

## Optimalisasi Routing dalam Jaringan Internet of Things Menggunakan Algoritma Physarum dan Kontrol Daya Adaptif

Muh Asnoer Laagu

Jurusan Teknik Elektro/Fakultas Teknik – Universitas Jember  
Jember, Indonesia  
\*asnoer@unej.ac.id

**Abstract** – This research aims to develop the Physarum Routing Algorithm with Adaptive Power Control (PR-APC) method to solve IoT network obstacles. The PR-APC model design will identify all information in the network and then provide power to the last node before the blockage. The PR-APC routing algorithm will be compared with other routing algorithms, namely Physarum-inspired Routing Protocol (P-iRP) and Robust Selection Physarum-inspired Routing Protocol (RS-PRP). The PR-APC routing protocol can produce the shortest path 70% better than RS-PRP and P-iRP. The resulting delay is negligible, and the network lifetime is more extended. Improved PR-APC routing performance results in efficiency and balance of resources in the network to extend the life of IoT networks with limited resources in IoT local network infrastructure. Increasing the performance of PR-APC routing can provide a solution to overcome obstacles in the IoT network. Improving the performance of PR-APC routing can provide a solution to overcome the problems of barriers found in IoT networks in agro-industrial areas so that they can increase the agricultural potential and be more productive by being connected, which is supported by developments in technological advances.

**Abstrak** – Penelitian ini mengembangkan metode Physarum Routing Algorithm with Adaptive Power Control (PR-APC) untuk menyelesaikan permasalahan halangan dalam jaringan IoT. Rancangan model PR-APC akan mengidentifikasi semua informasi dalam jaringan kemudian memberikan power pada node terakhir sebelum halangan. Algoritma routing PR-APC akan dibandingkan dengan algoritma routing lainnya yaitu Physarum inspired Routing Protocol (P-iRP) dan Robust Selection Physarum-inspired Routing Protocol (RS-PRP). Protokol routing PR-APC mampu menghasilkan jalur routing terpendek (shortest path) 70% lebih baik dibandingkan dengan RS-PRP dan P-iRP. Delay yang dihasilkan lebih kecil sehingga masa hidup jaringan (network lifetime). Peningkatan kinerja routing PR-APC menghasilkan efisiensi dan keseimbangan sumber daya dalam jaringan sehingga dapat memperpanjang masa hidup jaringan IoT yang memiliki keterbatasan sumber daya dalam infrastruktur jaringan lokal IoT. Peningkatan kinerja routing PR-APC dapat memberikan solusi untuk mengatasi permasalahan halangan yang terdapat pada jaringan IoT. Peningkatan kinerja routing PR-APC dapat memberikan solusi untuk mengatasi permasalahan permasalahan halangan yang terdapat pada jaringan IoT di daerah agroindustri sehingga mampu meningkatkan potensi pertanian dan bisa lebih produktif dengan terhubung satu dan lainnya yang didukung oleh perkembangan kemajuan teknologi

**Kata Kunci** – Algoritma physarum; adaptive power control; internet of things; halangan jaringan; agroindustri.

### I. PENDAHULUAN

REVOLUSI teknologi 4.0 menjadi babak baru dalam dinamika kehidupan manusia, perkembangan teknologi telah masuk pada tren otomatisasi dan pertukaran data mencakup didalamnya sistem cyber, komputasi awan (cloud), Internet of Things (IoT) dan komputasi kognitif. Internet of Things (IoT) telah digunakan secara luas untuk dapat meningkatkan kualitas hidup manusia. Proses pengumpulan informasi terhadap suatu objek secara simultan dalam kegiatan

pemantauan dan analisis data merupakan salah satu aplikasi IoT yang paling umum. Penerapan IoT masih banyak menghadapi tantangan, diantaranya adalah heterogenitas dan keterbatasan sumber daya [1].

Kendala heterogenitas seperti beragamnya jenis perangkat menyebabkan sumber daya energi, sumber daya memori dan sumber daya komputasi dari node pada jaringan lokal IoT harus digunakan dengan sangat efisien. Kendala tersebut menyebabkan penyebaran router harus dilakukan dengan sangat efektif. Penempatan router akan mempengaruhi aktifitas komunikasi di jaringan IoT. Aktifitas komunikasi biasanya menghabiskan konsumsi energi yang cukup besar karena node harus mengirim informasi secara berkala melalui suatu gateway IoT. Pada jaringan mesh nirkabel, routing

Naskah diterima 02-05-2023, revisi 10-03-2024, terbit online 29-03-2024. Emitor merupakan Jurnal Teknik Elektro – Universitas Muhammadiyah Surakarta yang terakreditasi dengan Sinta 3 beralamat di <https://journals2.ums.ac.id/index.php/emitor/index>.

mengambil peran penting dalam hal konsumsi energi dan dukungan keberlangsungan masa hidup jaringan, terutama dalam jaringan IoT yang terdiri dari perangkat baterai. Proses dalam aktifitas routing akan menentukan jalur terbaik node pengirim ke gateway dengan node-node lain dapat bertindak sebagai router. Salah satu teknologi kunci untuk IoT yang akan mendukung implementasi jaringan lokal IoT adalah Wireless Sensor Network (WSN) [2]. Pada WSN menunjukkan routing seharusnya tidak hanya mempertimbangkan jarak node maupun jumlah hop komunikasi tujuan, tetapi juga jumlah power yang tersedia pada router dan kualitas link. Keterbatasan sumber daya ini menyebabkan node dalam jaringan lokal IoT tidak memiliki power yang cukup menembus halangan/penghalang yang ada dalam jaringan di area tertentu. Halangan (obstacle) dalam jaringan IoT bisa berupa tembok/dinding ataupun berupa ketiadaan router dalam area tertentu [2], dengan metode algoritma optimasi routing halangan/halangan [3] dalam jaringan lokal IoT bisa ditembus.

Berbagai algoritma yang diusulkan dalam metode optimasi routing mulai dari metode konvensional, metode pemrograman matematis maupun metode yang terinspirasi dari alam [4] seperti koloni semut [5], kunang-kunang dan physarum polycephalum. Taro et al [6], memodelkan fenomena organisme physarum dalam model fisis dan matematis yang disebut basic physarum, kemudian menginspirasi Zhang et al. untuk membuat protokol routing Physarum-inspired Routing Protocol (P-iRP) [7] dalam jaringan nirkabel yang memanfaatkan residu energi dan lokasi geografis dari node untuk menciptakan keseimbangan energi dalam jaringan. Rosyidi [8] mengembangkan protokol protokol P-iRP dengan menambahkan parameter tree level pada gateway sehingga aktifitas routing dapat dihitung jumlah minimum hop yang diperlukan untuk mengirim paket data ke gateway tujuan akhir, protokol ini disebut Robust Selection Physarum-inspired Routing Protocol (RS-PRP). Pada penelitian ini akan mengoptimalkan algoritma P-iRP dan RS-PRP dalam mengatasi permasalahan halangan. Metode yang diusulkan dalam penelitian ini adalah PR-APC (Physarum Routing Algorithm with Adaptive Power Control) dengan memaksimalkan power pada node terakhir sebelum halangan [9]. Peningkatan kinerja routing dari penelitian sebelumnya menjadi dasar dalam pengembangan metode optimasi routing [10–12]. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan efisiensi routing dan power yang diperlukan, khususnya ketika dalam jaringan yang terdapat halangan [13–15].

Fokus permasalahan dalam penelitian ini adalah mengelola sumber daya dalam mengimplementasikan metode routing agar dapat menembus halangan dan mencari jarak node terdekat dalam jaringan lokal IoT.

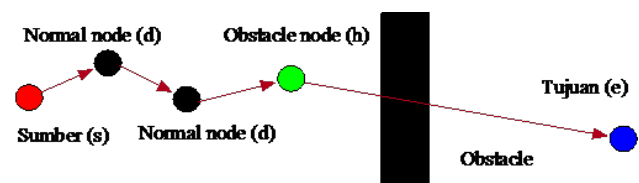
Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan metode routing baru dalam peningkatan efisiensi sumber daya pada aktivitas routing, sehingga dapat dilakukan analisis yang lebih mendalam. Bagian pertama membahas mengenai latar belakang dari penelitian, bagian II mengenai metode penelitian keterbatasan jaringan IoT dan penelitian terkait dalam pengembangan optimasi routing, bagian III hasil penelitian dan diskusi pengembangan algoritma physarum dalam menghadapi halangan dalam jaringan, dan diskusi mengenai hasil percobaan penelitian, dan bagian IV merupakan bagian terakhir yang akan menyimpulkan mengenai keseluruhan hasil penelitian dan pengembangan penelitian di masa mendatang.

## II. METODE PENELITIAN

Pada paper ini, kami mengusulkan Physarum Routing based Adaptive Power Control (PR-APC) dalam perbaikan algoritma P-iRP dan LEAR ketika adanya permasalahan halangan dalam jaringan. LEAR dan P-iRP memiliki perbedaan utama dalam hal strategi penentuan arah routing. P-iRP menggunakan parameter sudut deviasi sebagai tujuan, sedangkan LEAR mengeksplorasi tree-based routing yang memanfaatkan perbedaan nilai Tree Level (TL) node. PR-APC akan memetakan informasi setiap node dalam jaringan,

### i. Model System PR-APC

PR-APC menginisialisasi semua node yang ada, termasuk letak obstacle yang ada dalam jaringan. Informasi yang dibutuhkan adalah posisi node sumber ( $s$ ) kemudian lokasi node selanjutnya atau disebut normal node ( $d$ ), node yang berada sebelum obstacle disebut juga obstacle node ( $h$ ), letak latitude dan longitude obstacle dan posisi node tujuan akhir ( $e$ ). Berikut gambar model sistem dari PR-APC:



Gambar 1: Model Sistem

Algoritma routing yang diusulkan menginisialisasi semua informasi dan kebutuhan routing. Semua node yang tidak berada di dekat obstacle maka akan diasosiasikan sebagai normal node ( $d$ ), sedangkan yang berada di dekat dengan obstacle akan disebut sebagai obstacle node ( $h$ ). Penempatan node pada jaringan dibuat secara static dan random, mengikuti longitude dan latitude yang telah diberikan, sehingga memudahkan

proses inialisasi informasi masing-masing node. Setelah proses inialisasi, setiap node akan mengirimkan broadcast informasi mengenai identitas node tersebut, sehingga memudahkan routing untuk menentukan kandidat hop selanjutnya [13]. Data yang diterima akan disimpan sebagai informasi dalam penentuan kandidat hop selanjutnya. Penentuan kandidat hop selanjutnya dapat menghitung fluks nilai tekanan ( $p$ ) dengan menggunakan persamaan:

Penentuan kandidat hop selanjutnya dapat menghitung fluks nilai tekanan  $p$  dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\sum_i \frac{D_{ij}}{L_{ij}} (P_i - P_j) = \begin{cases} < 1 & \text{untuk } j = d \\ \geq 1 & \text{untuk } j = h \\ 0 & \text{untuk lainnya} \end{cases} \quad (1)$$

Nilai  $Q_{ij}$  dapat diupdate menggunakan Persamaan (1). Asumsinya adalah untuk nilai tekanan  $p \geq 1$  maka tujuan hop selanjutnya adalah obstacle node ( $h$ ), jika  $0 < p < 1$  maka tujuan hop selanjutnya adalah normal node ( $d$ ). Untuk node akhir tujuan ( $e$ ) nilai tekanan  $p$  harus lebih melalui obstacle node terlebih dahulu yang nilai tekanannya besar atau sama dengan 1. Sehingga keputusan routing hop selanjutnya bisa ditentukan melalui persamaan berikut: Untuk node sumber menuju normal node:

$$\delta D_{ij} = \frac{D_{ij} \times (P_i - P_j)}{L_{ij} \times (P_s - P_d)} - D_{ij} \quad (2)$$

Untuk node sumber menuju obstacle node:

$$\delta D_{ij} = \frac{D_{ij} \times (P_i - P_j)}{L_{ij} \times (P_s - P_h)} - D_{ij} \quad (3)$$

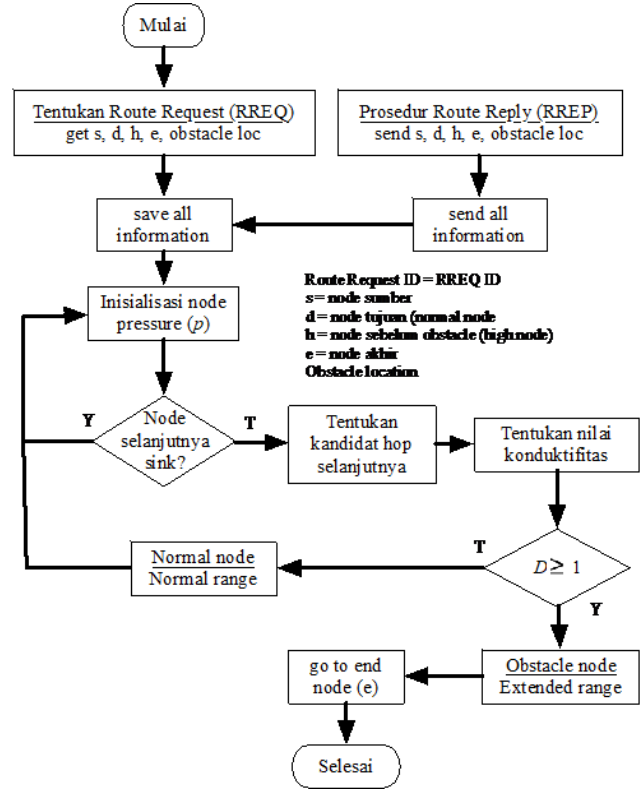
Untuk routing dari obstacle node menuju node akhir:

$$\delta D_{ij} = \frac{D_{ij} \times (P_i - P_j)}{L_{ij} \times (P_h - P_e)} - D_{ij} \quad (4)$$

Berikut flowchart PR-APC

Lokasi *obstacle node* dan koordinat dari *obstacle* itu sendiri merupakan kunci utama dalam pemilihan routing PR-APC. Untuk menuju node akhir ( $e$ ), arah routing terlebih dahulu harus melewati *obstacle node* untuk diberikan power yang lebih kuat agar mampu melewati/menembus *obstacle* yang ada. Parameter penting dalam PR-APC ada tiga hal yakni konduktivitas  $D_{ij}$ , perbedaan tekanan ( $P_i - P_j$ ) disederhanakan menjadi  $\Delta P_{ij}$ , dan panjang fluks  $L_{ij}$ . Konduktivitas  $D_{ij}$  merupakan karakter fisik yang melekat dalam jaringan, power yang diterima  $P_j$  dapat dinormalisasi di node  $j$  sebagai inisial awal nilai  $D_{ij}$ .  $P_j$  menunjukkan kualitas link, sehingga persamaan konduktivitas pada link wireless dapat dilihat sebagai berikut:

$$\hat{D}_{ij} = \frac{P_j - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (5)$$



Gambar 2: Flow Chart PR-APC

Dimana  $\hat{D}_{ij}$  merupakan normalisasi sinyal yang diterima dari link ( $i, j$ ),  $P_{\min}$  adalah nilai power minimum yang dapat berkomunikasi antara node,  $P_{\max}$  adalah power maksimum diantara masing-masing node. Untuk dapat melakukan broadcast, jarak node perlu disesuaikan panjangnya. Untuk mengetahui panjang  $L_{ij}$  kita gunakan proyeksi jarak antar node sehingga mudah untuk dikalkulasi. Panjang  $L_{ij}$  bisa menentukan terlebih dahulu jarak proyeksi antar node  $L_j^d$  seperti pada persamaan berikut:

$$L_j^d = L_{sd} - L_{sj} \quad (6)$$

$$L_{ij} = \frac{L_j^d}{L_{id}} \quad (7)$$

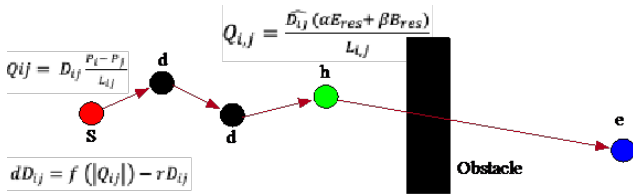
Dimana  $L_j^d$  merupakan jarak proyeksi dari node  $j$  relatif ke node selanjutnya,  $L_{id}$  adalah jarak antara node  $i$  dan node  $d$ . Selain itu untuk menentukan perbedaan tekanan  $\Delta P_{ij}$  perlu diperhatikan energi ( $E_{\text{res}}$ ) dan buffer ( $B_{\text{res}}$ ) yang tersisa dalam aliran fluks, yang dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\Delta P_{ij} = \alpha E_{\text{res}} + \beta B_{\text{res}} \quad (8)$$

dimana  $0 \leq \alpha \leq 1$ ,  $0 \leq \beta \leq 1$  dan  $\alpha + \beta = 1$ . Persamaan (5) dapat dituliskan kembali dalam persamaan berikut ini:

$$Q_{ij} = (\hat{D}_{ij}(\alpha E_{\text{res}} + \beta B_{\text{res}})) / L_{ij} \quad (9)$$

Setelah semua parameter terpenuhi, nilai konduktivitas selanjutnya bisa dihitung menggunakan persamaan (6) dan nilai fluks selanjutnya bisa menggunakan persamaan (9). Algoritma PR-APC sebagai berikut:



Gambar 3: Keputusan routing PR-APC

```

i ← send route request broadcast;
while not time out do
  for each incoming reply do
    get all data nodes (s, d, b, e);
    get obstacle location;
    save s, d, b, e;
  end
end
if i ← no incoming reply then
  i ← go to delay before initialization;
end

```

Keputusan routing PR-APC sangat dipengaruhi oleh jarak dan letak node dalam jaringan. PR-APC mengembangkan permasalahan P-iRP dan LEAR dalam permasalahan menghadapi halangan. Proses keputusan routing PR-APC dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Tentukan nilai fluks pada saat inialisasi awal dalam jaringan dengan menggunakan persamaan (1), konduktivitas  $D_{ij}$  berdasarkan pada persamaan (6), perbedaan tekanan  $\Delta P_{ij}$  sesuai dengan persamaan (23), dan jarak  $L_{ij}$  seperti pada persamaan (22).
- Saat routing mulai berjalan, arah routing akan mendapatkan obstacle node (h), sehingga nilai fluks harus diselesaikan dengan persamaan (24).

Berikut adalah pseudocode yang menggambarkan proses Route Request (RREQ) dan Route Reply (RREP) serta Keputusan routing akan terus berjalan hingga routing menemukan node akhir tujuan (e) yang telah melewati obstacle.

### III. HASIL PENELITIAN DAN DISKUSI

Pada percobaan ini, simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab pada laptop Macbook Pro 2012 intel core i5 dengan clock 2,5 GHz dan RAM 16 GB. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk membandingkan delay dan jumlah hop yang dilalui oleh PR-APC dengan metode optimasi lain, seperti P-iRP dan LEAR dalam menghadapi permasalahan halangan.

```

s, d, h, e ← Initiate routing process;
while Prosedur Route Request (RREQ) do
  s ← source node;
  d ← destination node (normal node);
  h ← before obstacle (high node);
  e ← after obstacle;
  Obstacle location;

```

```

end
p ← Initialize node pressure;
e ← Final routing decision to node;
while not at end node (e) do
  Tentukan kandidat hop selanjutnya;
  if node selanjutnya is sink then
    Terminate routing;
  else
    Continue routing;
  end
end
for i ← each incoming_packet do
  get all data nodes (s, d, b, e);
  get obstacle location;
  calculate node pressure, eq (1);
  Update nilai Q, eq (2);
  renew  $D_{ij}$ , eq (6);
  count + 1;
  until fullfill criteria;
end
return compare different push  $\Delta P_{i,j}$  eq(23);
if  $0 \leq \Delta P_{i,j} \leq 1 \rightarrow$  then
  repeat
    calculate value normal hop, eq (17);
    go to normal node (d);
  until;
end
else if  $\Delta P_{i,j} \geq 1$ 
  calculate value obstacle hop, eq (18);
  go to obstacle node (h);
  calculate routing to end node (e), eq (19);
  send package to end node (e), eq (24);
end

```

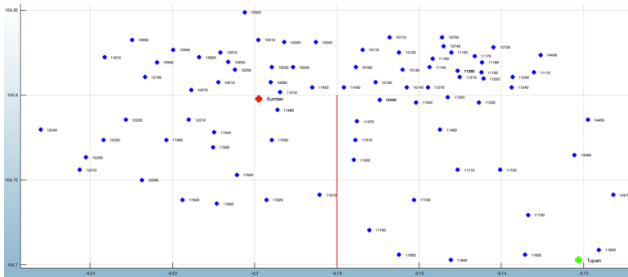
Halangan yang digunakan dalam percobaan ini adalah obstacle tegak lurus dan diposisikan di longitude dan latitude yang telah ditentukan. Pada Table. 3 menunjukkan parameter simulasi untuk evaluasi PR-APC, jaringan yang disimulasikan terdiri dari node yang didistribusikan secara acak. Jumlah node dalam simulasi ini adalah 86 node dengan 1 node sumber dan 1 node tujuan akhir.

Berikut adalah gambaran simulasi sebaran node, lokasi node, lokasi barrier/obstacle, posisi node sumber, dan node tujuan akhir:



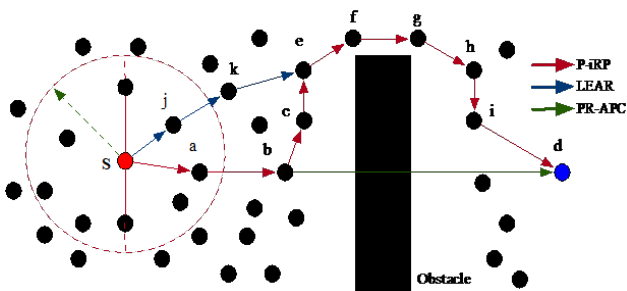
**Tabel 1:** Parameter simulasi PR-APC

Parameter	Nilai
Jumlah node	86
Distribusi node	Random, static
Posisi node sumber	Static
Posisi node akhir	Static
Lokasi obstacle	Static



**Gambar 4:** Area simulasi PR-APC

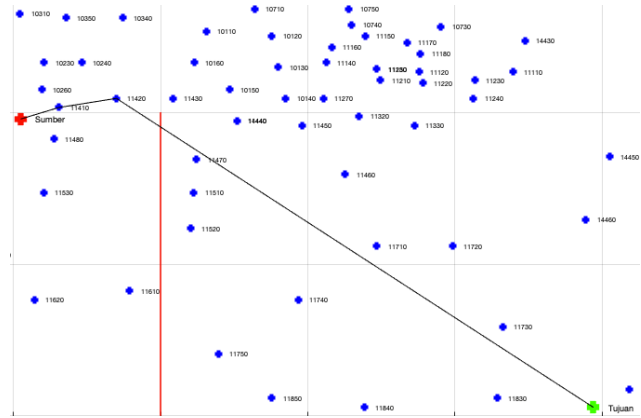
Perbandingan jumlah node antara PR-APC, P-iRP dan LEAR adalah sebagai berikut:



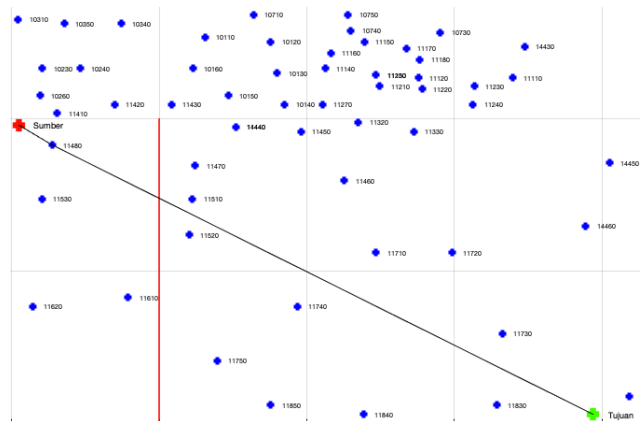
**Gambar 5:** Total node yang dilewati

Algoritma routing P-iRP cenderung memilih sudut deviasi terkecil dalam keputusan routing, sehingga jalur yang dilewati lebih panjang jika menghadapi permasalahan halangan. P-iRP melewati 9 hop  $s - a - b - c - e - f - g - h - i$ , sementara itu LEAR menginisialisasi semua hop dengan parameter Tree Level (TL) yang hanya melewati 8 hop  $s - j - k - e - f - g - h - i$ . PR-APC dalam mengatasi permasalahan halangan akan menentukan node yang berada paling dekat dengan obstacle, kemudian memberikan power ke node tersebut untuk mengirimkan paket data ke node akhir tujuan. PR-APC hanya melewati 3 hop  $s - a - b$  karena mendeteksi node  $b$  sebagai node yang berada di dekat halangan (obstacle node), sehingga paket data bisa langsung diarahkan ke node akhir tujuan. PR-APC lebih efisien dalam menghasilkan jalur routing di kondisi area dengan halangan.

Jumlah hop sangat dipengaruhi oleh total iterasi yang terjadi, saat total iterasi diatas 100 hop yang dipilih cenderung hanya dua hop saja, yakni sumber



**Gambar 6:** Total iterasi 10



**Gambar 7:** Total iterasi 100

(s), lalu obstacle node (h) dan langsung ke node tujuan akhir (e). Algoritma PR-APC akan memilih jarak terdekat menuju obstacle node (h), sehingga dapat langsung meneruskan paket data menuju node akhir (e). Iterasi juga mempengaruhi delay, semakin tinggi jumlah iterasi, delay dalam penentuan routing juga akan semakin meningkat.

**Tabel 2:** Total iterasi mempengaruhi jumlah hop dan delay

Iteration	Delay (ms)	Jumlah hop
5	6.467	3
10	7.468	3
100	8.211	2

Pada penelitian selanjutnya, posisi node pada simulasi bisa dibuat dynamic mengingat perangkat IoT memiliki mobilitas yang sangat tinggi, pada penelitian ini posisi node semuanya dibuat statis. Penelitian selanjutnya perlu dilakukan validasi algoritma PR-APC pada testbed yang sebenarnya agar dapat dilakukan investigasi beberapa aspek penting dan indikator kinerja algoritma PR-APC, hal ini sangat penting untuk memastikan desain protokol routing yang diusulkan bisa memenuhi kriteria routing jaringan IoT yang memiliki

jaringan berdaya rendah

#### IV. KESIMPULAN

Algoritma PR-APC melakukan optimasi routing untuk jaringan yang memiliki halangan. Jumlah hop yang dibutuhkan oleh PR-APC jauh lebih efisien dibandingkan optimasi routing menggunakan P-irp dan LEAR. Keputusan routing PR-APC akan memilih jarak terpendek menuju node yang berada lebih dekat ke obstacle, sehingga power, energi dan jarak dapat diperhitungkan untuk meneruskan paket ke node akhir. PR-APC merupakan pengembangan metode algoritma routing physarum yang mampu menyelesaikan permasalahan halangan di jaringan IoT dengan metode meningkatkan efisiensi sumber daya pada aktifitas routing melalui adaptive power. Keputusan routing PRA-APC akan melewati hop sebanyak 4 hop saat dilakukan iterasi round 20 kebawah sebaliknya jika dilakukan iterasi round 20 keatas total hop yang dilewati hanya 3 hop saja, hal ini terjadi karena PR-APC sangat mempertimbangkan efisiensi jumlah hop agar mampu menyelesaikan permasalahan halangan dalam jaringan IoT daerah agroindustrial. Di daerah agroindustri kebanyakan jumlah router atau node sangat sedikit sehingga halangan yang dimaksud di daerah agroindustrial adalah ketiadaan router pada wilayah-wilayah tertentu sehingga menimbulkan blankspot. Algoritma PR-APC mampu menyelesaikan permasalahan tersebut dengan membuat efisiensi jumlah hop dan mencari router yang masih aktif untuk meneruskan data yang akan dikirimkan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Marjani *et al.*, "Big iot data analytics: Architecture, opportunities, and open research challenges," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 5247–5261, 2017.
- [2] L. Liu, G. Han, H. Wang, and J. Wan, "Obstacle-avoidance minimal exposure path for heterogeneous wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 55, pp. 50–61, 2017.
- [3] R. Hamidouche, Z. Aliouat, A. M. Gueroui, A. A. A. Ari, and L. Louail, "Classical and bio-inspired mobility in sensor networks for iot applications," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 121, no. July, pp. 70–88, 2018.
- [4] Y. Liu *et al.*, "Solving np-hard problems with physarum based ant colony system," *IEEE/ACM Trans. Comput. Biol. Bioinforma.*, vol. 14, no. 1, pp. 108–120, 2015.
- [5] A. Tero, R. Kobayashi, and T. Nakagaki, "Physarum solver: A biologically inspired method of road-network navigation," *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 363, no. 1, pp. 115–119, 2006.
- [6] M. Zhang, C. Xu, J. Guan, R. Zheng, Q. Wu, and H. Zhang, "P-irp: Physarum-inspired routing protocol for wireless sensor networks," in *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2013, 2013.
- [7] L. Rosyidi, M. Asvial, and R. F. Sari, "Lightweight and energy-aware wireless mesh routing for autonomic internet of things network (accepted)," *Int. J. Grid Distrib. Comput.*, vol. 11, no. 12, 2018.
- [8] W. Guo and X. Huang, "Pora: A physarum-inspired obstacle-avoiding routing algorithm for integrated circuit design," *Appl. Math. Model.*, vol. 78, pp. 268–286, 2020.
- [9] G. Ahmed and N. M. Khan, "Adaptive power-control based energy-efficient routing in wireless sensor networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 94, no. 3, pp. 1297–1329, 2017.
- [10] T. Nakagaki, R. Kobayashi, and Y. Nishiura, "Obtaining multiple separate food sources: Behavioural intelligence in the obtaining multiple separate food sources: behavioural intelligence in the physarum plasmodium references article cited in:," 2004, no. November.
- [11] A. Tero, R. Kobayashi, and T. Nakagaki, "A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold," *Journal Name*, vol. 244, pp. 553–564, 2007.
- [12] M. Zhang, C. Xu, J. Guan, R. Zheng, Q. Wu, and H. Zhang, "P-irp: Physarum-inspired routing protocol for wireless sensor networks," in *IEEE Veh. Technol. Conf.*, 2013, pp. 1–6.
- [13] J. Won and H. K. Park, "An adaptive power-controlled routing protocol for energy limited wireless sensor networks," *J. Inf. Commun. Converg. Eng.*, vol. 16, no. 3, pp. 135–141, 2018.
- [14] H. Jiang, X. Liu, S. Xiao, C. Tang, and W. Chen, "Physarum-inspired autonomous optimized routing protocol for coal mine manet," *Journal Name*, vol. 2020, 2020.
- [15] C. Gao, X. Zhang, Z. Yue, and D. Wei, "An accelerated physarum solver for network optimization," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 50, no. 2, pp. 765–776, 2018.