisis tentang simulasi kemacetan kendaraan saat evakuasi bencana gempa dan tsunami di Banda Aceh [2]. Tujuan penelitiannya adalah untuk membuat model simulasi kemacetan pada jalur evakuasi bencana. Kemacetan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi

tingkat keberhasilan proses evakuasi bencana, baik bencana karena kondisi alam maupun akibat perbuatan manusia seperti banjir, gempa bumi, tsunami dan bencana akibat kecelakaan industri. Masalah yang timbul akibat bencana ini adalah bagaimana cara mengevakuasi manusia untuk menghindari banyak jatuh korban. Transportasi darat merupakan jalur evakuasi bencana yang banyak digunakan sebagaimana disebutkan oleh Dash dan Gladwin [3].

Keberhasilan suatu evakuasi tergantung pada banyak faktor, seperti waktu peringatan, kesiapsiagaan masyarakat, informasi dan petunjuk prosedur evakuasi, jalur evakuasi, kondisi lalu lintas serta sistem manajemen arus lalu lintas yang baik. Sebuah skenario evakuasi bencana dapat digunakan untuk merencanakan cara terbaik untuk menghindari atau mengurangi dampak bencana [4]. Penelitian yang telah membahas tentang simulasi evakuasi bencana telah dilakukan yakni melakukan optimalisasi dan simulasi arus lalu lintas untuk evakuasi arus kendaraan di jalan-jalan perkotaan yang sempit [5].

Kaisar and Paar melakukan penelitian tentang permasalahan arus lalu lintas untuk evakuasi bencana akibat ulah manusia seperti kebocoran bahan kimia dipabrik-pabrik [6]. Mahfuzailda melakukan penelitian tentang pemodelan dan simulasi aliran lalulintas pada jalur evakuasi bencana wilayah Banda Aceh [7].

Kondisi geografis Aceh yang berada pada jalur pegunungan api (*ring of fire*) mengakibatkan banyak pegunungan api yang masih aktif sampai sekarang. Salah satunya adalah gunung Burni Telong yang terletak di Kabupaten Bener Meriah pasca tsunami terjadi di Aceh beberapa tahun yang lalu mengakibatkan gunung ini memperlihatkan keaktifannya, untuk itu kita perlu mempersiapkan segalanya demi mengantisipasi hal-hal yang mungkin akan terjadi agar tidak menimbulkan banyak korban. Salah satu daerah yang dapat digunakan sebagai tempat penyelamatan adalah kota Takengon sekitar 30 km dari gunung berapi. Salah satu jalur menuju ke kota Takengon adalah melalui Simpang Teritit dimana jalur yang ditempuh adalah daerah pegunungan dengan kondisi jalan miring yang terdiri atas jalan yang menanjak dan menurun. Satu hal lagi jalur ini merupakan jalur yang rawan akan terjadinya longsor, akibatnya akan timbul kemacetan pada jalur ini ketika semua orang berdesakan menggunakan jalur ini sebagai jalur utama menuju titik aman. Hal ini yang mendasari peneliti untuk mengkaji skenario jalur evakuasi bencana yang baik dan diharapkan dapat meminimalisasi resiko bencana yang terjadi. Studi kasus yang akan diteliti yaitu jalur evakuasi bencana dari Simpang Teritit menuju Takengon sebagai titik aman.

II. METODOLOGI

Karakteristik Arus Lalu Lintas

Karakteristik lalu lintas terjadi karena adanya interaksi antara pengendara dengan kendaraan di jalan. Pada saat ini pembahasan tentang arus lalu lintas dikonsentrasikan pada variabel-variabel arus (*flow*), kecepatan (*speed*), dan kepadatan (*density*). Arus lalu lintas (*flow*) adalah jumlah kendaraan yang melintasi suatu titik persatuan waktu tertentu [8].

$$q = \frac{n}{t} \quad (1)$$

dimana q adalah arus lalu lintas (kend/jam), n adalah jumlah kendaraan yang melintasi titik tertentu dan t adalah waktu (jam).

Menurut Hall kecepatan dapat didefinisikan sebagai gerak dari kendaraan dalam jarak persatuan waktu [9]. Dalam perhitungannya kecepatan rata-rata dibedakan menjadi dua yaitu :

1. *Time mean speed* (TMS) didefinisikan sebagai kecepatan rata-rata dari seluruh kendaraan yang melewati suatu titik dari jalan selama periode tertentu.

$$v_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{l}{t_i} \quad (2)$$

dimana v_t adalah kecepatan rata-rata kendaraan pada waktu t , n adalah jumlah sampel, l adalah panjang penggal jalan dan t_i adalah waktu tempuh kendaraan jenis i

2. *Space mean speed* (SMS) yakni kecepatan rata-rata dari seluruh kendaraan yang menempati penggalan jalan selama periode tertentu.

$$v_s = \frac{l}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i} \quad (3)$$

dimana v_s adalah kecepatan rata-rata kendaraan pada suatu penggal jalan, n adalah jumlah sampel, l adalah panjang penggal jalan dan t_i adalah waktu tempuh kendaraan jenis ke- i

Menurut Hall kepadatan dapat didefinisikan sebagai jumlah kendaraan yang menempati suatu panjang jalan atau lajur [9]

$$\rho = \frac{q}{v} \quad (4)$$

Kelandaian adalah garis lurus berupa garis datar, mendaki atau menurun pada letak geometris jalan. Kelandaian jalan merupakan hasil bagi antara selisih ketinggian dengan jarak datar yang biasa dinyatakan dengan persen.

$$\text{Kelandaian} = \frac{B}{A} \cdot 100\% \quad (5)$$

dimana B adalah jarak datar jalan (meter) dan A adalah ketinggian jalan (meter). Kecepatan kendaraan akan berkurang secara signifikan jika kelandaianya besar. Demikian juga kendaraan yang menurun kecepatannya akan bertambah besar jika tidak dibantu dengan pengereman. Secara alamiah, jika kendaraan menanjak, kecepatannya akan berkurang (terdapat perlambatan) dan jika kendaraan menurun (tanpa direm) maka akan timbul percepatan. Tabel 1 adalah klasifikasi kelandaian menurut kondisi medan

Tabel 1 Klasifikasi kelandaian menurut kondisi medan

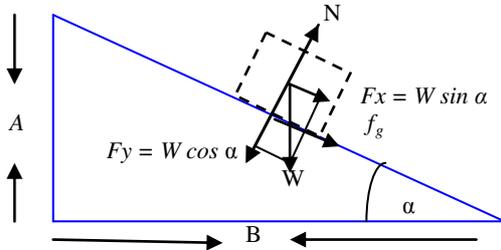
Jenis Medan	Rata-rata Kelandaian Melintang (%)
Datar (D)	0 – 9,9
Perbukitan (PB)	10 – 24,9
Pegunungan (PG)	>25

Sumber: [10]

Daya Tanjak Maksimum adalah kemampuan maksimum suatu kendaraan untuk menahan dengan beban spesifikasi. Sudut Tanjakan dapat dihitung :

$$\alpha = \frac{B}{A} \quad (6)$$

dimana A adalah tinggi tanjakan, B adalah panjang tanjakan dan α adalah sudut tanjakan (Gambar 1).



Gambar 1 Hubungan antara panjang tanjakan, tinggi tanjakan dan sudut untuk benda pada bidang miring

Model Hubungan Arus, Kecepatan dan Kepadatan Model Greenshields

Model ini adalah model yang paling awal dalam upaya mengamati perilaku lalu lintas. Greenshields mendapatkan hasil bahwa hubungan antara kecepatan dan kepadatan bersifat linier. Model ini dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$v = v_f - \left(\frac{v_f}{\rho_d}\right) \rho \quad (7)$$

dimana v adalah kecepatan rata-rata kendaraan (kendaraan/jam), v_f adalah kecepatan kendaraan pada kondisi lalu lintas sangat rendah (km /jam), ρ adalah kepadatan kendaraan (kendaraan/jam) dan ρ_d adalah kepadatan pada kondisi lalu lintas macet total (kendaraan/jam) [11]. Memperhatikan rumus diatas, pada dasarnya merupakan suatu persamaan linier, $y=a+bX$ dimana dianggap bahwa v_f merupakan konstanta a dan v_f/ρ_d adalah konstanta b sedangkan v_s dan ρ masing-masing merupakan variabel Y dan X . Untuk mendapatkan nilai a dan b dapat digunakan metode regresi linier, yaitu :

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (8)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (9)$$

Model Hubungan, Arus, Kecepatan, kepadatan dan kemiringan jalan

Pada kondisi jalan yang menanjak dan menurun akan didapatkan hubungan matematis untuk kecepatan terhadap kepadatan arus lalu lintas dan hubungannya dengan kemiringan/kelandaian jalan sehingga mengakibatkan terjadinya perubahan

percepatan/perlambatan terhadap kecepatan, arus dan kepadatan.

$$a = g(\alpha - \mu) \quad (10)$$

dimana g adalah gaya gravitasi (9,8 m/s), α adalah besar sudut dan μ adalah koefesien gesekan ($\mu=1$). Persamaan (10) digunakan sebagai persamaan percepatan pada jalan menanjak dan menurun dengan asumsi pada jalan menanjak percepatan akan bertambah sedangkan pada jalan menurun percepatan akan berkurang. Untuk sudut kelandaian pada persamaan (10) didapat dari persamaan (5). Dari persamaan (10) diatas dapat disubstitusikan kepersamaan kecepatan-kepadatan terhadap waktu dan panjang lintasan pada arah menanjak. Berikut adalah formula untuk menentukan kecepatan rata-rata ruang (v) berdasarkan kecepatan kondisi arus lalu lintas (v_f) dan kepadatan kondisi detik (ρ_d) terhadap waktu dan panjang lintasan dimana percepatan (a) yang bertambah diakibatkan jalanan yang menanjak.

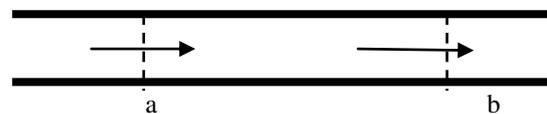
$$v = v_f - \left(\frac{v_f}{\rho_d} + a\right) \rho \quad (11)$$

Sedangkan untuk kondisi jalan yang menurun tidak terlalu banyak hal yang perlu diperhatikan hanya pada kecepatan laju kendaraan maksimum yang mungkin akan bertambah sehingga percepatannya berkurang. Adapun persamaan matematisnya untuk hubungan kecepatan-kepadatan pada arah menurun adalah

$$v_s = v_f + \left(\frac{v_f}{\rho_d} - a\right) \rho \quad (12)$$

Model Arus Lalu Lintas (Traffic Stream Models)

Gambar 2 mengilustrasikan posisi kendaraan pada posisi a dan b. Menurut Habberman Gambar 2 mengilustrasikan posisi kendaraan pada posisi a dan b di sebuah jalan [12].



Gambar 2 Ilustrasi arus lalu lintas

Diasumsikan bahwa tidak terdapat arus yang masuk dan keluar pada jalan tersebut, akibatnya jumlah kendaraan yang melewati jalan tersebut merupakan jumlah kepadatan kendaraan antara dua posisi a dan b, yang dapat dinyatakan sebagai

$$N = \int_a^b \rho(x, t) dx \quad (13)$$

dengan N adalah jumlah kendaraan, ρ adalah kepadatan kendaraan, x adalah panjang jalan, dan t

adalah waktu tempuh kendaraan. dari persamaan (13) akan didapatkan persamaan model arus lalu lintas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

Untuk arus lalu lintas dengan adanya jalur masuk maka persamaan diatas menjadi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = \beta \quad (15)$$

dengan β merupakan arus lalu lintas yang masuk.

Metode Beda Hingga (*Finite Difference Method*)

Metode beda hingga adalah metode yang mengubah derivative dari persamaan diferensial menjadi *difference* (beda) dengan menggunakan ekspansi deret Taylor. Dengan mendiskritisasi model arus lalu lintas menjadi persamaan beda hingga berikut:

$$\begin{aligned} \rho_k(i, j + 1) &= \rho_k(i, j) - \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_0 + 2a_1 \rho_k) \rho_{(i, j)} - \rho_{i-1, j} \\ \rho_m(i, j + 1) &= \rho_m(i, j) - \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_0 + 2a_1 \rho_m) \rho_{(i, j)} - \rho_{i-1, j} \end{aligned} \quad (16)$$

Ditentukan nilai Δx dan Δt yang bersesuaian, pada penelitian ini dipilih sembarang dengan dilakukan pengujian kestabilan simulasi. Kriteria batas

kestabilan untuk model arus lalu lintas pada skema numerik *upwind scheme* berdasarkan *Courant number* (C). Apabila digunakan metode eksplisit sebaiknya nilai $C \leq 1$, dimana $C = q' \frac{\Delta t}{\Delta x}$ sehingga nilai stabilitasnya menjadi :

$$C = q' \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1, \text{ dengan } q' = \frac{dq}{d\rho} \quad (17)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data primer diperoleh melalui survei kendaraan langsung di jalan Pante Raya menuju Takengon sehingga diperoleh data kecepatan dan kepadatan dari kendaraan di jalan tersebut. Data primer digunakan untuk mendapatkan karakteristik kendaraan yang melaju pada jalan atau mendapatkan hubungan antara kecepatan dengan kepadatan kendaraan di jalan tersebut. Untuk mendapatkan data primer ini, survei dilakukan di jalan Takengon-Bireun dengan tiga titik berbeda, masing-masing untuk jalan mendatar, jalan menanjak dan jalan menurun. Data pada Tabel 2 digunakan untuk membuat formulasi kepadatan kendaraan menggunakan model *Greenshield* sehingga didapatkan model arus lalu lintas untuk jalan mendatar, menanjak dan menurun.

Tabel 2 Data untuk membuat formulasi kepadatan kendaraan menggunakan model *Greenshield*

No	Kepadatan (smp/meter)	Kecepatan (meter/dtk)	x ²	x*y	No	Kepadatan (smp/meter)	Kecepatan (meter/dtk)	x ²	x*y
1	2,0	16,00	4,0	32,00	43	1,0	48,00	1,0	48,00
2	2,0	12,00	4,0	24,00	44	3,0	6,00	36,0	18,00
3	2,0	16,00	4,0	32,00	45	7,0	5,30	49,0	37,10
4	3,0	6,90	36,0	20,70	46	5,0	6,90	25,0	34,50
5	3,0	12,00	36,0	36,00	47	3,0	16,00	9,0	48,00
6	4,0	8,00	16,0	32,00	48	1,0	48,00	1,0	48,00
7	1,0	48,00	1,0	48,00	49	0,0	0,00	0,0	0,00
8	2,0	16,00	4,0	32,00	50	8,0	5,30	64,0	42,40
9	3,0	12,00	9,0	36,00	51	3,0	12,00	9,0	36,00
10	1,0	48,00	1,0	48,00	52	2,0	16,00	4,0	32,00
11	2,0	16,00	4,0	24,00	53	5,0	8,00	25,0	40,00
12	5,0	6,90	25,0	34,50	54	7,0	6,00	49,0	42,00
13	1,0	48,00	1,0	48,00	55	2,0	16,00	4,0	32,00
14	0,0	0,00	0,0	0,00	56	2,0	16,00	4,0	32,00
15	0,0	0,00	0,0	0,00	57	5,0	9,6	25,0	48,00
16	2,0	16,00	4,0	32,00	58	2,0	8,00	4,0	16,00
17	1,0	48,00	1,0	48,00	59	2,0	12,00	4,0	24,00
18	4,0	8,00	16,0	32,00	60	3,0	24,00	9,0	72,00
19	3,0	12,00	9,0	36,00	61	5,0	16,00	25,0	80,00
20	0,0	0,00	0,0	0,00	62	2,0	12,00	4,0	24,00

21	2,0	16,00	4,0	32,00	63	0,0	0,00	0,0	0,00
22	3,0	12,00	9,0	36,00	64	3,0	16,00	9,0	48,00
23	6,0	6,00	36,0	36,00	65	1,0	48,00	1,0	48,00
24	1,0	48,00	1,0	48,00	66	1,0	48,00	1,0	48,00
25	3,0	12,00	9,0	36,00	67	6,0	8,00	36,0	48,00
26	9,0	5,30	81,0	47,70	68	4,0	8,00	16,0	32,00
27	2,0	12,00	4,0	24,00	69	2,0	12,00	4,0	24,00
28	2,0	16,00	4,0	32,00	70	3,0	16,00	9,0	48,00
29	4,0	8,00	16,0	32,00	71	3,0	12,00	9,0	36,00
30	5,0	6,90	25,0	34,50	72	1,0	48,00	1,0	48,00
31	2,0	12,00	4,0	24,00	73	2,0	16,00	4,0	24,00
32	3,0	12,00	9,0	36,00	74	3,0	12,00	9,0	36,00
33	1,0	48,00	1,0	48,00	75	2,0	24,00	4,0	48,00
34	2,0	16,00	4,0	32,00	76	2,0	12,00	4,0	24,00
35	4,0	8,00	16,0	32,00	77	7,0	9,6	49,0	67,20
36	0,0	0,00	0,0	0,00	78	0,0	0,00	0,0	0,00
37	4,0	8,00	16,0	32,00	79	3,0	16,00	9,0	48,00
38	7,0	5,30	49,0	37,10	80	1,0	16,00	1,0	16,00
39	2,0	12,00	4,0	24,00	81	3,0	8,00	9,0	24,00
40	1,0	48,00	1,0	48,00	82	2,0	16,00	4,0	32,00
41	0,0	0,00	0,0	0,00	83	1,0	48,00	1,0	48,00
42	2,0	24,00	4,0	48,00	84	1,0	48,00	1,0	48,00

Formulasi Kepadatan Kendaraan

Dari model *Greenshield* diperoleh persamaan untuk jalan mendatar sebagai berikut

$$\begin{aligned} v_k &= 8.12 - 2.215\rho_k \\ q'_m &= 9.57 - 6.8\rho_m \end{aligned} \quad (18)$$

Untuk mendapatkan formulasi arus lalu lintas (q) untuk motor dan mobil, persamaan diatas disubstitusikan ke persamaan $q = v \cdot \rho$, untuk kemudian diturunkan terhadap kepadatan (ρ). Kemudian persamaan (18) akan disubstitusikan kepersamaan model arus lalulintas sehingga diperoleh

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + (8.12 - 4.43\rho_k) \frac{\partial \rho_k}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + (9.57 - 6.8\rho_m) \frac{\partial \rho_m}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Dari model *Greenshields* diperoleh model arus lalulintas untuk jalan menanjak

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + (10.54 - 4.62\rho_k) \frac{\partial \rho_k}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + (9.85 - 2.3\rho_m) \frac{\partial \rho_m}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Dari Model *Greenshield* diperoleh model arus lalu lintas untuk jalan menurun

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + (13.28 - 7.76\rho_k) \frac{\partial \rho_k}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + (12.43 - 7.01\rho_m) \frac{\partial \rho_m}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Model Arus lalu lintas (*Traffic Flow*)

Kondisi awal adalah bencana terjadi malam hari dimana, $\rho(0, x) = 0, 0 < x < 4000$ meter dan kondisi batasan adalah adanya inflow dari 3 titik dimana kepadatan kendaraan konstan dinyatakan dengan

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (22)$$

dimana $x=0, 1500, 3150$ dan $t \geq 10, 300, 800$

$$\rho(t) = K + \rho_0, \rho(0, x) \quad (23)$$

untuk $0 < x < 400$ meter, sehingga dapat dinyatakan

$$\begin{aligned} \rho_k(t, (0, 1500, 3150)) &= K_k + \rho_0 \\ \rho_m(t, (0, 1500, 3150)) &= K_m + \rho_0 \end{aligned} \quad (24)$$

dimana K_k adalah sejumlah motor yang masuk dari tiga titik masuk, dan K_m adalah sejumlah mobil yang masuk dari tiga titik masuk.

Penyelesaian Numerik Model Arus Lalu Lintas Jalur Evakuasi Bencana

Untuk jalan mendatar
Kendaraan roda dua

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{i,j+1} - \rho_{i,j}}{\Delta t} + (8.12 - 4.43\rho_k) \frac{\rho_{i,j} - \rho_{i-1,j}}{\Delta x} &= 0 \\ \rho_{ki,j+1} &= \rho_{i,j} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (8.12 - 4.43\rho_k) \rho_{i,j} - \rho_{i-1,j} \end{aligned} \quad (25)$$

Kendaraan roda empat

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{i,j+1} - \rho_{i,j}}{\Delta t} + (9.57 - 6.8\rho_m) \frac{\rho_{i,j} - \rho_{i-1,j}}{\Delta x} &= 0 \\ \rho_{mi,j+1} &= \rho_{i,j} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (9.57 - 6.8\rho_m) \rho_{i,j} - \rho_{i-1,j} \end{aligned} \quad (26)$$

dimana

$$\begin{aligned} \rho_k(0, j) &= K_k + \rho_{0(i,j)}, \\ \rho_m(0, j) &= K_m + \rho_{0(i,j)} \end{aligned} \quad (27)$$

Untuk jalan menanjak
Kendaraan roda dua

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{i,j+1} - \rho_{i,j}}{\Delta t} + (10.54 - 2.31\rho_k) \frac{\rho_{i,j} - \rho_{i-1,j}}{\Delta x} &= 0 \\ \rho_{ki,j+1} &= \rho_{i,j} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (10.54 - 2.31\rho_k) \rho_{i,j} - \rho_{i-1,j} \end{aligned} \quad (28)$$

Kendaraan roda empat

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{i,j+1} - \rho_{i,j}}{\Delta t} + (9.85 - 2.3\rho_m) \frac{\rho_{i,j} - \rho_{i-1,j}}{\Delta x} &= 0 \\ \rho_{mi,j+1} &= \rho_{i,j} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (9.85 - 2.3\rho_m) \rho_{i,j} - \rho_{i-1,j} \end{aligned} \quad (29)$$

Untuk jalan menurun
Kendaraan roda dua

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{i,j+1} - \rho_{i,j}}{\Delta t} + (13.28 - 7.76\rho_k) \frac{\rho_{i,j} - \rho_{i-1,j}}{\Delta x} &= 0 \\ \rho_{ki,j+1} &= \rho_{i,j} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (13.28 - 7.76\rho_k) \rho_{i,j} - \rho_{i-1,j} \end{aligned} \quad (30)$$

Kendaraan roda empat

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{i,j+1} - \rho_{i,j}}{\Delta t} + (12.43 - 7.01\rho_m) \frac{\rho_{i,j} - \rho_{i-1,j}}{\Delta x} &= 0 \\ \rho_{mi,j+1} &= \rho_{i,j} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (12.43 - 7.01\rho_m) \rho_{i,j} - \rho_{i-1,j} \end{aligned} \quad (31)$$

dengan kondisi awal pada Malam hari adalah $\rho(i, 0) = 0$, $0 < i \cdot \Delta x < 4000$ meter dan pada Siang hari adalah $\rho(i, 0) = \rho_0$, $0 < i \cdot \Delta x < 4000$ meter. Kondisi batas didapatkan adanya inflow dengan kepadatan konstan

$$\begin{aligned} \rho_k(0, j) &= K_k + \rho_{0(i,j)}, \\ \rho_m(0, j) &= K_m + \rho_{0(i,j)} \end{aligned} \quad (32)$$

Analisis Numerik Model Arus Lalu Lintas

Analisis numerik model arus lalu lintas dilakukan dengan menggunakan syarat kestabilan (*Upwind Scheme*), model arus lalu lintas dikatakan stabil apabila bilangan courant (C) ≤ 1 , dengan $C = \frac{q' \Delta t}{\Delta x}$. Dengan Δt yang dipilih sebesar 0.05 detik (dengan $t = 100, 500$ hingga 1500 detik), sedangkan dari panjang jalur evakuasi sepanjang 4000 m maka dipilih Δx sebesar 10 meter sehingga ada 400 grid. Hasil pemilihan nilai Δt dan Δx yang bersesuaian disubstitusikan kedalam bilangan *courant* berikut ini.

Untuk jalan mendatar

$$\begin{aligned} C_k &= \frac{(8.12)0.05}{10} = 0.041 < 1, \\ C_m &= \frac{((9.57)0.05)}{10} = 0.047 < 1 \end{aligned} \quad (33)$$

Untuk jalan menanjak

$$\begin{aligned} C_k &= \frac{(8.54)0.05}{10} = 0.042 < 1, \\ C_m &= \frac{((8.85)0.05)}{10} = 0.044 < 1 \end{aligned} \quad (34)$$

Untuk jalan menurun

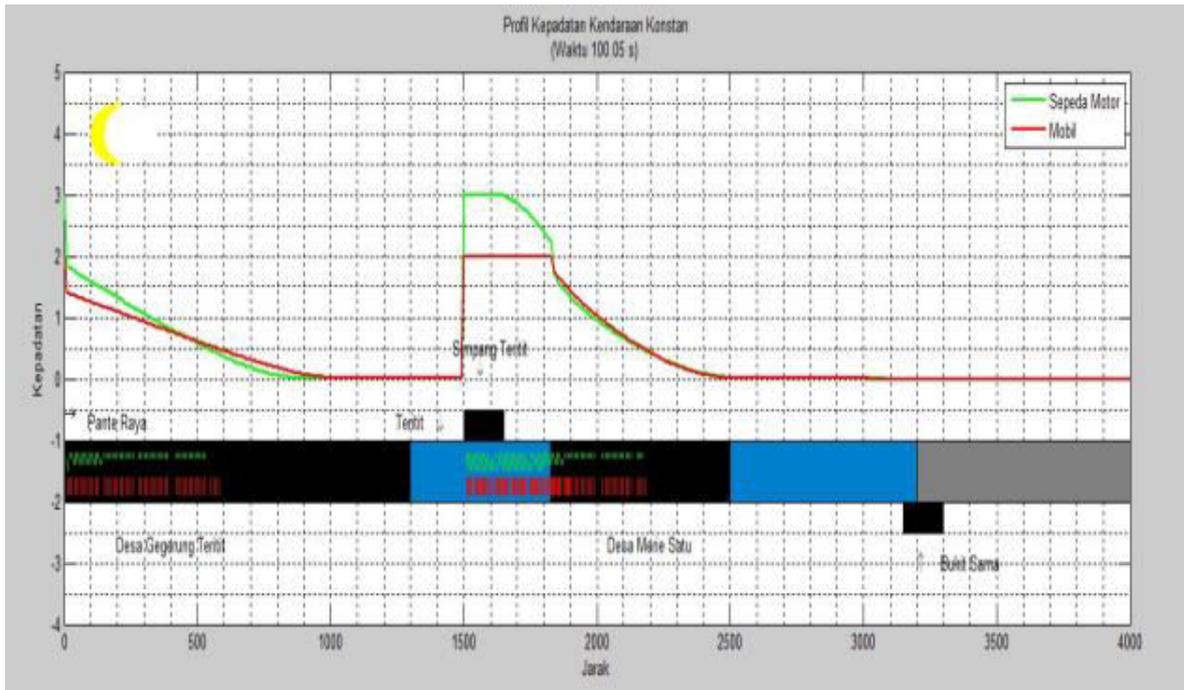
$$\begin{aligned} C_k &= \frac{(13.28)0.05}{10} = 0.066 < 1, \\ C_m &= \frac{((12.43)0.05)}{10} = 0.062 < 1 \end{aligned} \quad (35)$$

Tingkat efisiensi (*TE*) dapat dihitung menggunakan formula:

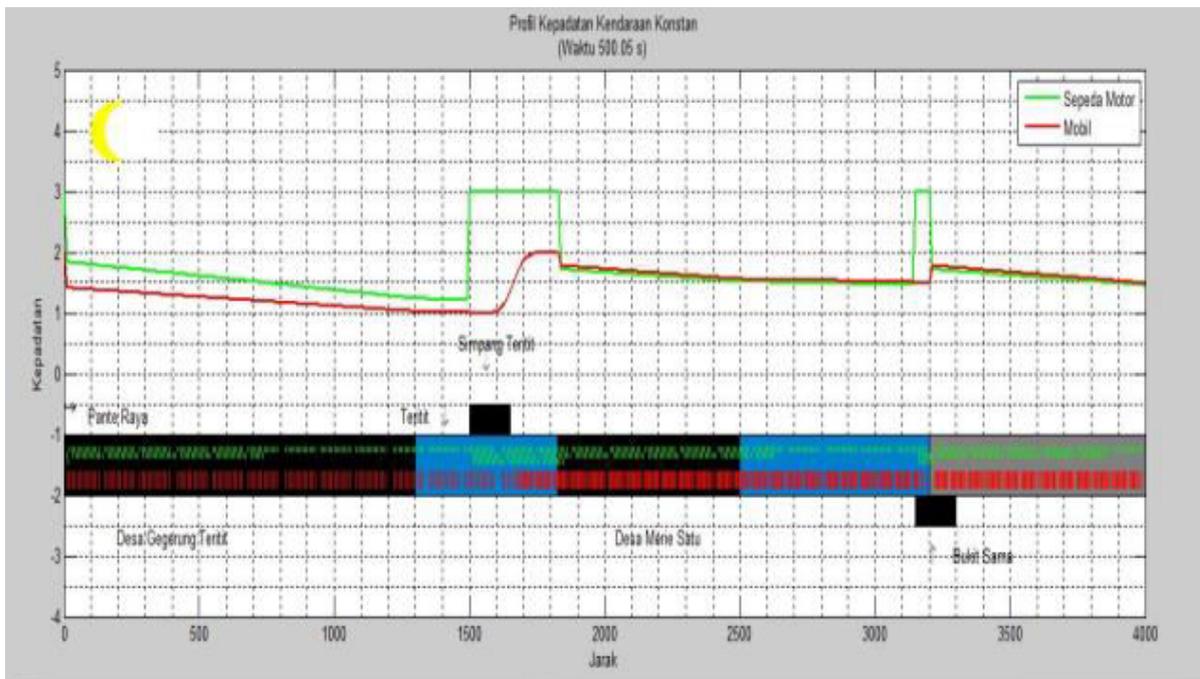
$$TE = 1 - TI \quad (36)$$

Sedangkan untuk mendapatkan Tingkat Inefisiensi (*TI*) didapatkan formula

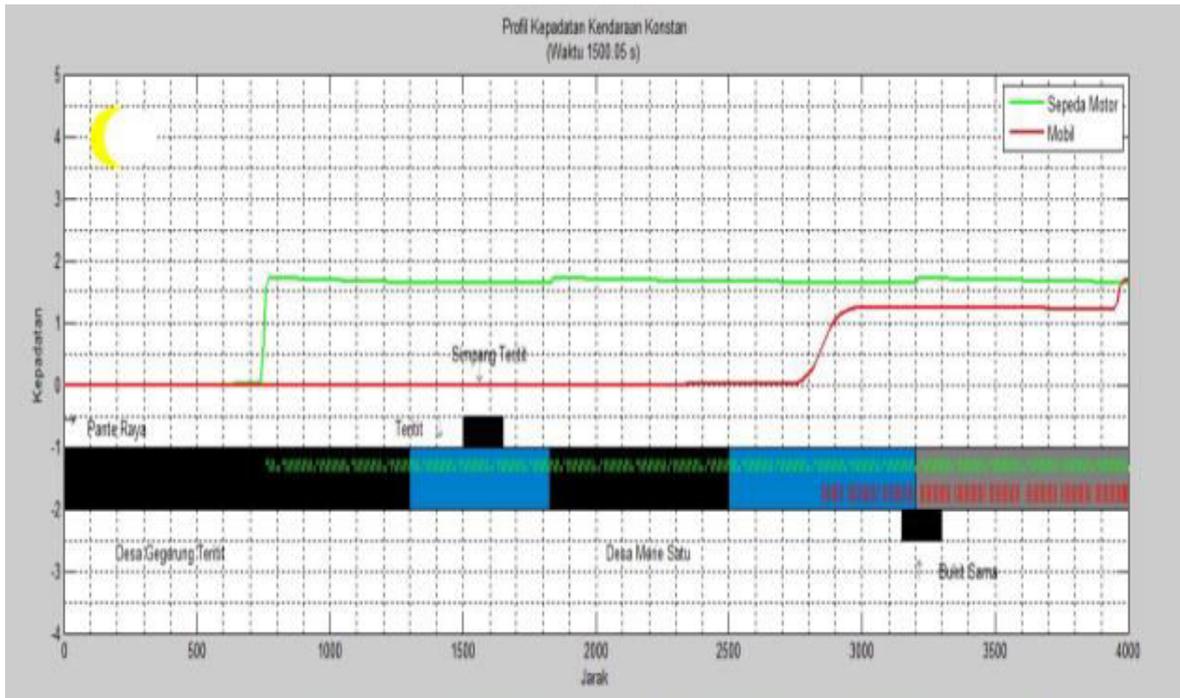
$$TI = \frac{\sum_{t=1}^{1500} \text{panjang kemacetan}}{1500} \quad (37)$$



Gambar 3 Kasus I (100 detik): Profil kepadatan kendaraan motor dan mobil adanya *inflow* tanpa *outflow* pada malam hari dengan durasi 100 detik



Gambar 4 Kasus II (500 detik): Profil kepadatan kendaraan motor dan mobil adanya *inflow* tanpa *outflow* pada malam hari dengan durasi 500 detik



Gambar 5 Kasus III (1500 detik): Profil kepadatan kendaraan motor dan mobil adanya inflow tanpa outflow pada malam hari dengan durasi 1500 detik

Simulasi Arus Lalu Lintas Jalur Evakuasi Bencana

Skenario bencana terjadi malam hari dengan keadaan konstan. Pada Gambar 3 adalah Kasus I dimana waktu adalah 100 detik, terlihat bahwa pada $t = 0$ kendaraan baik motor dan mobil belum muncul di titik mana pun, kendaraan baru terlihat di titik pertama Simpang Pante Raya $x = 0$ dengan model jalan mendatar di $t = 10$ detik, kemudian di titik kedua Simpang Teritit $x = 1500$ dengan jalan menanjak di $t = 32$ detik kendaraan juga sudah terlihat memasuki jalur evakuasi bencana, sedangkan di titik ketiga belum terlihat. Pada Gambar 4 adalah Kasus II, terlihat bahwa pada detik ke 500 jalur mendatar pada titik pertama terlihat mengalami penambahan, begitu juga pada titik kedua mengalami penambahan kepadatan kendaraan yang sangat signifikan, hal ini disebabkan karena jalan yang menanjak sehingga kecepatan kendaraan berkurang. Sedangkan pada titik ketiga juga sudah memasuki jalur evakuasi. Pada Gambar 5 (Kasus III) terlihat bahwa pada titik pertama kendaraan motor dan mobil sudah tidak terlihat memasuki jalur evakuasi bencana, hanya pada titik ketiga Simpang Bukit Sama terlihat kepadatan kendaraan yang sangat besar dikarenakan kendaraan yang datang dari titik pertama, titik kedua dan titik ketiga. Tetapi kepadatan segera berkurang, hal ini disebabkan karena model jalan yang menurun sehingga kecepatan kendaraan bertambah dan kepadatan kendaraan berkurang.

Tingkat efisiensi model arus lalu lintas jalur evakuasi bencana disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3 Tingkat Efisiensi model arus lalu lintas jalur evakuasi bencana

Kondisi Awal Bencana	Fungsi Kepadatan	Tingkat Efisiensi Evakuasi	
		Tanpa Jalur Roda empat	Alternatif Roda dua
Malam Hari	Konstan	0.57	0.4
Siang Hari	Konstan	0.434	0.24

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan simulasi kemacetan arus lalu lintas untuk kondisi jalan miring pada proses evakuasi bencana gunung berapi diperoleh kesimpulan bahwa arus kendaraan yang memasuki jalur evakuasi bencana pada titik pertama Simpang Pante Raya dengan kondisi jalan mendatar terus mengalami penambahan dan belum mengakibatkan kepadatan yang signifikan. Arus kendaraan mulai terlihat padat ketika kendaraan dari titik kedua Simpang Pante Raya memasuki jalur evakuasi bencana, hal ini disebabkan oleh jalur kendaraan yang menanjak sehingga kecepatan kendaraan berkurang sedangkan percepatan akan bertambah dan hal ini mengakibatkan kepadatan kendaraan yang signifikan. Arus kendaraan terlihat berkurang

pada detik ke 1500 di titik pertama jalur mendatar, sedangkan pada detik ke 1500 di titik ketiga mengalami penambahan kepadatan kendaraan yang sangat besar dikarenakan kendaraan yang datang dari titik pertama, kedua dan ketiga terus mengalami penambahan. Tetapi kepadatan kendaraan akan dengan cepat berkurang karena jalur evakuasi yang menurun sehingga kecepatan kendaraan akan bertambah dan percepatan kendaraan akan berkurang. Berdasarkan simulasi yang dihasilkan terlihat bahwa jalan yang mendatar, menanjak dan menurun sangat mempengaruhi proses evakuasi dimana ketika jalan yang menanjak kepadatan kendaraan sangat besar dengan kecepatan kendaraan yang berkurang sehingga membuat lambatnya proses evakuasi sedangkan saat jalan menurun proses evakuasi kembali normal dan dominan lancar karena kecepatan kendaraan yang bertambah. Keberhasilan proses evakuasi terlihat dari hasil tingkat inefisiensi dan efisiensi yang sangat besar untuk motor dan mobil baik pada saat evakuasi di malam hari maupun di siang hari.

REFERENSI

1. Tamin, O.Z., 2008. *Perencanaan dan Pemodelan Transportasi*. Bandung: Penerbit ITB.
2. Junaidi. 2015. *Simulasi Arus Lalu Lintas Satu Arah dengan Data Karakteristik sebagai Masukan pada Evakuasi Bencana Wilayah Banda Aceh*, Tesis, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh.
3. Dash, N. and Gladwin, H. 2007. *Evacuation Decision Making and Behavioral Respons: Individual and Household*. *Natural Hazards Review*, Vol. 8, No.3, pp. 69-77.
4. Lindell, M.K. and Prater, C.S. 2007. Critical Behavioral Assumptions in Evacuation Time Estimate analysis for Private Vehicles: Examples from Hurricane Research and Planning. *Journal of Urban Planning and Development*, Vol.133, No. 1, pp. 18-29.
5. Kimms, A. and Maasen, K.C. 2011. Optimization and Simulation of Traffic Flows in the Case of Evacuating Urban Areas. *Springer*. Vol. 33, pp: 571-593.
6. Kaiser, E. and Parr, S. 2012. Traffic Simulation Modeling for an Urban Chemical Disaster: Emergency Evacuation Development and Case Study. *Latin American And Caribbean Journal Of Engineering Education*, Vol. 6(1), pp: 1-8.
7. Mahfuzailda. 2014. *Pemodelan dan Simulasi Arus Lalu Lintas Jalur Evakuasi Wilayah Banda Aceh dengan Aliran Masuk dan Keluar*, Tesis, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh.
8. Daniel L.Gerlough and Matthew J. Huber. 1975. *Traffic Flow Theory*, Transportation Research Board, Special Report 163, TRB, Washington, D.C.,1975, chapter 9, pages 175-196.
9. Hall L. Fred. 2000. *Traffic Stream Characteristics*. Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, NJ.
10. Direktorat Jenderal Bina Marga. 1997. *Manual Kapasitas Jalan Indonesia*, Sweroad, PT Bina Karya, Jakarta.
11. May A.D. 1990. *Traffic Flow Fundamentals*, Prentice-Hall, Eaglewood Cliffs, NJ.
12. Haberman, R. 1998. *Mathematica Models*. Prentice Hall, USA.