

# Komunikasi M2M Kognitif Berbasis PRMA dengan *Multi Ultra Frame* dan *Payload Exchange*

Eko Arifianto<sup>1</sup>, Aghus Sofwan<sup>2</sup>, Teguh Prakoso<sup>3</sup>

**Abstract**—M2M communication is the process of exchanging data between devices on a network of capillary systems. The communication channel used is an empty space on a TV channel with a cognitive radio mechanism combined PRMA with a fixed and periodic scheme. The scheme has a working system that allows PRMA to place data in the same free space, which causes collisions. Therefore, it needs repetition, which requires more energy and causes inefficient communication. Thus, a Multi Ultra Frame (MUF) and Payload Exchange (PE) data exchange scheme is proposed to reduce collisions and repetition by giving grades and features to the data, with the aim to achieve optimal use of empty space. An indication of efficient communication is the optimal use of empty space, which affects the throughput (*PT*), duty cycle (*Cyl*), and interference ratio (*fo*). The higher *PT* and the lower *Cyl* and *fo*, the more efficient the communication. MUF and PE schemes produce *PT* of 99-41%, *Cyl* of 1-4.4%, and *fo* of 10-33%. Fixed and periodic schemes produce *PT* of 81-21%, *Cyl* of 2-9%, and *fo* of 15-52%. Optimization of MUF and PE schemes produce *PT* of 99-70%, *Cyl* of 0.5-2.2%, and *fo* of 8-14%. Optimization of fixed and periodic schemes produce *PT* of 66-35%, *Cyl* of 3-6%, and *fo* of 19-28%.

**Intisari**—Komunikasi M2M merupakan proses pertukaran data antar perangkat pada jaringan sistem kapiler. Saluran komunikasi yang digunakan adalah ruang kosong pada saluran TV dengan mekanisme radio kognitif kombinasi PRMA skema tetap dan periodik. Skema tersebut memiliki sistem kerja yang menjadikan PRMA dapat menempatkan data pada ruang kosong yang sama, yang menyebabkan tabrakan. Oleh karena itu, diperlukan pengulangan, yang memerlukan energi lebih banyak, sehingga komunikasi menjadi tidak efisien. Dengan demikian, diusulkan skema pertukaran data *Multi Ultra Frame* (MUF) dan *Payload Exchange* (PE) untuk mengurangi tabrakan serta pengulangan dengan memberikan *grade* dan keutamaan pada data, dengan tujuan agar penggunaan ruang kosong dapat optimal. Indikator komunikasi yang efisien adalah penggunaan ruang kosong yang sangat optimal yang berpengaruh pada *throughput* (*PT*), *duty cycle* (*Cyl*), dan *interference ratio* (*fo*). Semakin tinggi *PT* dan semakin rendah *Cyl* serta *fo*, semakin efisien komunikasi. Skema MUF dan PE menghasilkan *PT* sebesar 99-41%, *Cyl* 1-4,4%, dan *fo* 10-33%. Skema tetap dan periodik menghasilkan *PT* 81-21%, *Cyl* 2-9%, dan *fo* 15-52%. Optimasi skema MUF dan PE menghasilkan *PT* 99-70%, *Cyl* 0,5-2,2%, dan *fo* 8-14%. Sedangkan optimasi skema tetap dan periodik memberikan *PT* 66-35%, *Cyl* 3-6%, dan *fo* 19-28%.

**Kata Kunci**—Komunikasi M2M, Radio kognitif, *Multi Ultra Frame*, *Payload Exchange*, PRMA.

<sup>1</sup>Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jalan Prof H. Soedarto SH, Tembalang Semarang 50275 INDONESIA (telp: 024-746 0057; e-mail: ekoarifianto8888@gmail.com)

<sup>2,3</sup>Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jalan Prof H. Soedarto SH, Tembalang Semarang 50275 INDONESIA (telp: 024-746 0057; e-mail: asofwan@elektro.undip.ac.id, teguhprakoso@elektro.undip.ac.id)

## I. PENDAHULUAN

Teknologi komunikasi mengalami kemajuan yang sangat pesat pada berbagai bidang, termasuk bidang komunikasi M2M. Komunikasi M2M merupakan proses pertukaran data antar perangkat pada sistem kapiler, dengan metode radio kognitif kombinasi PRMA, melalui ruang kosong saluran TV [1], [2]. Desain komunikasi M2M merupakan sistem pertukaran data dari Perangkat Komunikasi Mandiri (PKM) ke pengguna melalui Perangkat Komunikasi Mandiri *Gateway* (PKMG) [1].

Gbr. 1 memperlihatkan desain komunikasi M2M yang terdiri atas domain perangkat, domain jaringan, dan domain aplikasi [3]. Pengiriman data dimulai ketika PKM menginformasikan permintaan ke PKMG, kemudian PKMG mengindera saluran dan mengirimkan hasilnya ke PKM. PKM memfungsikan sistem pertukaran data ke saluran tidak terpakai dan memulai prosedur kompetisi, dengan memilih *slot uplink* secara acak. PKMG memberitahu PKM pada *slot downlink* bahwa pemesanan *slot* sukses dan data telah terkirim. Karena PKM bertambah, terjadi kemacetan pertukaran data pada saluran yang digunakan. Untuk mengatasinya, digunakan ruang kosong pada saluran TV (*TV White Space*) [4]. Gbr. 2 memperlihatkan bahwa ruang kosong pada saluran TV adalah saluran TV analog yang tidak dipergunakan oleh pengguna karena telah bermigrasi pada saluran TV digital.

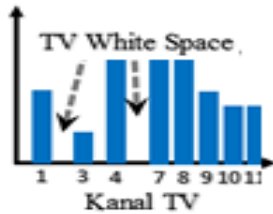
Ruang kosong pada saluran TV merupakan saluran tidak terpakai pada siaran televisi, karena pengalihan metode siaran dari analog ke digital. Ruang kosong ini difungsikan menggunakan metode radio kognitif kombinasi PRMA. Radio kognitif menempatkan data pada saluran yang pada saat itu tidak digunakan, sedangkan PRMA diterapkan pada skema pengiriman data, dengan menempatkan *slot* secara multiakses menggunakan mekanisme reservasi. Hal tersebut mengalami masalah karena tabrakan, *slot* tidak terpakai, dan pengulangan perebutan *slot*, karena pada PRMA, PKM boleh memilih *slot* manapun walaupun sama dengan PKM lain [5]–[8].

Tabel I memperlihatkan perbandingan jenis penyertaan yang digunakan model lain dan model yang diusulkan. Mode lain menggunakan model susunan *frame* tetap dan skema komunikasi M2M periodik, tanpa teknik *sensing* serta tanpa *backup and recovery*. Model yang diusulkan menggunakan model susunan *frame* MUF, skema komunikasi M2M PE, teknik *sensing* FCSD serta *backup and recovery* SUBRP [8].

Tabel II memperlihatkan kelebihan dan kekurangan susunan *frame* dan skema model lain, yaitu *frame* tetap serta skema periodik yang memiliki kelebihan, PKM bebas memilih *slot* yang berpeluang menempati *slot*, karena waktu tidak terbuang untuk pencarian *slot*. Namun, hal ini menyebabkan PKM berpeluang memilih *slot* sama dengan PKM lain, yang menyebabkan tabrakan, sehingga *slot* tidak dapat ditempati, perlu pengulangan pemilihan *slot*. Akibatnya, perlu banyak energi serta memperpendek umur baterai [5].



Gbr. 1 Desain komunikasi M2M [3].



Gbr. 2 Ruang kosong pada saluran TV.

TABEL I  
JENIS PENYERTAAN

Penyertaan	Model lain [1]	Model diusulkan
Model susunan <i>frame</i>	<i>Frame</i> tetap	<i>Multi Ultra Frame</i>
Skema komunikasi M2M	Periodik	<i>Payload Exchange</i>
Teknik sensing	-	FCSD
<i>Backup and Recovery</i>	-	SUBRP

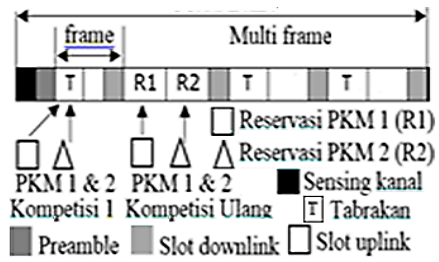
TABEL II  
KELEBIHAN DAN KEKURANGAN MODEL LAIN

Keterangan	Model susunan <i>frame</i>	Skema komunikasi M2M
	<i>Frame</i> tetap	Periodik
<b>Kelebihan</b>	Bebas memilih <i>slot</i>	Data terima lengkap
<b>Kekurangan</b>	Menempati <i>slot</i> sama, tabrakan, pengulangan	Data tidak selalu tertampung

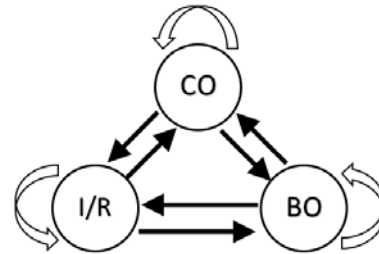
Tabel III memperlihatkan kelebihan dan kekurangan *Multi Ultra Frame* (MUF) dan *Payload Exchange* (PE). MUF memberikan *grade* pada data dan *slot*, sehingga PKM tidak bebas memilih *slot*. Akibatnya, tidak terjadi tabrakan dan pengulangan. PE memberi keutamaan data, pertukaran data sesuai *grade*, dan keutamaan yang ditetapkan PKMG [9]–[12].

Gbr. 3 memperlihatkan pertukaran data antara PKM dengan PKM atau PKM dengan pengguna *via* PKMG, mulai dari kompetisi antar PKM. PKM 1 dan PKM 2 secara acak menempati *slot*. Jika kedua PKM menempati *slot* yang sama, maka terjadi tabrakan, sehingga *slot* tidak dapat dipergunakan, PKM tidak menukarkan data, terjadi pengulangan kompetisi *slot*, dan memerlukan energi lebih banyak [13]–[20].

Gbr. 4 memperlihatkan skema periodik. PKM berkompetisi pada mode *competition* (CO) hasil kompetisi, PKM pemenang masuk mode *reservation* (R) jika kondisi saluran utama *idle* (I). Sedangkan jika kondisi saluran sedang dipergunakan, maka *BackOff* (BO) kembali untuk melakukan kompetisi. Jika pada mode CO beberapa perangkat memilih *slot* yang sama, maka dapat terjadi tabrakan, sehingga otomatis akan masuk pada mode BO dan mengulang kompetisi [21]–[29].



Gbr. 3 Model susunan *frame* tetap.



I : Idle R : Reservation  
CO : Competition BO : BackOff

Gbr. 4 Skema komunikasi M2M periodik.

TABEL III  
KELEBIHAN DAN KEKURANGAN MODEL YANG DIUSULKAN

Keterangan	Model susunan <i>frame</i>	Skema komunikasi M2M
	<i>Multi Ultra Frame</i>	<i>Payload Exchange</i>
<b>Kelebihan</b>	Menempati <i>slot</i> sesuai <i>grade</i> , tidak tabrakan, tidak perlu pengulangan.	Data disampaikan sesuai <i>grade</i> dan keutamaan
<b>Kekurangan</b>	Tidak bebas memilih <i>slot</i>	Prosedur kompleks.

II. MODEL SISTEM MUF, PE, FCSD, DAN SUBRP

A. *Multi Ultra Frame* (MUF)

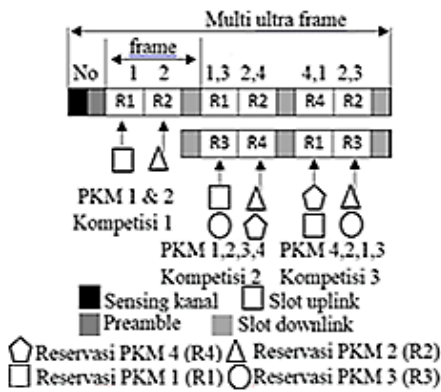
MUF merupakan model susunan *frame* dengan *slot* dan data yang telah diberi *grade* berdasarkan informasi kelas bobot data yang dibawa dari PKM ke PKMG serta digunakan sebagai rujukan.

Gbr. 5 memperlihatkan kompetisi PKM. PKM 1 dan PKM 2 menginformasikan pertukaran data pada PKMG. Selanjutnya, PKMG mendaftarkan PKM dengan bobot kelas dan memberi *grade*. Karena jumlah PKM bertambah, data menjadi macet, sehingga diperlukan mekanisme pengaturan pertukaran data, yaitu PE.

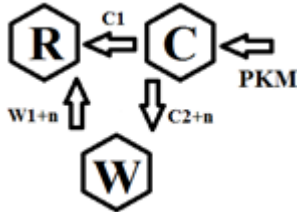
B. *Payload Exchange* (PE)

PE merupakan mekanisme pengaturan lalu-lintas pertukaran data, dengan memberi keutamaan pada data. PKM yang membawa data penting diberi keutamaan sebagai pemenang kompetisi, langsung melakukan reservasi *slot*, dan melakukan pengiriman paket data, sedangkan PKM dengan data reguler sebagai yang kalah kompetisi menunggu PKM pemenang selesai melakukan reservasi. Sistem tersebut berlaku pada *frame* berikutnya dan tidak perlu melakukan kompetisi ulang.

Gbr. 6 memperlihatkan proses kompetisi PKM yang dimulai dari mode (C). Jika hanya terdapat dua PKM yang berkompetisi, maka keduanya langsung melakukan reservasi dengan prosedur C1 pada mode (R). Jika terdapat empat PKM atau lebih, maka



Gbr. 5 Model susunan multi ultra frame (MUF).



Gbr. 6 Skema komunikasi M2M payload exchange.

terdapat dua PKM pemenang yang langsung reservasi (R), sedangkan dua PKM yang kalah masuk mode tunggu (W) dengan prosedur C2+n sesuai dengan jumlah PKM yang berkompetisi. Setelah PKM pemenang selesai melakukan reservasi, PKM berikutnya bergantian melakukan reservasi dengan prosedur W1+n dengan mode (R).

C. Fast Correct Sensing Detection (FCSD)

Fast Correct Sensing Detection (FCSD) merupakan mekanisme penginderaan saluran yang dilakukan Pengguna Sekunder (PS), yaitu PKM, untuk mengetahui pola aktivitas Pengguna Primer (PP), yaitu penyedia layanan TV. FCSD dilakukan melalui deteksi energi dengan ambang batas tertentu, sehingga dihasilkan keputusan energi tersebut adalah noise atau PP. Kemudian, PS melakukan pertukaran data.

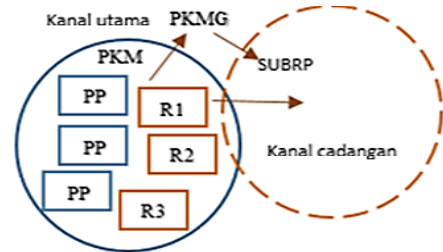
Gbr. 7 memperlihatkan proses deteksi saluran utama yang akan digunakan untuk komunikasi M2M dengan menggunakan FCSD. PS melalui PKMG dengan FCSD mengindera seluruh saluran yang ada, hingga terdeteksi energi dengan ambang batas yang telah ditetapkan ( $\alpha$ ): jika energi  $< \alpha$  dianggap noise, sedangkan jika energi  $> \alpha$  dianggap PP. Saluran dengan energi PP paling sedikit dijadikan sebagai saluran utama. PS mengindera saluran. Jika masih dipakai (terdapat PP), tetap dilakukan sensing hingga terdeteksi noise, kemudian memakai saluran, dari terdeteksi noise hingga tidak terdeteksi energi (kosong). Jika masih dipakai (terdapat PP), tetap dilakukan sensing. Jika tiba-tiba PP meninggalkan saluran, tidak terdeteksi energi (kosong), maka PS memakai saluran dari kosong hingga terdeteksi noise. Ketika terdeteksi PP, PS berpindah dari saluran utama ke cadangan via SUBRP.

D. Secondary User Backup Recovery Protocol (SUBRP)

SUBRP merupakan mekanisme perpindahan saluran dari saluran utama ke saluran cadangan yang dilakukan oleh PKM



Gbr. 7 Fast Correct Sensing Detection (FCSD)



Gbr. 8 Secondary User Backup Recovery Protocol (SUBRP).

atau PS melalui PKMG ketika terdeteksi PP pada saluran utama. SUBRP memindahkan aktivitas dari saluran utama ke saluran cadangan dengan kondisi komunikasi normal, penurunan kinerja minimal, dan tingkat kinerja sama.

Gbr. 8 memperlihatkan proses perpindahan aktivitas dari saluran utama ke saluran cadangan menggunakan SUBRP. PS, yaitu PKM, melalui PKMG mengindera seluruh saluran yang ada, baik saluran utama maupun saluran cadangan. Kemudian, data yang diperoleh disimpan dalam database PKMG. Ketika PS mendeteksi PP pada saluran utama, PS memberitahu PKMG, kemudian PKMG menyiapkan saluran cadangan agar PS dapat berpindah saluran. PKMG menduplikasi komponen saluran utama ke saluran cadangan menggunakan SUBRP.

III. METODE

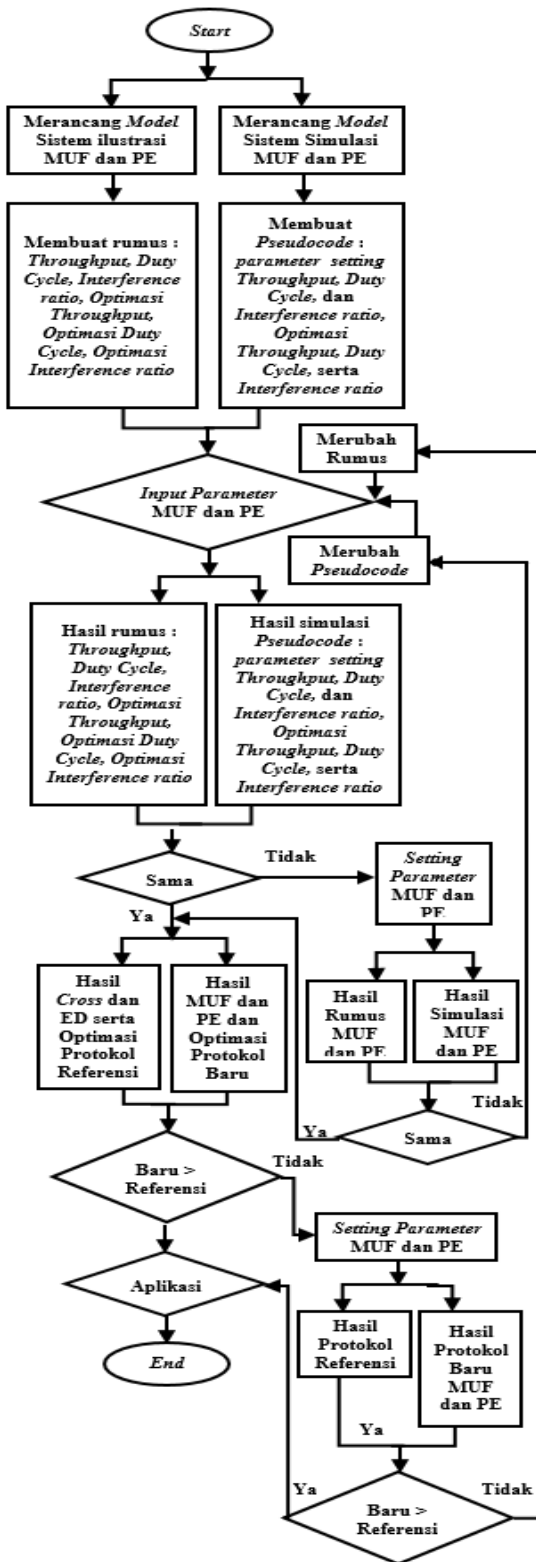
Makalah ini menggunakan langkah-langkah penelitian dalam beberapa tahap, yang diperlihatkan pada Gbr. 9.

Gbr. 9 memperlihatkan langkah penelitian merancang model sistem ilustrasi dan simulasi MUF dan PE. Membuat rumus dan pseudocode throughput, duty cycle dan interference ratio beserta optimasinya, diberi masukan nilai parameter. Jika keduanya sama, bandingkan dengan hasil mode lain, jika lebih besar dapat diaplikasikan. Namun, jika hasil rumus dan simulasi tidak sama, setting ulang nilai parameter, jika sama bandingkan model lain. Jika tidak sama rubah pseudocode.

Gbr. 10 memperlihatkan cara aplikasi MUF, PE, FCSD dan SUBRP. PKM pada jaringan kapiler mengindera lingkungan, Inisialisasi pengiriman via slot uplink, informasi ke PKMG. sensing saluran FCSD, deteksi saluran tidak terpakai. Cognitive radio memilih saluran utama, perebutan slot. PKM pemenang reservasi via PRMA, PKM kalah menunggu. MUF melakukan pemilahan dengan pemberian grade dan keutamaan. Jika terdeteksi PP, PS pindah saluran cadangan via SUBRP, FCSD.

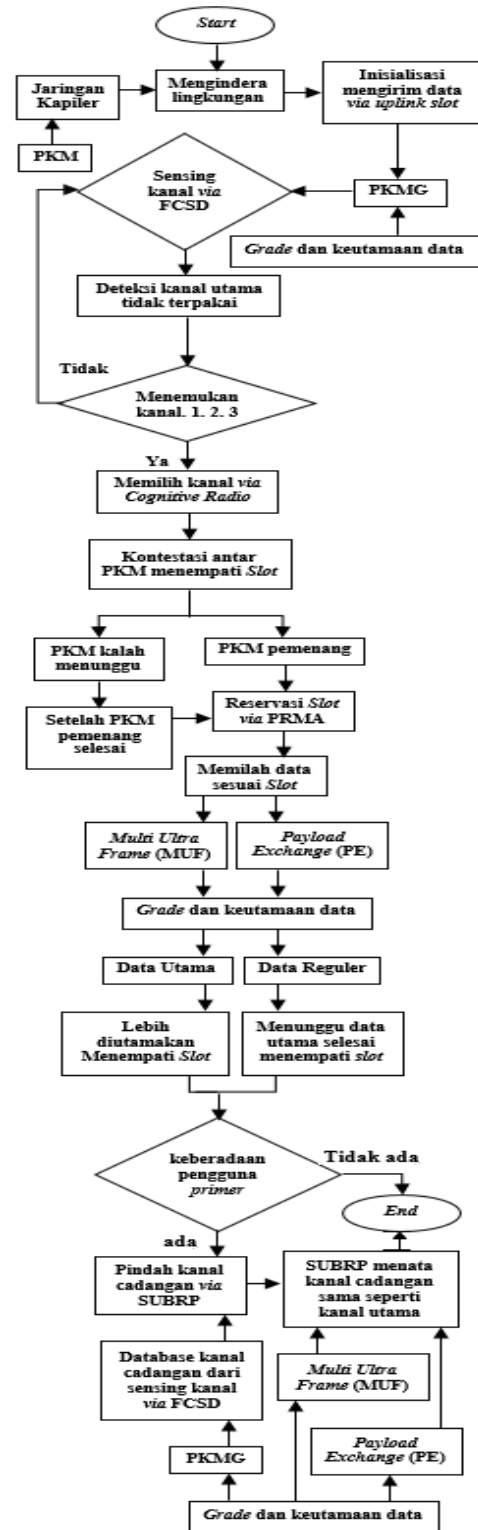
A. Merancang Rumus PT, OPT, Cyl, Ocul, fo dan Ofo

Saluran kognitif utama dinotasikan sebagai  $K_u$  dan saluran kognitif cadangan dinotasikan sebagai  $K_c$ . Durasi  $K_u$  dihuni =  $\frac{1}{v_{ud}}$ , dengan  $V_{ud}$  merupakan durasi rata-rata saluran dihuni.



Gbr. 9 Tahap langkah-langkah penelitian.

Durasi  $K_u$  tidak dihuni =  $\frac{1}{V_{em}}$ , dengan  $V_{em}$  merupakan durasi rata-rata saluran tidak dihuni. Aktivitas saluran diwakili oleh parameter  $P_{ud}$  yang diartikan bahwa  $K_u$  sedang dihuni (PP aktif).



Gbr. 10 Aplikasi MUF, PE, FCSD dan SUBRP.

$$P_{ud} = \frac{V_{em}}{V_{ud} + V_{em}} \tag{1}$$

$P_{em}$  menyatakan bahwa  $K_u$  sedang tidak dihuni (PP tidak aktif), dengan probabilitas sebagai berikut.

$$P_{em} = 1 - P_{ud} \tag{2}$$

dengan

- $V_{em}$  = durasi rata-rata saluran utama kosong
- $V_{ud}$  = durasi rata-rata saluran utama dihuni
- $P_{em}$  = probabilitas saluran utama kosong
- $P_{ud}$  = probabilitas saluran utama dihuni.

PS melalui PKMG dengan FCSD mengindera seluruh saluran yang ada, hingga terdeteksi energi, lalu membandingkan energi saluran utama ( $E_{Ku}$ ) dengan nilai ambang batas yang ditetapkan ( $\alpha$ ),  $E_{Ku} < \alpha$  empty,  $E_{Ku} > \alpha$  used.

$$Decision\ sensing\ (D_{Sr}) = \begin{cases} \text{empty} & \rightarrow E_{Ku} < \alpha \\ \text{(em)} & \\ \text{used} & \rightarrow E_{Ku} > \alpha \\ \text{(ud)} & \end{cases} \quad (3)$$

PKMG mendeteksi saluran dengan dua kemungkinan sinyal, yaitu probabilitas *true signal* ( $P_{ts}$ ) dan probabilitas *false signal* ( $P_{fs}$ ).

$$P_{ts} = P_{det} \{E_1 > \alpha | P_{ud}\} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\alpha - 2m(h+1)}{\sqrt{4m(2h+1)}} \right) \quad (4)$$

$$P_{fs} = P_{det} \{E_1 > \alpha | P_{em}\} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\alpha - 2m}{\sqrt{4m}} \right) \quad (5)$$

dengan

- $\alpha$  = ambang batas deteksi energi
- $m$  = bandwidth
- $h$  = signal to noise ratio.

Probabilitas hunian saluran utama ( $PK_{uc}$ ), Probabilitas hunian saluran cadangan ( $PK_{cu}$ ), dan Probabilitas *slot* ditempati ( $G_{sc}$ ) dihitung menggunakan (6) sampai (8).

$$PK_{uc} = P_{em} \cdot P_{fs} + P_{ts} \cdot P_{ud} \quad (6)$$

$$PK_{cu} = P_{ud}(1 - P_{ts}) + P_{em}(1 - P_{fs}) \quad (7)$$

$$G_{sc} = \binom{C_0}{1} \left( q(1-q)^{C_0-1} \left( 1 - \frac{L_u}{w_u} \right) (1 - P_{ud} e^{V_{ud}t}) \right) \quad (8)$$

dengan

- $C_0$  = jumlah PKM yang berkompetisi
- $q$  = probabilitas *permission*
- $L_u$  = *slot* yang terpesan
- $w_u$  = *uplink slot per frame*
- $P_{ud}$  = probabilitas saluran utama dihuni
- $V_{ud}$  = durasi rata-rata saluran utama dihuni
- $t$  = durasi *slot*
- $G_{sc}$  = probabilitas *slot* ditempati.

### B. Throughput

*Throughput* ( $PT$ ) merupakan perbandingan rata-rata interval data yang berhasil dipertukarkan dengan rata-rata jumlah total rentang interval pertukaran dan kompetisi,

$$B_{(r)} = [Z \cdot G_{sc} (\sum_H^\infty (HP_{det}^H) \cdot P_{det} N)] = Z \cdot G_{sc} - N + \sum_H^D H \quad (9)$$

Sedangkan  $M_k$  merupakan variabel acak yang merepresentasikan jumlah keseluruhan pertukaran data sampai berhasil.

$$M_k = \left( \left( \frac{1+G_{sc}}{G_{sc}} \right) + \left( \frac{H^2-N}{Z} \right) \right) G_{sc} \quad (10)$$

dengan

- $Z$  = *reservation cycle*
- $D$  = rata-rata *slot* ditempati
- $P_{det}$  = probabilitas peralihan dari  $T$  ke  $K$
- $P_{det} N$  = probabilitas peralihan dari  $T$  ke  $K$  pada  $N$
- $H$  = pengiriman sukses
- $G_{sc}$  = probabilitas *slot* ditempati.

*Throughput* rata-rata untuk PKM diberikan oleh (11).

$$PT_{PRMA} = (D - N) + \left( \frac{B_{(r)} \cdot H}{B_{(r)} + M_k + Z} \right) \cdot Z \quad (11)$$

Sedangkan *throughput* dengan struktur MUF dan skema PE dihitung dengan (12).

$$Throughput\ (PT) = \frac{PT_{PRMA}}{S_{CB} \cdot M_k} (S_{CB} - S_p - S_{tv}) \cdot S_d^2 \quad (12)$$

dengan

- $S_{CB}$  = durasi MUF
- $S_d$  = waktu deteksi saluran
- $S_p$  = *preamble*
- $S_{tv}$  = *channel switching overhead*
- $M_k$  = jumlah seluruh pertukaran data sampai berhasil
- $B_{(r)}$  = interval reservasi.

### C. Duty Cycle

*Duty cycle* ( $Cyl$ ) merupakan perbandingan rata-rata waktu yang diperlukan saat pertukaran data dengan seluruh waktu hasil rekomendasi.

$$C_{yl} = \frac{2 \cdot S_{nk}}{S_{CB}^2 D_F \cdot Z} \left( (Z \cdot S_p + M_k D_F) + \left( ((Z - D) D_F + (D - 1) D_F)^2 \right) \right) - (S_{nk} D_F)^2 \quad (13)$$

dengan

- $S_{CB}$  = durasi MUF
- $S_p$  = *preamble*
- $D_F$  = durasi *frame*
- $S_{nk}$  = probabilitas kontestasi PKM
- $Z$  = *Reservation Cycle*
- $D$  = rata-rata *slot* ditempati.

### D. Interference Ratio

*Interference ratio* ( $f_o$ ), didefinisikan sebagai fraksi sinyal yang dihasilkan dari durasi aktif pertukaran data PP yang terganggu oleh pertukaran data PS.

$$f_o = 2P_w P_{ud} + \frac{P_{em}(1-P_{fs})}{P_{ud}} + e^{-vt} \frac{(P_{fs}-P_{ts})}{P_w} + P_{fs} P_{ts} \quad (14)$$

dengan

- $P_w$  = probabilitas *miss-detection*
- $v$  =  $\max(V_{em}, V_{ud})$
- $t$  = durasi *slot*
- $P_{ud}$  = probabilitas saluran utama dihuni
- $P_{em}$  = probabilitas saluran utama kosong
- $P_{fs}$  = probabilitas *false signal*
- $P_{ts}$  = probabilitas *true signal*.

### E. Optimasi Throughput (OPT)

Throughput yang menurun diatasi dengan optimasi, pengurangan interval kompetisi, menggunakan pemaksimalan deteksi saluran ( $S_d^*$ ), pengurangan preamble ( $S_p$ ), channel switching overhead ( $S_{tv}$ ), mengurangi dan membagi waktu reservasi  $S'$ .

$$OPT = \frac{PT_{PRMA} \cdot PK_{cu} \cdot D^2}{S_{CB} \cdot S_{nk}} (S_{CB} \cdot D_F + S_d^* + Z^2 \cdot S_{nk} - 2 \cdot S') \quad (15)$$

$$S' = S_p + S_{tv} + S_{nk} \quad (16)$$

dengan

- $S_{CB}$  = durasi MUF
- $S_p$  = preamble
- $D_F$  = durasi frame
- $S_{nk}$  = probabilitas kontestasi PKM
- $Z$  = reservation cycle
- $D$  = rata-rata slot ditempati
- $PT_{PRMA}$  = throughput PRMA
- $PK_{cu}$  = probabilitas hunian saluran cadangan
- $S_{tv}$  = channel switching overhead
- $S'$  = waktu reservasi
- $S_d^*$  = waktu deteksi saluran maksimal.

### F. Optimasi Duty Cycle

Semakin tinggi reservation cycle, semakin tinggi pula duty cycle, sehingga energi reservasi semakin besar. Optimasi duty cycle dilakukan dengan mengatur waktu pertukaran data masuk slot dan mengurangi  $S_p^*$ ,  $D_F^*$ , serta meningkatkan  $S_{CB}$ .

$$OC_{yl} = \frac{D}{Z \cdot U \cdot S_{CB}} (Z \cdot S_p^* + M_k D_F + (Z - D) D_F + (D - 1) D_F - S_{nk} D_F) \quad (17)$$

dengan

- $U$  = jumlah PKM yang berkompetisi
- $S_{CB}$  = durasi MUF
- $S_p^*$  = preamble yang sudah dibagi dengan jumlah PKM
- $D_F^*$  = durasi frame yang sudah dibagi dengan jumlah PKM
- $S_{nk}$  = probabilitas kontestasi PKM
- $Z$  = reservation cycle
- $D$  = rata-rata slot ditempati.

### G. Optimasi Interference Ratio

Optimasi interference ratio ( $Of_o$ ), didefinisikan sebagai pengurangan fraksi sinyal yang dihasilkan dari durasi aktif pertukaran data PP yang terganggu oleh pertukaran data PS secara maksimal, dengan mengurangi tabrakan menggunakan MUF, PE, serta FCSD.

$$Of_o = \left( P_{em} \times e^{-vt \frac{(P_{fs} \times P_{ts})}{P_{ud}}} \right) - P_w \quad (18)$$

dengan

- $v$  = max ( $V_{em}$ ,  $V_{ud}$ )
- $t$  = durasi slot
- $P_{em}$  = probabilitas saluran utama kosong
- $P_{fs}$  = probabilitas false signal

TABEL IV  
NILAI PARAMETER

Parameter	Nilai
jumlah PKM yang berkompetisi ( $C_0$ )	20-140
probabilitas permission ( $q$ )	20
slot yang terpesan ( $L_u$ )	135
uplink slot per frame ( $w_u$ )	2
probabilitas saluran utama dihuni ( $P_{ud}$ )	85%
durasi rata-rata saluran utama dihuni ( $V_{ud}$ )	3 ms
durasi slot ( $t$ )	7 ms
reservation cycle ( $Z$ )	5 ms
rata-rata slot ditempati ( $D$ )	170
probabilitas peralihan dari T ke K ( $P_{det}$ )	35%
probabilitas peralihan dari T ke K pada N ( $P_{det}N$ )	55%
pengiriman sukses ( $H$ )	2 ms
probabilitas slot ditempati ( $G_{sc}$ )	95%
durasi MUF ( $S_{CB}$ )	71 ms
durasi frame ( $D_F$ )	14 sec
probabilitas kontestasi PKM ( $S_{nk}$ )	5%
waktu deteksi saluran ( $S_d$ )	0,1 ms
Preamble ( $S_p$ )	0,5 ms
channel switching overhead ( $S_{tv}$ )	1 ms
jumlah seluruh pertukaran data sampai berhasil ( $M_K$ )	200
interval reservasi ( $B_{(r)}$ )	842
probabilitas miss-detection ( $P_w$ )	2%
max ( $V_{em}$ , $V_{ud}$ ) ( $v$ )	2 ms
probabilitas saluran utama kosong ( $P_{em}$ )	90%
probabilitas false signal ( $P_{fs}$ )	5%
probabilitas true signal ( $P_{ts}$ )	95%
throughput PRMA ( $PT_{PRMA}$ )	65%
probabilitas hunian saluran cadangan ( $PK_{cu}$ )	95%
waktu reservasi ( $S'$ )	0,75 ms
waktu deteksi saluran maksimal ( $S_d^*$ )	1 ms
preamble dibagi dengan jumlah PKM ( $S_p^*$ )	0,0025 ms
durasi frame dibagi dengan jumlah PKM ( $D_F^*$ )	0,7 ms

$P_{ts}$  = probabilitas true signal

$P_w$  = probabilitas miss-detection

$P_{ud}$  = probabilitas saluran utama dihuni.

### H. Konfigurasi Parameter

Langkah berikutnya adalah memasukkan parameter untuk mendapatkan hasil rumus dan hasil simulasi pseudocode. Tabel IV memperlihatkan konfigurasi parameter, jumlah pengiriman sukses ( $H$ ), interval reservasi ( $B_{(r)}$ ), dan rata-rata slot ditempati ( $D$ ) yang menentukan hasil  $PT_{PRMA}$  dan  $PT_{MUF-PE}$ .

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Makalah ini mendapatkan hasil berupa pseudocode PRMA, MUF-PE Parameters Setting, dan Optimization Transmission Procedure. Hasil simulasi MATLAB berupa grafik throughput, duty cycle, dan interference ratio sebelum dan sesudah optimasi. Diperoleh juga hasil manual throughput, duty cycle dan interference ratio.

Algoritme 1 memperlihatkan pseudocode setting parameter pada frame tetap dan skema periodik model lain. Nilai  $N$ ,  $p$ ,  $N_u$ ,  $T_d$ ,  $T_F$ ,  $T_P$ ,  $T_{SW}$ ,  $\mu_{on}$ , dan  $\mu_{off}$  dimasukkan pada rumus  $\theta$ ,  $DC$ , dan  $IR$ . Nilai parameter disesuaikan untuk mendapatkan output standar.

**Algorithm 1 : Permanent Frame and Periodic Parameters**Input :  $N, p, N_u, T_d, T_F, T_P, T_{SW}, \mu_{on}, \mu_{off}$ .Output :  $\theta, DC, IR$ **begin** Throughput analysis**for** parameters **do**

$$\text{Throughput } (\theta) = \frac{1}{T_{SW}} (T_{SW} - T_d - T_F - T_P - Nv) \cdot T_{PRMA}$$

**end****end begin****begin** Duty cycle analysis**for** parameters transmission time **do**

$$DC = \frac{1}{T_{SW}} (T_p + N_v T_F + (N - p) T_F + (p - 1) T_F + T_{SW} \cdot T_d)$$

**end****end begin****begin** Interference ratio analysis**for** transmission disturbance **do**

$$IR = P_m P_b + P_i (1 - P_f) + e^{-\mu t} (P_f - P_d)$$

**end****end begin**

Algorithm 2 memperlihatkan *optimization framework*. Setelah didapatkan *output*  $\theta, DC$ , dan  $IR$ , nilai  $N, p^*, N_u, T_d^*, T_F^*, T_P^*, T_{SW}, \mu_{on}$ , dan  $\mu_{off}$ , dimasukkan pada rumus  $\theta^*, Y, X^*$ . Parameter disesuaikan sampai diperoleh hasil *output* optimasi hingga mencapai nilai maksimal.

**Algorithm 2 : Optimization framework**Input :  $N, p^*, N_u, T_d^*, T_F^*, T_P^*, T_{SW}, \mu_{on}, \mu_{off}$ .Output :  $\theta^*, Y, X^*$ **begin** Optimization**set**  $T_d^*, T_F^*, T_P^*$ **for** optimization **do**set and use  $T_d^*, T_F^*, T_P^*$  as a parameter optimization**end****for** Max setting **do**

$$\theta^* = \frac{1}{N_u} (N_u \cdot T_d^* + S_d^* + T_P^* + T_{SW}) \cdot T_{PRMA}$$

**end****end begin****begin** Duty Cycle threshold**for** Maximum time detection **do**

$$Y(T_d^*, T_p^*) = \frac{1}{T_{SW}} (T_{SW} + S_d^* + S^2) \cdot T_{PRMA}$$

**end****end begin****begin** Maximum Reservation Cycle**for** Maximum Constraint **do**

$$X^* = \left( \left( T_F \left( C_{SO} + \left( \frac{2}{\rho} \right)^2 \exp \left( R^* + \sqrt{\frac{F_W S_d^*}{2}} \rho \right) \sqrt{\frac{2\pi S_d^*}{F_W}} \left\{ \frac{(1 - A(F_{Omax} + P_{em}))}{2 + (2P_{em} - 1)A} \right\} + U^* \right) \right) - (T_F \times t) \right)$$

**end****end begin**

Algorithm 3 memperlihatkan *pseudocode* PRMA dan *MUF-PE parameters setting*. Nilai *parameter* dibangkitkan lalu (1) dan (2) dieksekusi. Saluran ambang batas energi ( $P_{ts}$ )

dideteksi dan kemungkinan pindah saluran ( $PK_{uc}$ ) dicari. *Throughput* (PT), *duty cycle* ( $C_{yl}$ ), *interference ratio* ( $f_o$ ) dicari, lalu parameter diubah-ubah hingga diperoleh nilai *output* PT,  $C_{yl}$ , dan  $f_o$  yang tertinggi.

**Algorithm 3 : PRMA, MUF-PE Parameters Setting**Input :  $Z, D, P_{det}, H, U, v, t, S_{CB}, S_d, S_p, S_{tv}, V_{ud}, V_{em}, P_{SC}, S_v, S_{nk}, B_{(r)}, M_K, D_F, P_{ts}, P_{fs}, P_{em}, P_{ud}$ .**Parameters setup****start**

$$P_{ud} = \frac{V_{em}}{V_{ud} + V_{em}} \quad P_{em} = 1 - P_{ud}$$

**for each** parameters configuration **do**execute  $P_{ud}$  using equation (1)execute  $P_{em}$  using equation (2)**end****for each** parameters sensing decision **do**

$$(D_{Sr}) = \begin{cases} \text{empty} & \rightarrow E_{KU} < \alpha \\ \text{(em)} & \\ \text{used} & \\ \text{(ud)} & \rightarrow E_{KU} > \alpha \end{cases}$$

**end****for each** Signal Detection **do**

$$P_{ts} = P_{det} \{E_1 > \alpha | P_{ud}\} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\alpha - 2m(h+1)}{\sqrt{4m(2h+1)}} \right)$$

$$P_{fs} = P_{det} \{E_1 > \alpha | P_{em}\} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\alpha - 2m}{\sqrt{4m}} \right)$$

**end****for each** Canal Movement **do**

$$PK_{uc} = P_{em} \cdot P_{fs} + P_{ts} \cdot P_{ud}$$

$$PK_{cu} = P_{ud} (1 - P_{ts}) + P_{em} (1 - P_{fs})$$

**end****end****start** Throughput analysis

$$PT_{PRMA} = (D - N) + \left( \frac{B_{(r)} \cdot H}{B_{(r)} + M_K + Z} \right) \cdot Z$$

**for each** **do**execute  $B_{(r)}$  using equation (9)execute  $M_K$  using equation (10)**end****for each** parameters **do**

$$\text{Throughput (PT)} = \frac{PT_{PRMA}}{S_{CB} \cdot M_K} (S_{CB} - S_p - S_{tv}) \cdot S_d^2$$

**end****end****start** Duty cycle analysis**for each** parameters transmission time **do**

$$C_{yl} = \frac{2 \cdot S_{nk}}{S_{CB}^2 \cdot D_F \cdot Z} \left( (Z \cdot S_p + M_K D_F) + \left( (Z - D) D_F + (D - 1) D_F \right)^2 \right) - (S_{nk} D_F)^2$$

**end****end****start** Interference ratio analysis**for each** transmission disturbance **do**

$$f_o = 2P_w P_{ud} + \frac{P_{em} (1 - P_{fs})}{P_{ud}} + e^{-vt} \frac{(P_{fs} - P_{ts})}{P_w} + P_{fs} P_{ts}$$

**end****end**output : PT,  $C_{yl}$ ,  $f_o$ 

Algorithm 4 memperlihatkan *pseudocode* optimasi MUF-PE PRMA. Parameter set  $S', S_d^*, S_p^*, D_F^*$  diatur maksimal,

kemudian nilai  $S'$  dicari menggunakan (16). Nilai optimasi *throughput* ( $OPT$ ), *duty cycle* ( $OCyl$ ), *interference ratio* ( $Ofo$ ) dicari lalu nilai parameter maksimal dimasukkan ke rumus perhitungan. Nilai parameter diubah-ubah hingga diperoleh nilai optimasi maksimal penurunan minimal setiap bertambahnya PKM.

---

Algoritme 4 : *MUF-PE Optimization Transmission Procedure*

---

Input :  $Z, D, P_{det}, H, U, v, t, S_{CB}, S_d, S_p, S_{tv}, V_{ud}, V_{em}, P_{SC}, S_v, S_{nk}, B(r), M_K, D_F, P_{ts}, P_{fs}, P_{em}, P_{ud}$ .

---

**Optimization Procedure**

start *Throughput optimization*

set  $S', S_d^*, S_p^*, D_F^*$

for each do

set and use  $S', S_d^*, S_p^*, D_F^*$  as a parameter optimization

execute  $S'$ , using equation (16)

end

for each parameters do

$$OPT = \frac{PT_{PRMA} \cdot PK_{cu} \cdot D^2}{S_{CB} \cdot S_{nk}} (S_{CB} \cdot D_F + S_d^* + Z^2 \cdot S_{nk} - 2 \cdot S')$$

$$S' = S_p + S_{tv} + S_{nk}$$

end

end

start *Duty cycle optimization*

for each parameters transmission time do

$$OC_{y1} = \frac{D}{Z \cdot U \cdot S_{CB}} (Z \cdot S_p^* + M_K D_F + (Z - D) D_F + (D - 1) D_F - S_{nk} D_F)$$

end

end

start *Interference ratio optimization*

for each transmission disturbance do

$$Ofo = \left( P_{em} \times e^{-vt} \frac{(P_{fs} \times P_{ts})}{P_{ud}} \right) - P_w$$

end

end

---

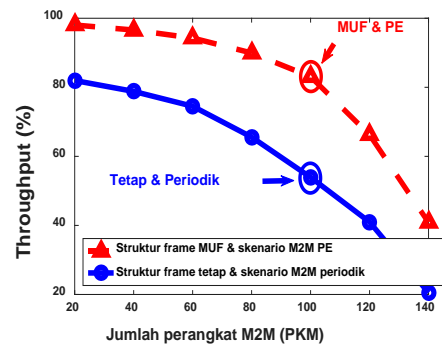
output :  $OPT, OC_{yl}, Ofo$

---

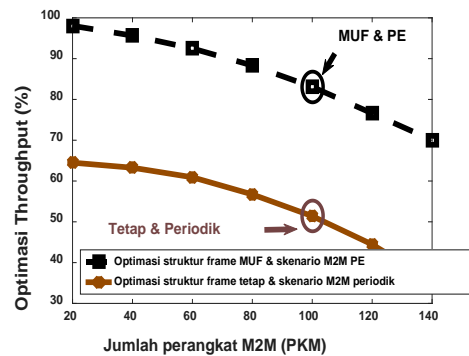
Gbr. 11 memperlihatkan *throughput* model lain sebesar 81-21%. *Throughput* ( $\theta$ ) diperoleh dari hasil pemilihan *slot* secara bebas, sehingga waktu pencarian *slot* berkurang, yang memengaruhi nilai *channel switching overhead* ( $S_{tv}$ ), Semakin rendah  $S_{tv}$ , semakin tinggi  $\theta$ . *Throughput* ( $PT$ ) MUF dan PE, yakni sebesar 99-41%, diperoleh dengan cara meningkatkan jumlah *reservation cycle* ( $Z$ ) dan pengiriman sukses ( $H$ ), sehingga sebagian besar *slot* dapat ditempati, yang memengaruhi  $PT$ . Semakin besar  $Z$  dan  $H$ , semakin besar  $PT$ .

Gbr. 12 memperlihatkan hasil optimasi *throughput* model lain ( $\theta^*$ ) sebesar 66-35%, yang diperoleh dengan cara meningkatkan jumlah *slot* yang dapat ditempati ( $N$ ). Semakin besar  $N$ , semakin tinggi nilai  $\theta^*$ . Optimasi *throughput* MUF dan PE ( $OPT$ ), sebesar 99-70%, diperoleh dengan cara meningkatkan jumlah pengiriman sukses ( $H$ ) dan dengan membagi waktu reservasi ( $S'$ ) sesuai jumlah PKM yang berkompetisi ( $U$ ).

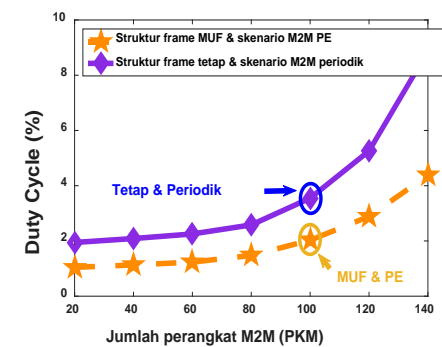
Gbr. 13 memperlihatkan *duty cycle* model lain, yakni sebesar 2-9%. Hasil diperoleh dari pengurangan waktu pertukaran data,



Gbr. 11 Hasil simulasi *throughput*.



Gbr. 12 Hasil simulasi optimasi *throughput*.

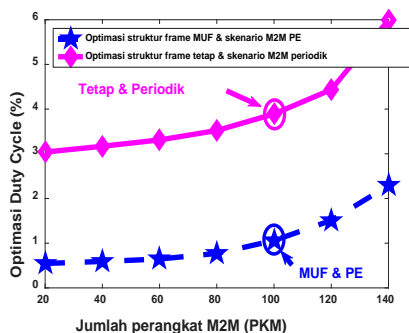


Gbr. 13 Hasil simulasi *duty cycle*.

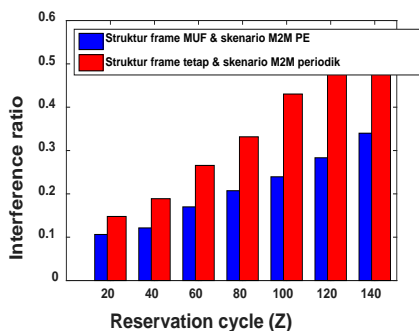
sehingga dapat mengurangi *duty cycle*, tetapi  $Cyl$  tetap meningkat sesuai jumlah PKM. *Duty cycle* dari hasil model MUF dan PE adalah sebesar 1-4,4%. Hasil diperoleh dengan cara menurunkan durasi *frame* ( $D_F$ ) dan *reservation cycle* ( $Z$ ), serta peluang kontestasi PKM ( $S_{nk}$ ), sehingga  $Cyl$  menurun.

Gbr. 14 memperlihatkan hasil simulasi optimasi *duty cycle* model lain, sebesar 3-6%. Hasil didapatkan dari pembatasan waktu deteksi saluran maksimal ( $S_d^*$ ) dan *channel switching overhead* ( $T_{sw}$ ), sehingga *duty cycle* menurun, tetapi akan naik ketika jumlah PKM bertambah, karena *reservation cycle* ( $X^*$ ) meningkat. Hasil simulasi optimasi *duty cycle* MUF dan PE, sebesar 0,5-2,2%, diperoleh dari hasil menurunkan jumlah seluruh pertukaran data sampai berhasil ( $M_K$ ), *preamble* dibagi dengan jumlah PKM ( $S_p^*$ ), dan durasi *frame* dibagi dengan jumlah PKM ( $D_F^*$ ), sehingga diperoleh nilai *duty cycle* tetap rendah walaupun jumlah PKM yang berkompetisi bertambah.

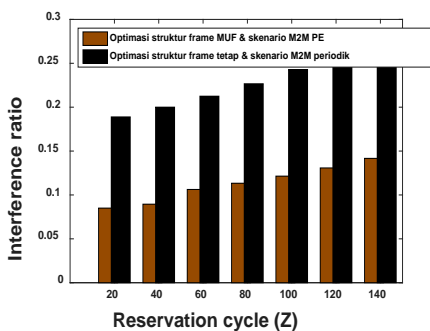




Gbr. 14 Hasil simulasi optimasi *duty cycle*.



Gbr. 15 Hasil simulasi *interference ratio*.



Gbr. 16 Hasil simulasi optimasi *interference ratio*.

Gbr. 15 memperlihatkan hasil simulasi *interference ratio* model lain, yakni 15-52%, yang didapat dari penempatan *slot* secara bebas, sehingga waktu pencarian berkurang, secara otomatis mengurangi peluang kepadatan saluran ( $P_b$ ) dan peluang kesalahan deteksi saluran ( $P_f$ ), sehingga intensitas gangguan antar PKM (PS) ataupun PS dengan PP juga berkurang. Maka, nilai  $f_o$  menurun. Hasil simulasi *interference ratio* MUF dan PE, sebesar 10-33%, diperoleh dari peningkatan pengiriman sukses dan ketepatan PKM dalam menempati *slot* dari pemberian *grade*, sehingga tidak ada  $f_o$  yang berarti. Nilai  $f_o$  hanya berasal dari *noise* sumber aktivitas PS dan PP.

Gbr. 16 memperlihatkan hasil simulasi optimasi *interference ratio* ( $f_o$ ) model lain, sebesar 19-28%, yang diperoleh dari peningkatan peluang besarnya *slot* yang berhasil ditempati ( $P_i$ ) dan peluang keberhasilan deteksi saluran ( $P_d$ ). Hasil simulasi optimasi  $f_o$  MUF dan PE, sebesar 8-14%, diperoleh dari hasil pemberian keutamaan pada data sangat penting yang secara otomatis meningkatkan probabilitas saluran utama dihuni ( $P_{ud}$ ) dan mengurangi probabilitas *false signal* ( $P_{fs}$ ).

TABEL V  
ANALISIS UKURAN EFISIENSI

Ukuran efisiensi	Model lain	Model diusulkan	Simulasi
<i>Throughput</i>	81-21%	99-41%	99-41%
<i>Duty Cycle</i>	2-9%	1-4,4%	1-4,4%
<i>Interference Ratio</i>	15-52%	10-33%	10-33%

TABEL VI  
ANALISIS UKURAN OPTIMASI EFISIENSI

Optimasi efisiensi	Model lain	Model diusulkan	Simulasi
<i>Throughput</i>	66-35%	99-70%	99-70%
<i>Duty Cycle</i>	3-6%	0,5-2,2%	0,5-2,2%
<i>Interference Ratio</i>	19-28%	8-14%	8-14%

TABEL VII  
ANALISIS PERBANDINGAN UKURAN EFISIENSI

Ukuran efisiensi	Model lain	Optimasi Model lain	Model diusulkan	Optimasi Model diusulkan
<i>Throughput</i>	81-21%	66-35%	99-41%	99-70%
<i>Duty Cycle</i>	2-9%	3-6%	1-4,4%	0,5-2,2%
<i>Interference Ratio</i>	15-52%	19-28%	10-33%	8-14%

TABEL VIII  
ANALISIS PERBAIKAN YANG DIHASILKAN

Perbaikan	<i>Throughput</i>	<i>Duty cycle</i>	<i>Interference ratio</i>
Pemberian <i>grade</i> serta keutamaan	99-41%	1-4,4%	10-33%
Pembagian waktu reservasi	99-70%	0,5-2,2%	8-14%

Tabel V memperlihatkan *throughput* model lain lebih rendah dari pada model yang diusulkan, sedangkan *duty cycle* dan *interference ratio* model lain lebih tinggi dari model yang diusulkan. Hal tersebut terjadi karena pada model lain pemilihan *slot* dilakukan secara bebas, yang memungkinkan pemilihan *slot* yang sama, sehingga tabrakan secara otomatis mengurangi reservasi sukses dan meningkatkan siklus reservasi. Akibatnya, *throughput* menurun, sedangkan *duty cycle* dan *interference ratio* meningkat.

Tabel VI memperlihatkan bahwa optimasi *throughput* model lain lebih rendah dari pada model yang diusulkan. Optimasi *duty cycle* dan *interference ratio* model lain lebih tinggi daripada model yang diusulkan. Hal tersebut terjadi karena walaupun telah dioptimasi dengan meningkatkan frekuensi penempatan *slot*, tetapi karena masih ada tabrakan, nilai optimasi tidak pernah melebihi nilai optimasi model yang diusulkan, sehingga nilainya tidak maksimal.

Tabel VII memperlihatkan perbandingan ukuran efisiensi model lain dengan model yang diusulkan. Nilai *throughput* model lain tidak setinggi model yang diusulkan, baik yang sudah maupun yang belum dioptimasi. Hal ini terjadi karena pada model lain masih terjadi tabrakan, walaupun jumlah reservasi sukses berhasil ditingkatkan. Sedangkan pada model yang diusulkan, dihasilkan nilai *throughput* maksimal, karena tidak terjadi tabrakan dan jumlah reservasi sukses serta peluang *slot* dapat ditempati berhasil ditingkatkan, sehingga nilai *throughput* berbeda signifikan.

Tabel VIII memperlihatkan bahwa model yang diusulkan MUF dan PE menghasilkan *throughput* yang lebih tinggi serta *duty cycle* dan *interference ratio* yang lebih rendah. Namun, hasil tersebut masih dapat ditingkatkan hingga maksimal dengan melakukan optimasi, sehingga tidak terjadi penurunan nilai *throughput* dan tidak terjadi kenaikan yang berarti pada *duty cycle* serta *interference ratio* ketika perangkat bertambah, yaitu dengan membagi waktu reservasi sesuai jumlah PKM.

## V. KESIMPULAN

Makalah ini mengajukan usulan model susunan *frame* MUF dan skema PE pada komunikasi kognitif jaringan kapiler. Pada skema yang diusulkan, data dan *slot* diberi *grade* untuk mencegah penempatan *slot* yang sama agar tidak terjadi tabrakan serta pengulangan yang memerlukan energi lebih banyak. Data diberi keutamaan sesuai kepentingan dan urgensinya, sehingga komunikasi dapat berjalan efektif dan efisien, diindikasikan dengan *throughput* (*PT*) yang maksimal, *duty cycle* (*Cyl*) serta *interference ratio* (*fo*) yang minimal. Skema optimasi digunakan untuk menjaga agar nilai *PT* tidak turun terlalu rendah serta *Cyl* dan *fo* tidak naik terlalu tinggi saat PKM bertambah. Optimasi dilakukan menggunakan mekanisme pembagian waktu reservasi serta meminimalan waktu tunggu reservasi sejumlah PKM yang berkompetisi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa MUF dan PE menaikkan *PT* serta menurunkan *Cyl* dan *fo*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa mekanisme pembagian waktu reservasi (*S'*) dan meminimalan waktu tunggu reservasi (*D<sub>r</sub>*) dapat mengoptimasi peningkatan *PT*, penurunan *Cyl* dan *fo* saat PKM bertambah.

## REFERENSI

- [1] Z. Yang, S. Ping, A. Aijaz, dan A.-H. Aghvami, "A Global Optimization-Based Routing Protocol for Cognitive-Radio-Enabled Smart Grid AMI Networks," *IEEE Syst. J.*, Vol. 12, No. 1, hal. 1015–1023, 2016.
- [2] B. Yang, B. Li, Z. Yan, dan M. Yang, "A Channel Reservation Based Multi-Channel MAC Protocol with Serial Cooperation for the Next Generation WLAN," *IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, 2016, hal. 1-6.
- [3] W. Saad, S.A. El-feshawy, M. Shokair, dan M.I. Dessouky, "Optimised Approach Based on Hybrid MAC Protocol for M2M Networks," *IET Networks Res.*, Vol. 7, No. 6, hal. 393–397, 2018.
- [4] S. Chen, "Energy Group based Random Access Method for M2M Communications," *IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, 2018, hal 1-5.
- [5] A.D. Shoaie, M. Derakhshani, dan T. Le-Ngoc, "Reconfigurable and Traffic-Aware MAC Design for Virtualized Wireless Networks via Reinforcement Learning," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 67, No. 8, hal. 5490–5505, 2019.
- [6] F.M. Awuor dan C. Wang, "Massive Machine Type Communication in Cellular System: A Distributed Queue Approach," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016, hal 1-7.
- [7] S. Bayhan, L. Zheng, J. Chen, M.D. Francesco, J. Kangasharju, dan M. Chiang, "Improving Cellular Capacity with White Space Offloading," *15th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, 2017, hal 1-8.
- [8] A. Rajandekar dan B. Sikdar, "A Survey of MAC Layer Issues and Protocols for Machine-to-Machine Communications," *IEEE Internet Things J.*, Vol. 2, No. 2, hal. 175–186, 2015.
- [9] V. Casares-giner dan J. Martinez-bauset, "Performance Evaluation of Framed Slotted ALOHA with Reservation Packets for M2M Networks," *IEEE 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, 2017, hal. 18–24.
- [10] D. Mazzer, "Low-Cost Embedded Cooperative Cognitive Radio for Internet of Things," *Iberchip* 2016, hal. 1–4.
- [11] C. Anton-Haro dan D. Mischa, *Machine-to-Machine Communications: Architecture, Performance and Applications*, Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2015.
- [12] C. Pereira dan A. Aguiar, "Towards Efficient Mobile M2M Communications: Survey and Open Challenges," *Sensors* 2014, Vol. 14, hal. 19582–19608, 2014.
- [13] Z. Yang, S. Ping, H. Sun, dan A.-H. Aghvami, "CRB-RPL: A Receiver-based Routing Protocol for Communications in Cognitive Radio Enabled Smart Grid," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 66, No. 7, hal. 5985–5994, 2017.
- [14] S. Ping, A. Aijaz, O. Holland, dan A. Aghvami, "SACRP: A Spectrum Aggregation-Based Cooperative Routing Protocol for Cognitive Radio Ad-Hoc Networks," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 63, No. 6, hal. 2015–2030, 2015.
- [15] A. Zanella, A. Biral, dan M. Zorzi, "Asymptotic Throughput Analysis of Massive M2M Access," *Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, 2015, hal. 1-6.
- [16] A. Aijaz dan A.H. Aghvami, "Cognitive Machine-to-Machine Communications for Internet-of-Things: A Protocol Stack Perspective," *IEEE Internet Things J.*, Vol. 2, No. 2, hal. 103–112, 2015.
- [17] N. Li, C. Cao, dan C. Wang, "Dynamic Resource Allocation and Access Class Barring Scheme for Delay-Sensitive Devices in Machine to Machine (M2M) Communications," *Sensors (Switzerland)*, Vol. 17, No. 6, hal. 1–20, 2017.
- [18] J. Wan, "Machine-to-Machine Communications: Architectures, Standards and Applications," *KSII Trans. Internet Inf. Syst.*, Vol. 6, No. 2, hal. 480–497, 2015.
- [19] S.A. Mahmud, F. Khan, M. Ali, G.M. Khan, dan F.Z. Yousaf, "Fairness Evaluation of Scheduling Algorithms for Dense M2M Implementations," *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 2014, hal. 134–139.
- [20] S. Tzeng, Y. Lin, dan L. Wei, "A Dynamic Permission Probability Control for Packet Reservation Multiple Access in Cognitive Machine-to-Machine Networks," *International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, 2018, hal. 1–5.
- [21] K. Ashrafuzzaman, "Efficient and Agile Carrier Sense Multiple Access in Capillary Machine-to-Machine Communication Networks," *IEEE ACCESS*, Vol. 6, hal. 4916–4932, 2018.
- [22] X. Zhu, N. Zhang, G. Kang, Y. Zhang, dan S. Zhang, "Realization of a New Random Access Scheme for Resource Efficiency in M2M Communications," *19th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC) Realization*, 2016, hal. 1–4.
- [23] W. Ejaz dan M. Ibnkahla, "Machine-to-Machine Communications in Cognitive Cellular Systems," *IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, 2015, hal. 1–5.
- [24] A. Aijaz dan A.H. Aghvami, "PRMA-Based Cognitive Machine-to-Machine Communications in Smart Grid Networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 64, No. 8, hal. 3608–3623, 2015.
- [25] P. Kumar, R. Verma, A. Prakash, dan A. Agrawal, "Machine-to-Machine (M2M) Communications: A Survey Journal of Network and Computer Applications Machine-to-Machine (M2M) Communications: A Survey," *J. Netw. Comput. Appl.*, Vol. 66, hal. 83–105, 2016.
- [26] M. Laner, N. Nikaein, P. Svoboda, M. Popovic, D. Drajić, dan S. Krco, "Traffic Models for Machine-to-Machine (M2M) Communications: Types and Applications," *Mach. Commun.*, hal. 1–37, 2015.
- [27] C. Kalalas dan J. Alonso-zarate, "Efficient Cell Planning for Reliable Support of Event-Driven Machine-Type Traffic in LTE," *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017, hal. 1–7.
- [28] C. Kalalas, L. Ning, R. Zhang, dan Y. Wu, "Techno-Economic Study on Capillary Networks and Cellular Technologies for Machine-to-Machine Communications," KTH Royal Institute of Technology, IK2511 Proj. Wirel. Networks Techno-economic Report, hal. 1–37, 2014.
- [29] A. Aijaz dan A. H. Aghvami, "On the Use and Optimization of PRMA-based Cognitive M2M Communications," *GLOBECOM - IEEE Glob. Telecommun. Conf.*, 2013, hal. 1265–1271.