

## SIMULASI PERILAKU JAMA'AH SAAT MENGELILINGI KA'BAH MENGGUNAKAN ALGORITMA *FLOCKING* DAN *A\**

<sup>1</sup>Syafei Karim, <sup>2</sup>Darlis Heru Murti, <sup>3</sup>Imam Kuswardayan

<sup>123</sup>Jurusan Teknik Informatika Fakultas Teknologi Informasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Jl. Raya ITS, Surabaya, Jawa Timur 60111

<sup>1</sup>syfei.karim@gmail.com, <sup>2</sup>darlis@if.its.ac.id, <sup>3</sup>imam@its.ac.id

**Abstrak.** Simulasi kerumunan dan gerak manusia merupakan sebuah animasi yang lagi trend dalam produksi film dan game. Mensimulasikan kerumunan manusia seperti di dunia nyata akan menjadi sebuah pemodelan yang interaktif dan realistik. Banyak hal yang dapat disimulasikan untuk simulasi kerumunan, seperti kerumunan orang menaiki atau menuruni anak tangga, kerumunan orang menonton pertandingan di stadion olahraga, evakuasi bencana, bahkan kegiatan ritual haji/umrah. Pada ritual haji/umrah, ada beberapa kegiatan yang selalu dipenuhi dengan kerumunan orang atau jama'ah. Para jama'ah mengelilingi Ka'bah sebanyak tujuh kali yang dikenal dengan thawaf. Ritual tersebut melibatkan jama'ah yang besar selama kegiatan haji/umrah. Karena jumlah jama'ah nya yang besar penting sekali untuk memahami, memodelkan perilaku dan pergerakan orang banyak untuk meningkatkan teknik manajemen kerumunan dan keamanan bagi para jama'ah. Pada penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan perilaku jama'ah saat thawaf. Simulasi ini menggunakan metode flocking yang diterapkan pada jama'ah untuk menjaga agar jama'ah tidak saling bertabrakan antar lainnya, menghindari hambatan statis, dan mengikuti arah leader dan metode *A\** yang diterapkan pada jama'ah digunakan untuk pencarian target berupa waypoint yang ada disekitar Ka'bah sehingga jama'ah dapat bergerak sesuai dengan alur thawaf. Hasil penelitian menunjukkan banyaknya jumlah leader dapat mempengaruhi meningkatnya frekuensi tabrakan jama'ah saat melakukan thawaf. Pemilihan waktu jeda munculnya jama'ah dan kecepatan tiap leader mempengaruhi waktu jama'ah menyelesaikan thawaf. Simulasi ini diaplikasikan menggunakan Game Engine Unity 3D dan berbasis tiga dimensi.

**Kata Kunci:** Simulasi Kerumunan, Thawaf, Perilaku, Flocking, penentuan jalur, *A\**

Salah satu aspek dari animasi adalah memodelkan sesuatu yang sama seperti dunia nyata ke dalam dunia virtual. Simulasi kerumunan dan gerak manusia merupakan sebuah animasi yang lagi trend dalam produksi film dan game. Mensimulasikan kerumunan manusia seperti di dunia nyata menjadi sesuatu pemodelan yang interaktif dan realistik. Simulasi kerumunan yang real-time ini termasuk sesuatu yang sulit karena perilaku yang dipamerkan pada kelompok besar ini sangat kompleksitas dan tidak biasa. Banyak hal yang dapat disimulasikan untuk simulasi kerumunan, seperti kerumunan orang menaiki atau menuruni anak tangga, kerumunan orang menonton pertandingan di stadion olahraga, evakuasi bencana, bahkan kegiatan ritual haji/umrah.

Menunaikan ibadah haji/umrah adalah kegiatan ritual yang dilakukan kaum muslimin sedunia yang mampu berkunjung dan melaksanakan kegiatannya di beberapa tempat di Arab Saudi. Salah satu kegiatan

ibadah haji/umrah adalah thawaf di Masjidil Haram. Masjidil Haram yang berada di mekkah merupakan lokasi yang paling ramai dikunjungi umat islam sedunia. Kerumunan jama'ah haji dan umrah di mekkah merupakan tantangan manajemen kerumunan yang paling signifikan. Jumlah yang beribadah haji dan umrah selalu meningkat setiap tahunnya. Pada ritual haji/umrah, ada beberapa kegiatan yang selalu dipenuhi dengan kerumunan orang atau jama'ah. Para jama'ah mengelilingi Ka'bah sebanyak tujuh kali yang dikenal dengan thawaf.

Pada kasus simulasi kerumunan, menghindari tabrakan antar objek dan rintangan (*obstacle*) sangat penting untuk dikembangkan apalagi dalam jumlah skala yang besar seperti thawaf. Terdapat banyak cara untuk mensimulasikan atau memodelkan pergerakan jama'ah saat melakukan thawaf. Kim dalam penelitiannya (Sujeong Kim 2015) menggunakan *velocity based model* dan FSM untuk memperlakukan

jama'ah dalam kerumunan sebagai objek berinteraksi dengan hambatan melalui kekuatan fisik, yang memungkinkan agen untuk mengantisipasi tabrakan dan mengambil tindakan yang tepat untuk menghindari mereka. Berbeda dengan (Nuhu Aliyu Shuaibu 2013), dalam penelitiannya yang menggunakan jalur spiral untuk rute selama melakukan thawaf. Peneliti menganggap metode yang digunakan relatif efisien dari gerak melingkar selama thawaf. Namun, peneliti belum memperhitungkan faktor kunci selama thawaf seperti antrian dan menunggu di berbagai lokasi.

Sharmady menyajikan model selular automata untuk simulasi jama'ah melakukan thawaf dan juga menggunakan model *discrete-event* untuk mensimulasikan tindakan dan perilaku dari jama'ah (Siamak Sharmady 2011). Begitu juga dengan Hasan yang memodelkan kegiatan thawaf berdasarkan sistem antrian menggunakan simulasi *discrete-event*. Model thawaf yang diusulkan menggunakan pemisahan, jalur spiral, dan waktu penjadwalan yang tepat saat jama'ah masuk melakukan thawaf (Hassan 2013).

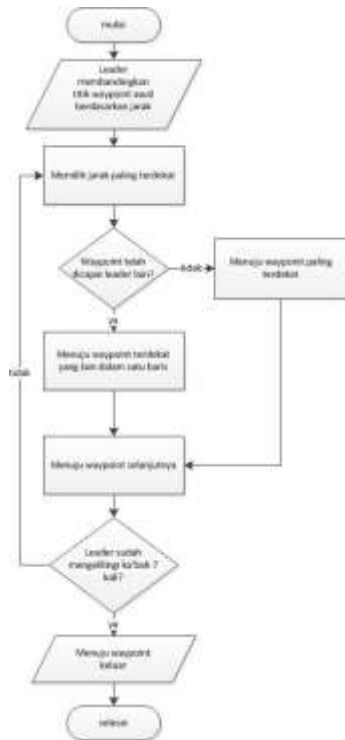
Menghindari tabrakan antar objek dan rintangan (*obstacle*) sangat penting untuk dikembangkan apalagi dalam jumlah skala yang besar seperti thawaf. Menghindari tabrakan dan rintangan adalah masalah dasar dalam gerakan kerumunan untuk pejalan kaki. Daniel Thalmann menjelaskan di dalam bukunya bahwa ada banyak metode untuk simulasi kerumunan khususnya menghindari tabrakan salah satunya adalah *flocking* (Musse 2013). *Flocking* adalah teknik yang sangat populer untuk mensimulasikan perilaku kawanannya entitas atau individu.

Perilaku yang dihasilkan sangat mirip dengan kumpulan ikan atau kawanannya burung. *Flocking* memiliki tiga aturan sederhana yang mengikuti perilaku berkelompok burung yaitu menuju ke pusat kelompok (*cohesion*), penyesuaian kecepatan terhadap agent di dekatnya (*alignment*), dan menghindari tabrakan dengan agent lainnya (*separation*). Reynold juga mengembangkan metode sebelumnya dengan memasukkan berbagai perilaku kendali seperti menghindari hambatan (*obstacle avoidance*) dan mengikuti pemimpin (*leader following*) (Reynolds 1999).

Dalam penelitiannya (Meilany Dewi 2011) menggunakan algoritma *flocking* untuk mensimulasikan gerakan orang yang berbondong-bondong keluar ke pintu utama saat berada di dalam mall. Algoritma tersebut digunakan untuk memastikan tidak ada tabrakan yang terjadi antara orang atau dengan rintangan yang ada. Sama halnya dengan (Supeno Mardi Susiki Nugroho 2010), peneliti menggunakan algoritma *flocking* untuk mensimulasikan pergerakan kerumunan manusia dalam kondisi panik agar dapat segera keluar menuju pintu utama dari gedung bila terjadi kebakaran. Peneliti memodelkan bagaimana menjaga jarak antar orang, jika berpapasan dengan orang lain disekitarnya atau pada saat menemui halangan dinding maka pergerakan individu dalam kerumunan harus bisa segera memberikan aksi dalam menghadapi kondisi tersebut untuk menuju aksi berikutnya. Dalam hal lain, (Syahri Mu'min 2015) memodelkan pergerakan pasukan untuk menyerang dengan menggunakan aturan-aturan yang ada pada algoritma *flocking*. Algoritma tersebut memiliki peran mengelola pergerakan agen dalam membentuk formasi dengan proses yang alami. Dalam pencarian target atau tujuan juga sangat penting dalam simulasi kerumunan. Menurut (Zhang He 2016), algoritma  $A^*$  adalah metode yang paling efektif untuk memecahkan jalur di grid statis. Begitu pun menurut Ying Ping Chen, untuk mengatur perpindahan kerumunan dalam grafis komputer dapat menggunakan algoritma  $A^*$  (I Made Pasek Mudhana 2014). Pada penelitian yang dilakukannya, peneliti menggunakan metode  $A^*$  untuk mensimulasikan pergerakan orang pada saat evakuasi bencana tsunami menuju suatu titik evakuasi yang aman. Simulasi tersebut dapat menentukan jarak terdekat atau terpendek dari posisi individu menuju target utama.

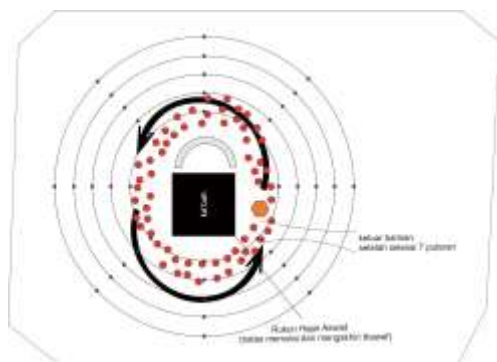
Berdasarkan dari penelitian-penelitian terkait *flocking* tersebut, bahwa algoritma *flocking* dapat memberikan pergerakan kepada agent dalam kerumunan dan memodelkan perilaku agent secara berkelompok agar menjaga jarak antar lainnya sehingga tidak terjadi tabrakan antar lainnya. Sedangkan algoritma  $A^*$  dapat menemukan target dengan mencari jarak terpendek sehingga algoritma ini dapat





Gambar 3. Alur Sistem Leader Memilih Waypoint

Leader akan menuju waypoint yang dipilihnya dan bergerak membawa anggotanya yaitu jama'ah. Di sekitar area ka'bah terdapat hambatan statis yang harus dihindari oleh leader dan jama'ahnya yaitu Hijr Ismail dan Maqam Ibrahim. Leader akan berputar sebanyak tujuh kali dengan berlawanan arah jarum jam yang diawali dan diakhiri dari rukun hajar aswad. Setelah memutari ka'bah sebanyak tujuh kali maka leader dan jama'ahnya akan menuju jalan keluar seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Jama'ah Keluar dari Area Ka'bah

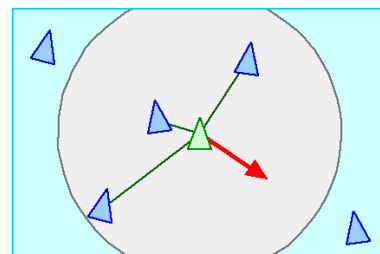
### Algoritma Flocking

Flocking pertama kali diusulkan oleh Craig Reynolds dalam penelitiannya "Flocks, Herd, and Schools: A Distributed Behavior

Model" (Reynolds, Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model 1987). Flocking adalah teknik yang sangat populer untuk mensimulasikan perilaku kawanan entitas atau individu. Pada umumnya algoritma ini disebut dengan "boids". Boids dari awal kata "birds" adalah sebuah algoritma yang merepresentasikan gerak dari sebuah kawanan. Boids memiliki tiga aturan sederhana yang mengikuti perilaku berkelompok burung yaitu separation, alignment, dan cohesion. Metode ini kemudian dikembangkan dengan memasukkan berbagai perilaku kendali seperti obstacle avoidance dan leader following.

#### 1. Separation

Perilaku separation memberikan boids kemampuan untuk menjaga jarak dari boids lainnya. Hal ini dapat digunakan untuk mencegah boids dari berkerumunan bersama-sama. Perilaku ini mengarahkan boids menghindari terjadinya tabrakan dan menjaga agar boids tetap terpisah pada jarak tertentu seperti yang terlihat pada gambar 5.



Gambar 5. Perilaku Separation

Separation diformulasikan pada persamaan (1) (Xiaohui Cui 2006):

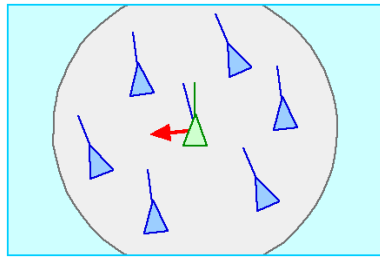
$$d(P_x, P_b) \leq d_2 \Rightarrow \vec{V}_{sr} = \sum_x^n \frac{\vec{V}_x + \vec{V}_b}{d(P_x, P_b)} \quad (1)$$

Dimana  $\vec{V}_{sr}$  adalah kecepatan yang ditentukan oleh aturan separation seperti pada gambar 5,  $d(P_x, P_b)$  adalah jarak antara boids  $x$  dengan tetangga  $b$ ,  $\vec{V}_x$  dan  $\vec{V}_b$  adalah kecepatan boids  $x$  dan boids  $b$ ,  $d_2$  adalah nilai jarak yang telah ditetapkan.

#### 2. Alignment

Perilaku ini memberikan boids untuk melakukan penyesuaian kecepatan dengan boids lainnya. Hal ini memberikan boids berusaha untuk menyesuaikan kecepatannya

dengan kecepatan tetangganya seperti yang digambarkan pada gambar 6.



Gambar 6. Perilaku Alignment

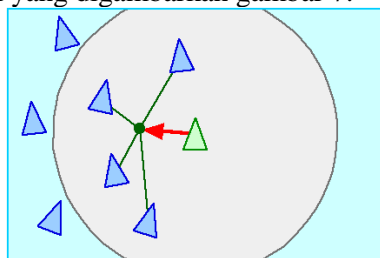
Alignment diformulasikan pada persamaan (2) (Xiaohui Cui 2006):

$$d(P_x, P_b) \leq d_1 \cap d(P_x, P_b) \geq d_2 \Rightarrow \vec{V}_{ar} = \frac{1}{n} \sum_x^n \vec{V}_x \quad (2)$$

Dimana  $\vec{V}_{ar}$  adalah kecepatan yang ditentukan oleh aturan alignment seperti pada gambar 6,  $d(P_x, P_b)$  adalah jarak antara boids  $x$  dengan tetangga  $b$ ,  $n$  adalah total jumlah tetangga,  $\vec{V}_x$  adalah kecepatan boids  $x$ ,  $d_1$  dan  $d_2$  adalah nilai jarak yang telah ditetapkan.

### 3. Cohesion

Perilaku ini memberikan kemampuan untuk mengarahkan boids ke arah titik pusat kelompoknya. Cohesion juga mengatur agar boids bergerak saling mendekat ketika berada pada posisi yang terlalu jauh satu sama lain seperti yang digambarkan gambar 7.



Gambar 7. Perilaku Cohesion

Cohesion diformulasikan pada persamaan (3) (Xiaohui Cui 2006):

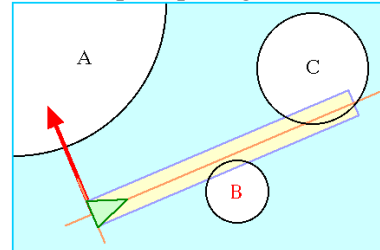
$$d(P_x, P_b) \leq d_1 \cap d(P_x, P_b) \geq d_2 \Rightarrow \vec{V}_{cr} = \frac{\sum_x^n (P_x - P_b)}{n} \quad (3)$$

Dimana  $\vec{V}_{cr}$  adalah kecepatan yang ditentukan oleh aturan cohesion seperti pada gambar 7,  $d(P_x, P_b)$  adalah jarak antara boids  $x$  dengan tetangga  $b$ ,  $d_1$  dan  $d_2$  adalah nilai jarak yang telah ditetapkan,  $(P_x - P_b)$

sedangkan adalah perhitungan arah vector point.

### 4. Obstacle Avoidance

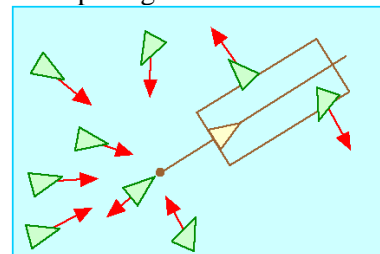
Perilaku ini memberikan kemampuan boids bergerak dengan menghindari halangan yang ada disekitarnya. Tujuan dari perilaku ini yaitu untuk menjaga sebuah silinder sebagai hambatan yang berada di depan karakter bola seperti pada gambar 8.



Gambar 8. Perilaku Obstacle Avoidance

### 5. Leader Following

Perilaku ini memberikan satu atau lebih boids untuk mengikuti boids yang terpilih sebagai leader dalam pergerakan berkelompok. Leader berperan penting untuk memberikan arah pada anggotanya karena kemanapun leader bergerak maka semua anggotanya akan mengikutinya seperti yang ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. Perilaku Leader Following

### Algoritma A\*

Algoritma A\* merupakan algoritma yang sering digunakan pada permainan peta yang menggunakan fungsi heuristic untuk mengestimasi jarak node awal ke node target sehingga dapat mengurangi ruang pencarian dan meningkatkan efisiensi pencarian (LaValle 2006).

Algoritma A\* menggabungkan jarak estimasi dan jarak sesungguhnya dalam membantu penyelesaian persoalan. Heuristik adalah nilai yang memberi harga pada tiap simpul yang memandu A\* mendapatkan solusi yang diinginkan. Dengan heuristik, maka A\* pasti akan mendapatkan solusi (jika memang ada solusinya). Dengan kata lain,

heuristik adalah fungsi optimasi yang menjadikan algoritma A\* lebih baik dari pada algoritma lainnya. algoritma ini memiliki tiga atribut lainnya yaitu *fitness*, *goal* dan *heuristic* umumnya dikenal sebagai *f*, *g*, dan *h*. Nilai yang berbeda dapat diberikan ke jalur antara node. Fungsi valuasi node *n* direpresentasikan pada persamaan (4):

$$f(n) = h(n) + g(n) \quad (4)$$

Atribut *f*, *h*, dan *g* didefinisikan sebagai berikut:

*f* = jumlah dari *g* dan *h* dan estimasi terbaik dari biaya jalan melalui simpul saat ini.

*h* = nilai heuristik dari jalur terpendek dari setiap node *n* ke titik sasaran.

*g* = jalur terpendek dari titik awal ke setiap node *n*.

## II. Hasil dan Pembahasan

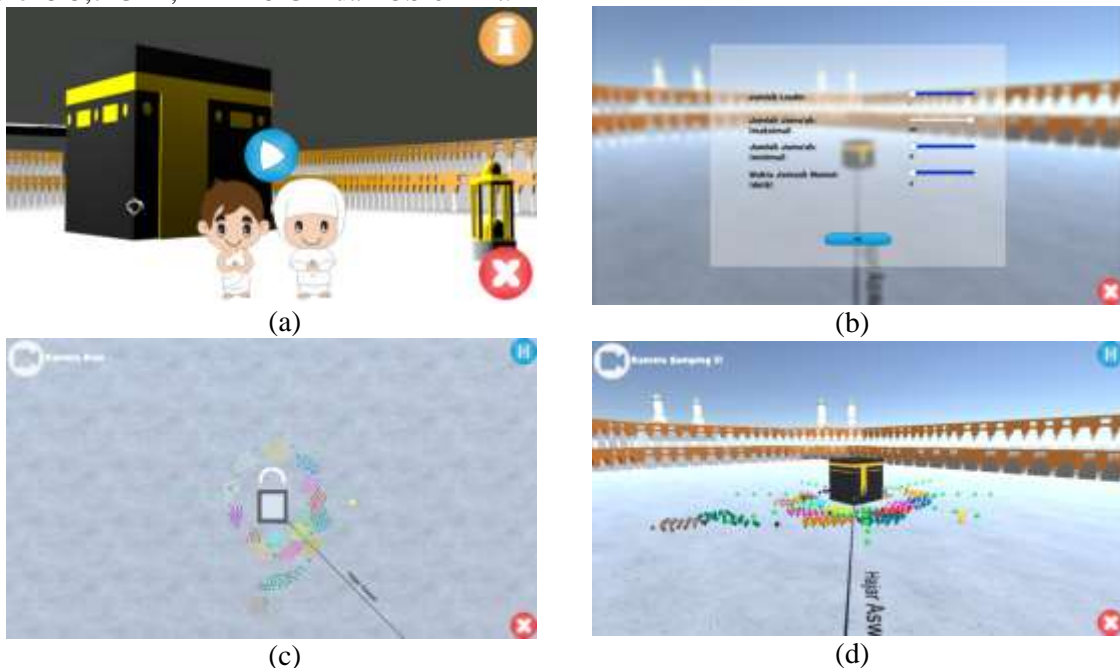
Pemodelan dan simulasi pergerakan jama'ah ini akan diimplementasikan dengan menggunakan bahasa C# di *game engine* Unity3D. Simulasi diujicobakan pada komputer dengan spesifikasi prosesor Intel Core i3 3,7 GHz, RAM 8 GB dan OS 64 Bit.

Pada uji coba yang akan dilakukan, ada beberapa skenario yang dilakukan. Pada tabel 1 menunjukkan parameter yang digunakan pada pengujian.

Tabel 1. Parameter Pengujian

Waktu jeda muncul jama'ah (detik)	5, 15, dan 30
Leader	20
Kecepatan	0.90 – 1.00

Dalam pengujian dilakukan lima kali simulasi dengan tiga kali percobaan disetiap simulasinya. Percobaan dilakukan dari jama'ah melakukan satu putaran hingga tujuh putaran yang menandakan akhirnya thawaf. Setiap simulasi dibedakan dengan jumlah *leadernya* sedangkan untuk uji cobanya dibedakan dengan waktu jeda munculnya jama'ah. Setiap kelompok memiliki satu *leader* dan anggota jama'ah yang jumlahnya acak antara 1-30 anggota. Hasil eksekusi sistem menunjukkan bahwa sistem dapat berjalan dengan baik seperti yang ditunjukkan pada gambar 10.



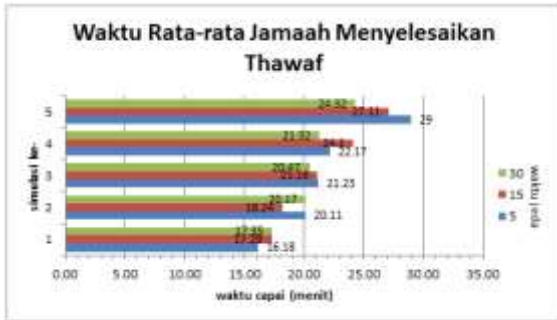
Gambar 10. Tampilan Simulasi. (a) Tampilan Menu. (b) Tampilan Pengaturan Jama'ah dan Waktu Jeda. (c) Tampilan Kamera Atas. (d) Tampilan Kamera Samping

Tabel 2 Hasil Pengujian Algoritma *Flocking* dan *A\**

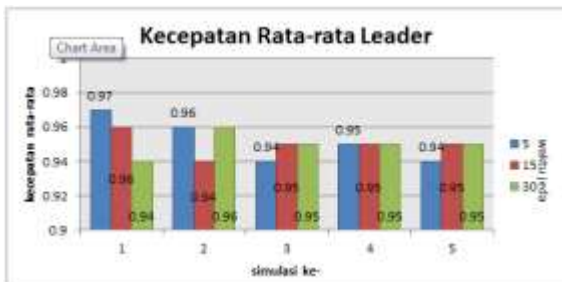
Simulasi ke-	Uji coba ke-	Jumlah <i>leader</i>	Waktu jeda (detik)	Jumlah jama'ah	Kecepatan rata-rata <i>leader</i>	Waktu rata-rata jama'ah menyelesaikan thawaf (menit)
1	1	4	5	93	0.97	16.18
	2		15	62	0.96	17.29
	3		30	78	0.94	17.35
2	1	8	5	158	0.96	20.11
	2		15	102	0.94	18.24
	3		30	130	0.96	20.17
3	1	12	5	179	0.94	21.23
	2		15	187	0.95	21.16
	3		30	153	0.95	20.47
4	1	16	5	200	0.95	22.17
	2		15	301	0.95	24.10
	3		30	223	0.95	21.32
5	1	20	5	325	0.94	29.00
	2		15	315	0.95	27.11
	3		30	302	0.95	24.32

Dari data hasil pengujian pada tabel 2, jumlah populasi mempengaruhi waktu *leader* menyelesaikan thawaf. Semakin banyak jumlah populasi semakin lama *leader* menyelesaikan kegiatan thawaf. Seperti yang terlihat pada grafik pada gambar 11, waktu jeda munculnya jama'ah mempengaruhi waktu jama'ah menyelesaikan thawaf. Semakin lama waktu jeda semakin cepat jama'ah bisa menyelesaikan thawaf. Hal ini dikarenakan jama'ah dapat bergerak dengan bebas sebelum jama'ah lainnya muncul. Tetapi waktu menyelesaikan thawaf juga bisa menjadi lebih lama dikarenakan seringnya *leader* menumpuk dengan jama'ah dari *leader* lain sehingga membuat *leader* berhenti sejenak dengan jarak radius yang dimiliki oleh *leader*. Dari hasil grafik tersebut menunjukkan tiap simulasi yang dilakukan dengan waktu jeda sebesar 30 detik menghasilkan waktu lebih cepat ketimbang waktu jeda lainnya terutama pada

simulasi yang ke-5. *Leader* dapat menyelesaikan thawaf selama 24.32 menit lebih cepat 4.28 menit dari waktu jeda 5 detik. Berbeda dengan simulasi yang ke-1 dengan waktu jeda 5 detik, waktu *leader* menyelesaikan thawaf lebih lama beberapa detik daripada yang lainnya. Waktu selesainya thawaf juga bergantung dari kecepatan tiap *leadernya*. Kecepatan *leader* juga dapat mempengaruhi waktu jama'ah menyelesaikan thawaf. Seperti yang diperlihatkan grafik pada gambar 12. Setiap ujicoba yang dilakukan, *leader* memiliki nilai kecepatan yang berbeda-beda karena tiap *leader* diberi kecepatan dengan nilai acak.



Gambar 11 Grafik Waktu Rata-rata Jama'ah Menyelesaikan Thawaf



Gambar 12 Grafik Kecepatan Rata-rata Leader

Hasil yang ditunjukkan pada tabel 3 memperlihatkan jumlah tabrakan memiliki nilai yang bervariasi tiap simulasinya. Semakin banyak jumlah *leader* maka semakin banyak jumlah tabrakan yang akan terjadi. Banyak hal yang dapat mengakibatkan jama'ah dapat saling bertabrakan. Berdasarkan pengamatan, tabrakan lebih banyak terjadi pada saat *leader* menerobos rombongan dari *leader* lain sehingga jama'ahnya menumpuk dengan jama'ah dari *leader* lain oleh karena itu tabrakan dapat terjadi. Tabrakan juga bisa terjadi antara jama'ah dengan rombongannya sendiri. Hal ini diakibatkan jama'ah yang tertinggal dari *leader* berusaha mendekati *leader* sehingga terjadi tabrakan sesama anggotanya. Kecepatan tiap *leader* juga mempengaruhi dari pergerakan jama'ahnya. Semakin tinggi kecepatannya maka semakin sering jama'ah mengejar atau mendekati *leadernya*. Tabrakan juga dapat terjadi karena adanya jama'ah yang gagal mengikuti *leadernya* sehingga jama'ah tersebut memutar arah dan bertabrakan dengan jama'ah lainnya.

Jama'ah yang gagal menyelesaikan thawaf adalah jama'ah yang tidak bisa menyelesaikan thawaf sebanyak tujuh kali putaran. Hal ini dikarenakan, jama'ah yang tidak bisa mengikuti *leadernya* sehingga

jama'ah tersebut terhenti di sekitar ka'bah menunggu *leadernya* mendekat. Jama'ah tidak dapat mengikuti *leadernya* dikarenakan jama'ah menumpuk dengan jama'ah lain sehingga jama'ah tersebut tertinggal jauh oleh *leadernya*. Jumlah *leader* mempengaruhi jumlah jama'ah yang gagal thawaf. Jumlah jama'ah yang gagal lebih sedikit daripada jumlah *leader* sebanyak 12 dan 8 *leader*. Hal ini terjadi karena aturan yang digunakan dalam menentukan *waypoint*. *Leader* akan mencari *waypoint* yang lain jika telah dicapai oleh *leader* lain. Dikarenakan jumlah *leader* yang banyak maka kemungkinan *waypoint* yang akan dituju sudah dicapai lebih dulu oleh *leader* lain sehingga *leader* tersebut akan mencari *waypoint* lainnya. Hal tersebut membuat jama'ah akan sedikit menjauhi ka'bah. Berbeda jika *leader* nya sedikit, kemungkinan pergerakan jama'ah untuk menuju *waypoint* yang dekat dengan ka'bah semakin sering sehingga kemungkinan jama'ah yang gagal semakin banyak.

Tabel 3 Pengukuran Jumlah Tabrakan dan Jumlah Jama'ah yang Gagal Thawaf

Jumlah <i>leader</i>	Jumlah jama'ah	Jumlah tabrakan	Jumlah jama'ah yang gagal thawaf	Prosentase jama'ah berhasil menyelesaikan thawaf
4	93	0	0	100.00
	62	0	0	100.00
	78	7	0	100.00
8	158	50	15	90.51
	102	12	6	94.12
	130	21	9	93.08
12	179	22	14	92.18
	187	25	17	90.91
	153	16	22	85.62
16	200	5	2	99.00
	301	190	11	96.35
	223	22	2	99.10
20	325	490	2	99.38
	315	291	2	99.37
	302	382	17	94.37

### III. Simpulan

Dari hasil penelitian dan analisis yang dilakukan, metode yang diusulkan dapat diimplementasikan dengan baik pada simulasi kerumunan pergerakan jama'ah saat melakukan thawaf. Dari hasil implementasi tersebut dapat membuat jama'ah memiliki perilaku yang fleksibel sesuai dengan keadaan lingkungan. Jumlah jama'ah dapat mempengaruhi waktu yang dibutuhkan *leader* dan jama'ahnya untuk menyelesaikan



thawaf. Selain itu, kecepatan pada *leader* dan waktu jeda munculnya jama'ah juga dapat mempengaruhi waktu yang diperlukan *leader* dan anggotanya untuk menyelesaikan thawaf. Ada beberapa hal yang dapat mengakibatkan jama'ah dapat saling bertabrakan. Tabrakan lebih banyak terjadi pada saat *leader* menerobos rombongan dari *leader* lain sehingga jama'ahnya menumpuk dengan jama'ah dari *leader* lain. Tabrakan juga bisa terjadi antara jama'ah dengan rombongannya sendiri. Kecepatan tiap *leader* juga mempengaruhi dari pergerakan jama'ahnya. Semakin tinggi kecepatannya maka semakin sering jama'ah mengejar atau mendekati *leadernya*. Jumlah *leader* mempengaruhi jumlah jama'ah yang gagal thawaf. Semakin banyak jumlah *leader* semakin besar prosentase keberhasilan jama'ah menyelesaikan thawaf. Pemilihan pun waypoint dapat menyebabkan jumlah jama'ah yang gagal. Jama'ah yang gagal lebih banyak terjadi pada jumlah *leader* yang sedikit. Hal ini terjadi karena aturan yang digunakan dalam menentukan waypoint. *Leader* akan mencari waypoint yang lain jika telah dicapai oleh *leader* lain. Dikarenakan jumlah *leader* yang banyak maka kemungkinan waypoint yang akan dituju sudah dicapai lebih dulu oleh *leader* lain sehingga *leader* tersebut akan mencari waypoint lainnya.

#### IV. Daftar Pustaka

- [1] Sujeong Kim, Stephen J. Guy, Karl Hillesland, Basim Zafar, Adnan Gutub, dan Dinesh Manocha. "Velocity-Based Modeling of Physical Interactions in Dense Crowds." *The Visual Computer* 31, no. 5 (2015): 541-555.
- [2] Nuhu Aliyu Shuaibu, Ibrahima Faye, Mohammed Talal Simsim, dan Aamir Saeed Malik. "Spiral Path Simulation of Pedestrian Flow during Tawaf." *International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*. IEEE, 2013. 241-245.
- [3] Siamak Sarmady, Fazilah Haron, dan Abdullah Zawawi Talib. "A Cellular Automata Model for Circular Movements of Pedestrians during Tawaf." *Simulation Modelling Practice and Theory* 19, 2011: 969–985
- [4] Hassan, Razieh Haghghati dan Adnan. "Modeling The Flow of Crowd during Tawaf at Masjid al-Haram." *Jurnal Mekanikal*, Juni 2013: 02-18.
- [5] Musse, Daniel Thalmann dan Soraia Raupp. *Crowd Simulation Second Edition*. London: Springer, 2013.
- [6] Reynolds, Craig W. "Steering Behaviors for Autonomous Characters." *Game Developers Conference*. San Jose, California, 1999. 763-782.
- [7] Meilany Dewi, Moch Hariadi, dan Mauridhi Hery Purnomo. "Simulating The Movement Of The Crowd In An Environment using Flocking." *International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology and Biomedical Engineering*. Bandung, 2011.
- [8] Supeno Mardi Susiki Nugroho, Ervan Wahyudi, Diah Puspito W, Christyowidiasmoro, Mochamad Hariadi, dan Mauridhi H Purnomo. "Perilaku Agen Cerdas Berbasis BOIDS Untuk Simulasi Kerumunan Pada Keadaan Bahaya." *JAVA Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2010.
- [9] Syahri Mu'min, Mochammad Hariadi, dan Supeno Mardi Susiki Nugroho. "Pergerakan Otonom Pasukan Berbasis Algoritma Boids Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization." *Journal of Animation and Games Studies* 01, no. 01 (2015).
- [10] Zhang He, Minyong Shi, dan Chunfang Li. "Research and Application of Path-finding Algorithm Based on Unity 3D." *International Conference on Computer and Information Science*. Okayama: IEEE, 2016.
- [11] I Made Pasek Mudhana, Mauridhi Hery Purnomo, dan Supeno Mardi S.N. "Simulasi Pergerakan Evakuasi Bencana Tsunami Menggunakan Algoritma Boids dan

- Pathfinding." Seminar Nasional ke-9: Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi. Surabaya, 2014.
- [12] Reynolds, Craig W. "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model." Proceedings of the Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'87). Ney York: ACM, 1987. 25-34.
- [13] Xiaohui Cui, Jinzhu Gao, dan Thomas E. Potok. "A Flocking Based Algorithm For Document Clustering Analysis." Journal of Systems Architecture, 2006.
- [14] LaValle, Steven M. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, 2006.