



BRIN
BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

OPTIMASI PENGINDERAAN SPEKTRUM PADA RADIO KOGNITIF UNTUK MENGATASI KELANGKAAN FREKUENSI DALAM SISTEM KOMUNIKASI NIRKABEL

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
KEPAKARAN TRANSMISI TELEKOMUNIKASI**



**OLEH:
NASRULLAH ARMI**

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

Buku ini tidak diperjualbelikan.

**OPTIMASI PENGINDERAAN SPEKTRUM PADA
RADIO KOGNITIF UNTUK MENGATASI
KELANGKAAN FREKUENSI DALAM SISTEM
KOMUNIKASI NIRKABEL**

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2024 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Buku ini tidak diperjualbelikan.



OPTIMASI PENGINDERAAN SPEKTRUM PADA RADIO KOGNITIF UNTUK MENGATASI KELANGKAAN FREKUENSI DALAM SISTEM KOMUNIKASI NIRKABEL

ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET KEPAKARAN TRANSMISI TELEKOMUNIKASI

**OLEH:
NASRULLAH ARMI**

Reviewer:

Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani
Prof. Ir. Wimpie Agoeng Nugroho Aspar, MSCE., Ph.D.
Prof. Dr. M. Rokhis Komarudin, S.Si., M.Si.
Prof. Asif Awaludin, M.T.
Prof. Dr. Aloysius Adya Pramudita, S.T, M.T.

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2024 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Optimasi Penginderaan Spektrum Pada Radio Kognitif Untuk Mengatasi Kelangkaan Frekuensi Dalam Sistem Komunikasi Nirkabel /Nasrullah Armi. Jakarta – BRIN, 2024

xii + 98 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-602-6303-60-8 (*e-book*)

- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| 1. Radio Kognitif | 2. Spektrum Dinamis |
| 3. Spektrum Statis | 4. Markov Decision Process |
| 5. Penginderaan spektrum | 6. Penginderaan Optimal |
| 7. Penginderaan Greedy | 8. Penginderaan Random |

535.8

Copy editor : Muliyani
Proofreader : Dyah Arum Kusumastuti
Penata Isi : Dyah Arum Kusumastuti
Desainer Sampul : Dyah Arum Kusumastuti

Edisi pertama : November 2024



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

 PenerbitBRIN
 @Penerbit_BRIN
 @penerbit.brin

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR.....	vii
BIODATA RINGKAS	ix
PRAKATA PENGUKUHAN	xi
I. PENDAHULUAN	1
II. PERKEMBANGAN TEKNOLOGI PENGINDERAAN SPEKTRUM PADA RADIO KOGNITIF	7
A. Teknologi Akses Spektrum Dinamis.....	7
B. Perkembangan Teknologi Penginderaan Spektrum	10
C. Tantangan Pengembangan Teknik Penginderaan Spektrum	14
III. OPTIMASI PENGINDERAAN SPEKTRUM DENGAN MENGUNAKAN ALGORITMA PEMODELAN POMDP.....	17
A. Penginderaan Spektrum Pada Lapisan Fisik	19
B. Penginderaan Spektrum Pada Lapisan MAC	25
IV. RELEVANSI, IMPLIKASI, DAN REKOMENDASI PENGINDERAAN SPEKTRUM PADA RADIO KOGNITIF.....	43
A. Pemanfaatan Penginderaan Spektrum Pada Sistem Komunikasi Modern.....	44
B. Kolaborasi Riset.....	47
C. Rekomendasi	49
V. KESIMPULAN	51
VI. PENUTUP	53
UCAPAN TERIMA KASIH	55
DAFTAR PUSTAKA.....	59
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	69
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	87

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Riset yang dilakukan terhadap penginderaan spektrum frekuensi nirkabel (Akyildiz et al., 2006) (Yucek & Arslan, 2009).....	18
Gambar 3.2	Deteksi energi pada sistem radio kognitif.....	20
Gambar 3.3	ROC <i>Matched Filter Detector</i> dengan variasi nilai SNR ...	21
Gambar 3.4	Perbandingan metode penginderaan spektrum.....	22
Gambar 3.5	Hasil Penginderaan Sinyal dengan Daya Rendah Menggunakan Nilai Eigen.....	24
Gambar 3.6	Model Penginderaan Spektrum Berbasis Algoritma Markov untuk Trafik Jaringan Pengguna Primer	27
Gambar 3.7	Interval Waktu Penginderaan dan Transmisi Data pada Jaringan Radio Kognitif	28
Gambar 3.8	Contoh diagram kerjasama antara 2 pengguna sekunder	29
Gambar 3.9	Aktifitas Pengguna pada Kanal Spektrum Frekuensi Menggunakan Model POMDP	30
Gambar 3.10	Struktur Slot Komunikasi pada Radio Kognitif (Cognitive MAC)	31
Gambar 3.11	Diagram Kondisi untuk Jumlah Kanal $N = 2$ pada Model Markov untuk Akses Spektrum Dinamis.....	32
Gambar 3.12	Akses Spektrum Dinamis dengan Menggunakan Algoritma Pemodelan POMDP	33
Gambar 3.13	Jumlah Kondisi dan Probabilitas Transisi ketika $N = 5$ Menggunakan Teknik Penginderaan Optimal.....	35
Gambar 3.14	Perbandingan Teknik Deteksi Optimal, Sub-Optimal <i>Greedy</i> , dan Random Berbasis Algoritma Model POMDP	36
Gambar 3.15	Kinerja Paket Data Terkirim (<i>Throughput</i>) sebagai Fungsi Jumlah Slot Komunikasi dengan Menggunakan Pendekatan Algoritma Sub-Optimal <i>Greedy</i>	38

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Gambar 3.16 Perbandingan Kinerja Pengindraan Spektrum Frekuensi
dengan Menggunakan Model POMDP40

Gambar 3.17 Perbandingan Teknik Sentralisasi dan Desentralisasi.....41

Gambar 3.18 Perbandingan Teknik Sentralisasi dan Desentralisasi dengan
Variasi Nilai SNR41

BIODATA RINGKAS



Nasrullah Armi, lahir di Serang, pada tanggal 15 Desember 1973 adalah anak ke-3 dari Bapak Bayumi Thohir dan Ibu Arini. Menikah dengan Mia Murtikasari dan dikaruniai 2 orang anak, yaitu Muhammad Rafy Nasrullah dan Haifa Varisha Fitri Nasrullah.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 2/M Tahun 2023 tanggal 9 Januari 2023 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama terhitung mulai tanggal 9 Januari 2023.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 246/I/HK/2024, tanggal 8 November 2024 yang bersangkutan melakukan orasi pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar YPWKS 1 Cilegon, tahun 1986, Sekolah Menengah Pertama Negeri 3 (Pulomerak) Cilegon, tahun 1989, dan Sekolah Menengah Atas Negeri 8 Bandung, tahun 1992. Memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Institut Teknologi Nasional (ITENAS) Bandung tahun 1997, gelar Magister Master of Engineering dari Toyohashi University of Technology, Japan tahun 2004, dan gelar Doktor bidang Electrical & Electronic Engineering dari Universiti Teknologi PETRONAS, Malaysia tahun 2013

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain: Workshop on Wireless Communication and Security di Bandung (2006), R3370 vector network analyzer di Singapore (2007), workshop biosensors dan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

biophotonics di Taiwan (2007), metodologi riset di Malaysia (2009) dan Phased Array Radar & Pulse Compression Radar di Bandung (2015).

Pernah menduduki jabatan struktural sebagai Kepala Sub-bidang Sarana Elektronika (tahun 2004 - 2006), Kepala Bidang Sarana Penelitian (tahun 2007 - 2009), dan Kepala Pusat Riset Telekomunikasi (tahun 2022 - Sekarang).

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Peneliti Ahli Muda golongan IIIc tahun 2008, Peneliti Ahli Madya golongan IVa tahun 2015, dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama golongan IVc bidang Komunikasi Nirkabel tahun 2023

Menghasilkan 87 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk jurnal dan prosiding. Sebanyak 74 KTI ditulis dalam bahasa Inggris, 1 KTI dalam bahasa Jepang, dan 12 KTI ditulis dalam bahasa Indonesia.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti pada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), pembimbing skripsi (S-1) pada Universitas Telkom dan Insitut Teknologi Nasional; pembimbing disertasi (S-3) pada Institut Teknologi Bandung (ITB) dan program PhD Degree by Research di Université Polytechnique Hauts-de-France, Prancis; serta penguji Thesis (S-2) pada Universitas Indonesia.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah sebagai anggota seperti IEICE dan IEEE Japan (2002-2024), IEEE Malaysia (2010-2013), IEEE Indonesia (2018-2020), dan Perhimpunan Periset Indonesia (2018 – Sekarang).

Menerima tanda penghargaan Satyalancana Karya Satya X Tahun (tahun 2008), XX Tahun (tahun 2018) dari Presiden RI.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal (tanggal/bulan/tahun orasi dilaksanakan) menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

“OPTIMASI PENGINDERAAN SPEKTRUM PADA RADIO KOGNITIF UNTUK MENGATASI KELANGKAAN FREKUENSI DALAM SISTEM KOMUNIKASI NIRKABEL”

Pada Orasi ini, akan disampaikan pengembangan teknik penginderaan spektrum pada radio kognitif yang diproyeksikan sebagai solusi terhadap kelangkaan spektrum akibat meningkatnya jumlah pengguna komunikasi nirkabel dan masifnya pertumbuhan perangkat yang terkoneksi dengan data dan internet. Teknik penginderaan yang dikembangkan tidak hanya

Buku ini tidak diperjualbelikan.

berfokus pada metode deteksi, namun juga mempertimbangkan strategi akses untuk meningkatkan kinerja dalam sistem komunikasi.

Hasil yang diperoleh dari pengembangan ini tidak hanya meningkatkan akurasi deteksi dan efisiensi waktu penginderaan, namun juga meningkatkan kinerja komunikasi berupa peningkatan jumlah data yang dikirimkan dalam setiap slot komunikasi. Akurasi data, efisiensi waktu, dan kinerja transmisi data adalah beberapa aspek penting yang harus diperhatikan dalam pengembangan penginderaan spektrum yang akan digunakan ketika terjadi perubahan regulasi spektrum kearah akses spektrum dinamis. Akses spektrum dinamis mampu mengoptimalkan penggunaan spektrum frekuensi yang merupakan sumber daya terbatas namun sangat penting untuk komunikasi nirkabel. Hasil penginderaan spektrum yang efisien dan handal berimplikasi pada konektivitas di masa depan yang akan semakin handal, fleksibel, dan efisien, sehingga mampu memenuhi permintaan data yang semakin tinggi di masyarakat yang terus terkoneksi.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel didunia pada umumnya dan khususnya di Indonesia mengalami lonjakan yang sangat signifikan pada awal tahun 2000-an, ketika teknologi komunikasi radio menjadi populer. Pembangunan infrastruktur telekomunikasi meningkat sangat signifikan untuk memberikan pelayanan komunikasi bagi masyarakat baik jaringan telepon tetap maupun telepon selular.

Penetrasi telepon selular semakin meningkat memasuki awal tahun 2000. Beberapa operator dan provider telepon selular mulai meningkatkan pembangunan infrastruktur jaringan untuk memperluas layanan komunikasi bagi masyarakat. Tidak hanya suara, namun diikuti dengan perkembangan layanan data untuk komunikasi. Layanan data berupa internet ini kemudian semakin luas penggunaannya sehingga semakin mudah memperoleh informasi dan komunikasi dalam lingkup global. (Haykin, 2005)

Pertumbuhan yang pesat akan jumlah perangkat nirkabel dan layanan nirkabel yang beragam seperti sistem komunikasi cerdas, *Internet of things* (IoT), dan layanan yang memanfaatkan teknologi data dan komunikasi lainnya, berimbas pada meningkatnya permintaan akan spektrum frekuensi yang lebih fleksibel dan efisien (Faulhaber, 2006). Kemudian juga memasuki era dimana masing-masing perangkat elektronik terhubung satu sama lain, maka semestinya perangkat nirkabel tersebut dapat terhubung diberbagai jenis jaringan dengan spektrum frekuensi yang berbeda tanpa perubahan dari sisi perangkat keras.

Jumlah pengguna perangkat nirkabel yang meningkat, diikuti dengan jenis-jenis layanan komunikasi data yang beragam dengan

fitur cerdas yang dibutuhkan masyarakat, membuat sumber daya spektrum frekuensi semakin langka. Padatnya pengguna disatu rentang frekuensi tertentu, namun minim pengguna di rentang frekuensi lainnya membuat penggunaan spektrum frekuensi menjadi tidak efisien. Untuk itu dibutuhkan sebuah teknologi akses spektrum yang dinamis, yang memungkinkan pengguna berpindah dari satu frekuensi tertentu ke rentang frekuensi lainnya tanpa perubahan dari sisi perangkat keras.

Kelangkaan spektrum ini juga disebabkan adanya regulasi yang kurang efektif dan efisien. Regulasi penggunaan spektrum frekuensi saat ini mengadopsi penggunaan dan akses spektrum tetap (*fixed spectrum access*). Regulasi ini hanya memungkinkan pengguna menggunakan rentang frekuensi tertentu secara tetap. Regulasi ini terbukti tidak efektif dan efisien (ITU, 2019).

Salah satu solusi terhadap permasalahan tersebut adalah dengan mengadopsi teknik akses spektrum dinamis (*Dynamic Spectrum Access–DSA*). Teknik DSA dirancang untuk mengatasi inefisiensi penggunaan spektrum frekuensi, terutama untuk sistem komunikasi nirkabel dan aplikasinya di masa depan, sehingga mampu adaptif dalam memanfaatkan sumber daya spektrum yang tersedia dengan cerdas, efektif, dan efisien (Song et al., 2012).

Pada tahun-tahun mendatang, akan semakin banyak aplikasi teknologi nirkabel yang memanfaatkan spektrum frekuensi, seperti berkembangnya teknologi *internet of things* (IoT) untuk aplikasi kota cerdas, industri cerdas, sistem pertanian cerdas, dan lain-lain . Teknologi IoT memungkinkan perangkat elektronika untuk mengirimkan data hasil penginderaan dan sensor ke stasiun monitor. Semakin meningkatnya pengguna IoT, tentu akan mempersempit ruang spektrum frekuensi. Sehingga akibatnya penggunaan di rentang spektrum frekuensi tertentu akan padat dan semakin langka.

Teknologi akses spektrum dinamis merupakan solusi terhadap kelangkaan spektrum (Sahoo & Souryal, 2014). Terdapat 2 metode dalam teknologi akses spektrum dinamis, yakni dibawah lapisan (*underlay*) dan diatas lapisan (*overlay*) (Baby & James, 2016). Metode *underlay* sering kita kenal dengan teknik komunikasi *ultra-wideband*. Pada teknik ini, pengguna komunikasi nirkabel dapat menempati spektrum frekuensi lebar dengan ketentuan bahwa daya transmisi berada dibawah batas yang sudah ditentukan sehingga tidak mengganggu pengguna komunikasi nirkabel lainnya. Sementara metode komunikasi *overlay*, pengguna dapat menggunakan daya transmisi melebihi nilai batas, namun dengan ketentuan bahwa spektrum frekuensi tidak digunakan oleh pengguna komunikasi nirkabel lainnya. Metode *overlay* ini sering dikenal dengan sistem radio kognitif (*cognitive radio*)

Pengguna teknologi nirkabel dengan kemampuan penginderaan spektrum akan mampu mengeksplorasi spektrum frekuensi dan melakukan akses ke spektrum lain yang tidak digunakan secara dinamis. Teknik ini akan meningkatkan efisiensi penggunaan spektrum serta mengatasi kepadatan dan kelangkaan spektrum frekuensi dimasa depan.

Teknologi radio kognitif dengan kemampuan penginderaan spektrum juga dapat diterapkan pada sistem komunikasi pedesaan (Liang et al., 2008). Daerah pedesaan seringkali mengalami kekurangan konektivitas karena tingginya biaya pembangunan dan pemeliharaan infrastruktur di daerah tersebut. Solusi komunikasi *fixed broadband* membutuhkan pemasangan kabel dan infrastruktur yang ekstensif, yang seringkali tidak dapat dilakukan di daerah terpencil atau tidak berpenduduk padat. Di sisi lain, radio kognitif, dengan kemampuannya beradaptasi terhadap lingkungan dan mengalokasikan sumber

daya spektrum secara dinamis, dapat memberikan solusi hemat biaya untuk bidang-bidang ini.

Selain itu, permasalahan kelangkaan spektrum, yang merupakan tantangan besar di wilayah perkotaan karena tingginya kebutuhan akan konektivitas, tidak terlalu menjadi permasalahan di wilayah pedesaan. Semakin rendah kepadatan penduduk di wilayah tersebut berarti semakin banyak frekuensi yang tidak terpakai yang dapat dimanfaatkan oleh teknologi radio kognitif. Hal ini menjadikan radio kognitif sebagai teknologi yang sangat sesuai untuk konektivitas pedesaan

Penginderaan spektrum (*spectrum sensing*) menjadi hal yang paling krusial dan penting dalam radio kognitif. Sebelum melakukan akses terhadap spektrum frekuensi yang diinginkan, sebuah perangkat radio kognitif (pengguna sekunder) terlebih dahulu melakukan penginderaan spektrum untuk menghindari terjadinya tabrakan (*collision*) dengan pengguna utama (*primary user*). Beberapa metode penginderaan spektrum dibahas dalam naskah orasi ini baik pada lapisan fisik (*physical layer*) maupun pada lapisan MAC (*MAC layer*). Prinsipnya bahwa penginderaan spektrum harus dilakukan dengan benar agar menghasilkan akurasi data spektrum kosong yang tinggi dengan efisien (waktu penginderaan, konsumsi daya, dan kompleksitas)

Metode *hard decision fusion* yang merupakan salah satu teknik penggabungan hasil penginderaan spektrum dari beberapa pengguna dalam sistem radio kognitif (penginderaan kooperatif) dijelaskan dengan detail, yakni dengan membandingkan kinerja dari 2 teknik penggabungan deteksi AND dan OR (Armi, N.M. Saad & Arshad, 2009). Pentingnya kolaborasi pengguna dalam penginderaan lubang spektrum (*spectrum holes*) untuk optimasi dan akurasi hasil sangat esensi dan krusial (Armi, Saad, Zuki, et al., 2010). Kemudian dilakukan kajian lanjutan terkait beberapa

metode penginderaan dengan sinyal dan kondisi lingkungan yang berbeda-beda seperti penginderaan spektrum dengan *signal to noise ratio* (SNR) rendah dengan kanal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) (Armi et al., 2016), deteksi sinyal *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) dengan mempertimbangkan gangguan (*noise*) (Armi, Chaeriah, Oktafiani, et al., 2017), kinerja throughput pada deteksi sinyal OFDM dengan referensi waktu penginderaan (Armi, Chaeriah, Suratman, et al., 2017), kajian alokasi daya pada deteksi sinyal OFDM (Wael, Armi, Miftahushudur, et al., 2017), penginderaan dengan teknik *Eigen Value* (Wael, Armi, & Rohman, 2017) dan sampling sub-Nyquist (Wael, Armi, Rohman, et al., 2017) dan kajian pemodelan dengan studi kasus pada sistem komunikasi maritim (Wael, Armi, Rohman, et al., 2017)

Namun penelitian yang dilakukan tersebut fokus pada lapisan fisik saja. Selanjutnya perlu dilakukan penelitian pada lapisan MAC (*Medium Access Control*) yang tidak hanya fokus pada penginderaan spektrum, tapi juga pada pengendalian terhadap strategi akses spektrum. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, dibutuhkan sebuah model algoritma/kerangka kerja teknik penginderaan yang menghasilkan data lubang spektrum yang akurat dengan strategi akses yang efisien.

Pengambilan keputusan *Markov Decision Process* (MDP) merupakan model matematis yang digunakan untuk membuat keputusan dalam lingkungan yang tidak pasti atau memiliki probabilitas tertentu. Teknik pengambilan keputusan ini umumnya digunakan pada bidang robotika, di mana robot perlu berinteraksi dengan lingkungan dinamis dan memutuskan langkah terbaik berdasarkan kondisi saat ini dan kemungkinan masa depan. Robot akan mendeteksi objek penghalang dan memutuskan mengambil jalan lain yang tidak ada penghalang. (Kaelbling et al., 1998)

Teknik pengambilan keputusan Markov ini diadopsi pada penginderaan spektrum. Namun tidak semua kanal spektrum yang diindera, hanya sebagian yang diamati berdasarkan kondisi terkini dari data spektrum, yang dikenal dengan algoritma pemodelan POMDP (*Partially Observable Markov Decision Process*) untuk memperoleh akurasi hasil penginderaan dan optimasi throughput (Armi, Saad, Yusoff, et al., 2010). Eksplorasi riset dengan menggunakan algoritma ini adalah penginderaan spektrum optimal dan sub-optimal (Armi, Saad, & Zuki, 2010), penginderaan kolaborasi dengan sistem desentralisasi (Armi, Yusoff, et al., 2015) yang merupakan model penginderaan dan akses dengan sistem *ad-hoc*.

Naskah orasi ini dibagi kedalam Enam Bab. Bab Pertama adalah Pendahuluan. Bab kedua membahas tentang perkembangan riset teknologi penginderaan spektrum frekuensi pada radio kognitif yang mendukung komunikasi nirkabel masa depan dalam mengatasi kelangkaan dan darurat spektrum frekuensi. Pada Bab ketiga akan dibahas hasil-hasil riset terkait teknik penginderaan spektrum baik pada lapisan fisik maupun MAC. Selanjutnya pada Bab keempat akan membahas masalah relevansi, implikasi, dan rekomendasi riset yang dilakukan pada bidang penginderaan spektrum. Bab kelima merupakan kesimpulan dan intisari dari bab-bab sebelumnya. Dan diakhiri pada Bab keenam yakni Penutup yang membahas isu-isu penting yang menjadi rekomendasi arah penelitian kedepan terkait penginderaan spektrum.

II. PERKEMBANGAN TEKNOLOGI PENGINDERAAN SPEKTRUM PADA RADIO KOGNITIF

Semakin meningkatnya pengguna komunikasi nirkabel dan berkembangnya aplikasi-aplikasi pengguna layanan teknologi nirkabel membuat spektrum frekuensi semakin padat dan menjadi langka. Sementara masih banyak spektrum frekuensi tertentu yang tidak digunakan dengan efisien. Dalam layanan teknologi nirkabel, terdapat variasi besar dalam penggunaan spektrum frekuensi dari waktu ke waktu dan lokasi ke lokasi. Beberapa daerah atau waktu memiliki penggunaan spektrum yang rendah sementara yang lain padat. Kondisi ini membuat penggunaan spektrum frekuensi jadi tidak efisien. Penggunaan spektrum frekuensi saat ini mengadopsi regulasi spektrum tetap (*fixed spectrum*). Perubahan regulasi akses spektrum tetap ke akses spektrum dinamis merupakan salah satu pilihan dan salah satu solusi dalam mengatasi permasalahan kelangkaan spektrum dan inefisiensi penggunaan spektrum dimasa yang akan datang. Penginderaan spektrum merupakan aspek penting dalam regulasi akses spektrum dinamis. Penginderaan spektrum harus dilakukan dengan cepat dan efisien tanpa mengurangi akurasi hasil-hasil penginderaan spektrum. Pada bab ini akan dibahas latar belakang munculnya solusi akses spektrum dinamis dan perkembangan teknik penginderaan spektrum yang menjadi fokus pada naskah orasi ini.

A. Teknologi Akses Spektrum Dinamis

Akses Spektrum Dinamis (*Dynamic Spectrum Access, DSA*) adalah konsep dalam teknologi komunikasi nirkabel yang

memungkinkan perangkat untuk secara dinamis mengakses dan menggunakan spektrum frekuensi radio yang tersedia. Tujuannya adalah untuk meningkatkan efisiensi penggunaan spektrum, mengatasi masalah kelangkaan spektrum, dan memungkinkan lebih banyak layanan nirkabel untuk beroperasi secara bersamaan tanpa interferensi yang berlebihan (Haykin, 2005).

Berdasarkan hierarki, teknologi akses spektrum dinamis dibagi menjadi 2, yakni lapisan bawah spektrum (*spectrum underlay*) yang sering dikenal dengan teknologi komunikasi bandwidth lebar (*ultra wideband - UWB*) dan lapisan atas spektrum (*overlay spectrum*) dan sering dikenal dengan teknologi radio kognitif. Pada komunikasi UWB, masing-masing pengguna layanan nirkabel dapat menggunakan spektrum frekuensi secara bersama-sama baik pengguna primer (*primary user/license user*) maupun pengguna sekunder (*secondary user/unlicense user*) dengan ketentuan bahwa daya transmisi pengguna kedua tidak melebihi dari batas nilai daya yang dipersyaratkan sehingga tidak mengganggu pengguna primer. Sementara pada radio kognitif, pengguna sekunder dapat menggunakan spektrum frekuensi dengan daya transmisi melebihi batas nilai daya yang dipersyaratkan, namun dengan ketentuan bahwa spektrum frekuensi tersebut tidak sedang digunakan oleh pengguna primer.

Konsep radio kognitif pertama kali diperkenalkan pada tahun 2000 (Mitola, 2000) dimana sebuah perangkat radio dapat berpikir dan belajar secara otomatis untuk mengoptimalkan penggunaan spektrum. Konsep ini terus berkembang dari tahun ke tahun dengan memanfaatkan teknologi radio yang didefinisikan oleh sebuah perangkat lunak (*software-defined radio*) dan kecerdasan buatan dalam pengelolaan spektrum frekuensi.

Pada tahun 2003, *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) membentuk *Cognitive Radio Working Group* di bawah IEEE 802.22 untuk mengeksplorasi dan mengembangkan standar terkait radio kognitif. Langkah ini menandai keseriusan dalam menerapkan konsep ini ke dalam standar industri (Cordeiro et al., 2005), seperti industri-industri yang memanfaatkan teknologi IoT dan jaringan sensor nirkabel (*wireless sensor network*) (Nurelmadina et al., 2021; Yin Mingjiaand Li, 2018)

Siklus kognitif memiliki 4 tugas yakni pengindraan spektrum (*spectrum sensing*), pengambilan keputusan spektrum (*spectrum decision*), mobilitas spektrum (*spectrum mobility*), dan penggunaan spektrum secara bersama-sama antara sesama pengguna sekunder atau antara pengguna primer dengan sekunder (*spectrum sharing*).

Penginderaan spektrum adalah proses di mana perangkat nirkabel, seperti perangkat radio kognitif atau perangkat nirkabel lainnya, mendeteksi dan memantau kondisi frekuensi radio pada suatu daerah spektrum tertentu. Tujuan dari penginderaan spektrum ini adalah untuk mengidentifikasi frekuensi yang tidak digunakan atau memiliki intensitas sinyal yang rendah, sehingga dapat diakses oleh perangkat lain untuk berkomunikasi tanpa mengganggu layanan yang sudah ada.

Penginderaan spektrum merupakan elemen utama dan kunci dalam akses spektrum dinamis, di mana perangkat radio memiliki kemampuan dalam mengamati lingkungan spektrum disekitarnya dan melakukan penginderaan sebelum melakukan akses terhadap spektrum frekuensi tertentu. Penginderaan spektrum dilakukan untuk mendukung penggunaan yang efisien dan memastikan bahwa frekuensi yang tersedia dapat dimanfaatkan secara optimal tanpa mengganggu pengguna

primer. Pengembangan teknologi penginderaan spektrum menjadi fokus pada naskah orasi ini.

B. Perkembangan Teknologi Penginderaan Spektrum

Teknik penginderaan spektrum frekuensi merupakan langkah krusial dalam radio kognitif karena akan menentukan langkah-langkah berikutnya. Akurasi data dan waktu merupakan hal penting yang harus dipertimbangkan pada teknik penginderaan. Penginderaan harus dilakukan dengan efisien dan kontinyu.

Ada beberapa metode dalam penginderaan spektrum seperti deteksi energi (*energy detector*), deteksi siklus sinyal (*cyclostationary detector*), dan deteksi menggunakan filter (*matched filter detector*). Menurut penelitian (Haykin, 2005), deteksi energi adalah metode paling umum karena tidak memerlukan pengetahuan spesifik tentang sinyal pengguna primer. Prinsip dari deteksi energi adalah mengukur tingkat energi sinyal pada suatu frekuensi untuk memastikan bahwa frekuensi tersebut tidak sedang digunakan. Keunggulan dari metode ini adalah sederhana dan efisien karena pendeteksi tidak membutuhkan informasi terkait karakter sinyal pengguna yang akan dideteksi. Namun metode ini juga memiliki kelemahan yakni rentan terhadap noise dan interferensi serta hasil deteksi tidak memberikan informasi tambahan tentang jenis modulasi atau sumber sinyal (Kim et al., 2010)

Detektor dengan menggunakan filter merupakan detektor yang sesuai dengan karakteristik sinyal yang diharapkan untuk meningkatkan perbandingan sinyal terhadap derau (SNR), sehingga memiliki kelebihan mampu mendeteksi sinyal meskipun dengan kehadiran derau yang sangat tinggi. Karena desain filter yang dibuat harus sesuai dengan karakter sinyal deteksi, maka detektor ini membutuhkan informasi terkait

karakter sinyal dan bentuk gelombang sinyal yang dideteksi (Dannana Sureshand Chapa, 2018). Detektor ini memiliki akurasi tinggi tetapi memerlukan biaya komputasi yang lebih besar (Yucek & Arslan, 2009).

Selanjutnya penggunaan detector berdasarkan siklus sinyal menunjukkan potensi besar untuk membedakan antara noise dan sinyal yang diinginkan karena teknik ini mengeksploitasi karakteristik periodik sinyal pengguna primer (Axell et al., 2012). Prinsip kerja dari detektor ini adalah dengan memanfaatkan karakteristik siklus waktu dari sinyal-sinyal yang dikirimkan pada beberapa sistem komunikasi. Keunggulan dari metode ini adalah lebih tangguh dan tahan terhadap gangguan noise dan interferensi sehingga cocok diterapkan pada lingkungan dengan tingkat interferensi tinggi. Metode penginderaan ini juga mampu memberikan informasi tambahan tentang jenis modulasi dan sumber sinyal disamping memiliki kelemahan yakni lebih kompleks dan memiliki waktu proses yang lebih lama dibandingkan dengan metode deteksi energi.

Penginderaan kooperatif (*cooperative sensing*) adalah pendekatan yang banyak diusulkan untuk meningkatkan akurasi penginderaan spektrum. Dalam pendekatan ini, beberapa perangkat berbagi informasi hasil penginderaan masing-masing pengguna untuk menghasilkan keputusan kolektif. Semakin banyak pengguna sekunder yang bekerja sama dalam penginderaan spektrum frekuensi, maka kinerja dan hasil deteksi yang diperoleh akan semakin baik.

Pada penginderaan kooperatif, masing-masing pengguna sekunder bekerjasama secara sentralisasi (*centralized*) dan desentralisasi (*decentralized*). Pada penginderaan sentralisasi, pengumpulan dan analisis informasi spektrum dilakukan secara terpusat. Kelebihan dari penginderaan sentralisasi ini adalah

kemampuan untuk membuat keputusan yang lebih cerdas dan terkoordinasi dalam pengelolaan spektrum. Namun, ada beberapa tantangan yang harus jadi pertimbangan, yakni latensi dalam mentransfer data ke pusat pengambilan keputusan dan kerentanan terhadap kegagalan jika terdapat masalah pada pusat pengambilan keputusan. Sistem ini juga memerlukan saluran komunikasi yang handal antara sensor-sensor terdistribusi dan pusat pengambilan keputusan.

Sementara pengindraan spektrum desentralisasi adalah pendekatan dalam pengelolaan spektrum nirkabel di mana proses deteksi, pengumpulan informasi, dan pengambilan keputusan dilakukan oleh perangkat secara individu atau dalam kelompok tanpa bergantung pada kontrol pusat.

Penginderaan kooperatif efektif dalam mengatasi masalah *shadowing* dan *fading* yang sering terjadi dalam penginderaan spektrum individual. Meskipun menjanjikan, penginderaan kooperatif juga menimbulkan tantangan, termasuk konsumsi energi yang lebih tinggi dan kebutuhan akan protokol keamanan untuk mencegah manipulasi data.

Penelitian terkait teknik penginderaan tidak hanya fokus pada pengembangan pada lapisan fisik (*physical layer*) saja seperti yang dijelaskan sebelumnya, tetapi berkembang kearah lapisan MAC (*MAC layer*). Penginderaan spektrum pada lapisan *Medium Access Control* (MAC) adalah komponen kunci dalam komunikasi nirkabel yang menggunakan konsep jaringan kognitif. Penginderaan ini memungkinkan perangkat sekunder untuk mendeteksi dan menggunakan spektrum kosong tanpa mengganggu pengguna primer. Integrasi penginderaan spektrum pada lapisan MAC sangat penting untuk mengoordinasikan akses spektrum di antara berbagai pengguna, mengoptimalkan penggunaan spektrum, dan meminimalkan interferensi.

Lapisan MAC dalam arsitektur jaringan bertanggung jawab atas pengaturan akses dan alokasi spektrum frekuensi di antara perangkat radio yang menggunakan jaringan secara bersamaan. Hal ini dilakukan untuk menghindari konflik dan interferensi antar pengguna yang berbagi spektrum yang sama. Peran lapisan MAC dalam penginderaan spektrum adalah untuk mengoordinasikan kapan dan bagaimana perangkat melakukan penginderaan spektrum, serta untuk mengatur alokasi spektrum yang ditemukan tersedia. Selain itu, lapisan MAC memungkinkan pengelolaan handoff spektrum yang cepat ketika pengguna primer kembali mengakses frekuensi yang digunakan oleh pengguna sekunder.

Dalam implementasi penginderaan spektrum, sejumlah protokol MAC dirancang untuk mengoordinasikan akses spektrum bagi pengguna sekunder. Protokol MAC berbasis jaringan radio kognitif yang sering digunakan meliputi akses acak (*random access*), pembagian berdasarkan waktu (*time-division*), dan pembagian berdasarkan frekuensi (*frequency-division*).

Protokol akses acak memungkinkan perangkat untuk mencoba mengakses spektrum secara acak, yang sederhana dan cepat namun rentan terhadap tabrakan antara pengguna primer dan sekunder. Protokol akses acak efektif untuk lingkungan dengan kepadatan pengguna rendah tetapi kurang efisien di jaringan padat. Kemudian protokol penginderaan berdasarkan pembagian waktu (*time division*), dimana waktu dialokasikan untuk setiap pengguna sekunder dalam periode tertentu. Teknik ini mengurangi interferensi dan meningkatkan kinerja penginderaan, namun membutuhkan sinkronisasi yang baik antar pengguna sekunder (Akyildiz et al., 2009). Protokol penginderaan berdasarkan pembagian frekuensi (*frequency*

division) melakukan penginderaan pada frekuensi tertentu untuk mengurangi interferensi. Protokol ini menunjukkan bahwa teknik penginderaan akan efektif pada spektrum luas, tetapi sulit diimplementasikan di spektrum sempit yang padat.

C. Tantangan Pengembangan Teknik Penginderaan Spektrum

Implementasi penginderaan spektrum dihadapkan pada sejumlah tantangan, antara lain ketepatan waktu dan efisiensi energi. Proses penginderaan spektrum yang berlangsung terus-menerus mengonsumsi daya tinggi. Selanjutnya, tantangan dalam mengoordinasikan keputusan spektrum dalam lingkungan dengan kepadatan tinggi, seperti jaringan seluler dan perangkat IoT, dapat mengakibatkan peningkatan latensi dan mengurangi efisiensi jaringan. Tuntutan hasil penginderaan dengan akurasi deteksi spektrum menjadi tantangan besar, terutama dalam kondisi lingkungan dengan interferensi tinggi atau ketika spektrum digunakan secara dinamis (Akyildiz et al., 2006).

Penginderaan spektrum memerlukan komputasi yang intensif, khususnya dalam lingkungan dengan banyak pengguna dan saluran frekuensi yang dinamis. Kompleksitas ini menambah konsumsi daya perangkat yang tinggi, yang menjadi kendala besar terutama pada perangkat yang bersumber daya terbatas seperti sensor IoT. Upaya pengembangan algoritma penginderaan spektrum yang hemat energi dan perangkat keras yang efisien menjadi krusial.

Frekuensi spektrum sering kali bervariasi dengan cepat dalam penggunaannya, terutama di area urban atau jaringan besar yang dinamis. Adaptasi penginderaan spektrum terhadap perubahan ini membutuhkan perangkat yang dapat beradaptasi

dengan cepat dan fleksibel, serta protokol yang responsif terhadap kondisi spektrum saat itu.

Pada lapisan fisik, keterbatasan sensitivitas perangkat dalam mendeteksi spektrum bisa menghambat akurasi penginderaan, terutama untuk spektrum yang sering mengalami gangguan akibat derau dan *fading*. Sementara pada lapisan MAC, ada masalah seperti *hidden node* dan *exposed node*, yang memengaruhi efektivitas penginderaan. Pengembangan teknik penginderaan pada lapisan MAC yang lebih adaptif, seperti penginderaan multi-kanal dan deteksi probabilistic sangat dibutuhkan.

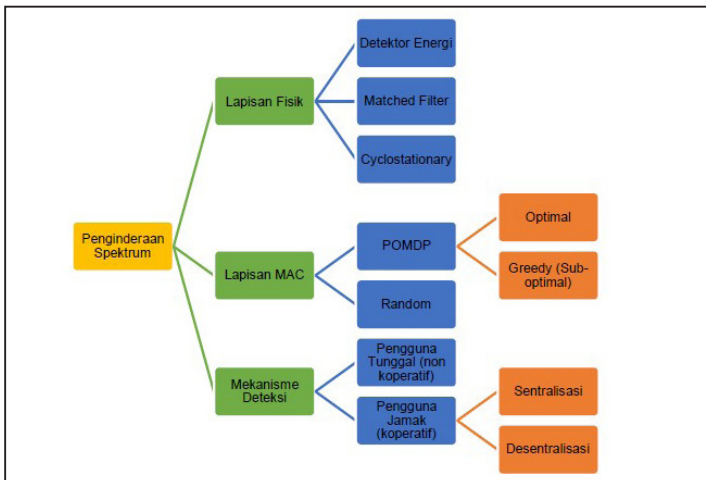
Algoritma pemodelan POMDP (*partially observable Markov decision process*) merupakan salah satu pendekatan yang digunakan dalam meningkatkan kinerja penginderaan dan akses spektrum secara efisien dan dinamis. Dalam penginderaan spektrum berbasis POMDP, proses pengambilan keputusan dilakukan dengan mempertimbangkan ketidakpastian keadaan spektrum yang hanya dapat diamati sebagian. Proses ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih optimal terkait akses spektrum, khususnya dalam kondisi lingkungan yang kompleks dan dinamis (Armi, Saad, Yusoff, et al., 2010). Penggunaan POMDP dalam penginderaan spektrum memungkinkan pengguna sekunder untuk mempertimbangkan probabilitas kondisi spektrum saat ini, memprediksi pola perilaku spektrum di masa depan, dan mengoptimalkan tindakan berdasarkan nilai penghargaan (*reward*) yang diperoleh sesaat setelah melakukan akses. Untuk mengurangi kompleksitas perhitungan pada algoritma optimal POMDP, diusulkan algoritma sub-optimal *Greedy* berbasis POMDP yang mampu mengurangi kompleksitas komputasi dari eksponensial ke linier. Riset penginderaan spektrum berbasis Algoritma pemodelan POMDP pada penginderaan spektrum akan dibahas pada bab III.

III. OPTIMASI PENGINDERAAN SPEKTRUM DENGAN MENGGUNAKAN ALGORITMA PEMODELAN POMDP

Akurasi penginderaan spektrum frekuensi nirkabel menjadi kunci utama dalam sistem radio kognitif. Tujuannya adalah untuk menentukan kanal mana yang digunakan atau tidak digunakan pada suatu daerah spektrum tertentu. Ini menjadi penting dalam konteks komunikasi nirkabel, terutama dengan semakin padatnya penggunaan spektrum frekuensi dan tuntutan kebutuhan yang lebih efisien. Kemampuan untuk memahami dan mengelola spektrum secara dinamis memainkan peran kunci dalam menghadapi tantangan komunikasi nirkabel modern dan meningkatnya pengguna komunikasi nirkabel (Armi et al., 2010b)

Pada bab ini akan disarikan kegiatan-kegiatan riset yang dilakukan terkait pengembangan dan optimasi penginderaan spektrum pada radio kognitif baik pada lapisan fisik dan lapisan MAC. Alur kegiatan pengembangan ini dideskripsikan pada gambar 3.1. Algoritma pengambilan keputusan Markov POMDP digunakan untuk optimasi hasil penginderaan dan dengan mempertimbangkan strategi akses spektrum yang meningkatkan jumlah bit yang bisa ditransmisikan dalam satu slot. Sebagai pembanding, digunakan algoritma penginderaan acak (*random*), dimana pengguna sekunder tidak melakukan penginderaan secara kontinyu, tapi dilakukan pada slot waktu tertentu untuk efisiensi daya dan pemilihan kanal spektrum dilakukan secara acak. Perbandingan antara kedua algoritma ini dibahas dalam bab ini.

Pengembangan metode-metode yang digunakan dalam penginderaan spektrum frekuensi nirkabel dimulai pada lapisan fisik, seperti deteksi energi, filter sinyal (*matched filter*), dan siklus sinyal (*cyclostationary*). Pada lapisan fisik ini juga riset berkembang kedalam bentuk sinyal yang digunakan, seperti OFDM, baik dengan *fading Rician* maupun *Rayleigh*. Sinyal OFDM banyak digunakan pada sistem komunikasi modern saat ini karena tingginya efisiensi dalam penggunaan spektrum dan memiliki kemampuan tahan terhadap interferensi dan *fading*.



Sumber: Akyildiz et al. (2006); Yucek & Arslan (2009)

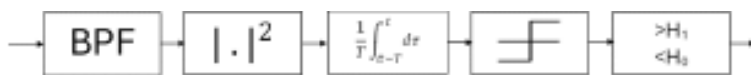
Gambar 3.1 Riset yang Dilakukan terhadap Penginderaan Spektrum Frekuensi Nirkabel

Kemudian optimasi dilakukan dengan lebih fokus pada metode penginderaan pada lapisan MAC dengan mengadopsi algoritma pemodelan dan kerangka kerja POMDP, yang menghasilkan beberapa teknik penginderaan, yaitu optimal dan sub-optimal. Algoritma ini tidak hanya fokus pada akurasi penginderaan, tapi juga mempertimbangan strategi akses yang meningkatkan jumlah bit yang mampu ditransmisikan dalam satu slot (*throughput*). Selanjutnya optimasi hasil-hasil penginderaan spektrum dilakukan dengan penginderaan kooperatif yang dilakukan oleh beberapa pengguna sekunder. Dalam mekanisme ini, masing-masing pengguna bekerja sama dalam menentukan satu lubang spektrum, baik dengan sentralisasi maupun desentralisasi

A. Penginderaan Spektrum Pada Lapisan Fisik

Penginderaan spektrum pada lapisan fisik hanya fokus pada keberadaan pengguna utama. Ada beberapa metode penginderaan spektrum nirkabel yang cukup populer dalam sistem radio kognitif, yakni deteksi energi, deteksi dengan menggunakan filter, dan deteksi berdasarkan siklus sinyal pengguna utama.

Deteksi energi menerapkan batas energi transmisi yang dibolehkan pada rentang frekuensi tertentu. Bila sinyal yang terdeteksi berada dibawah batas, maka spektrum tidak sedang digunakan oleh pengguna primer (*idle*). Sebaliknya bila sinyal yang terdeteksi berada diatas batas, maka kondisi kanal spektrum sedang digunakan oleh pengguna primer (*busy*). Diagram blok dari deteksi energi terlihat pada gambar 3.2.



Sumber: Armi, Chaeriah, et al. (2015)

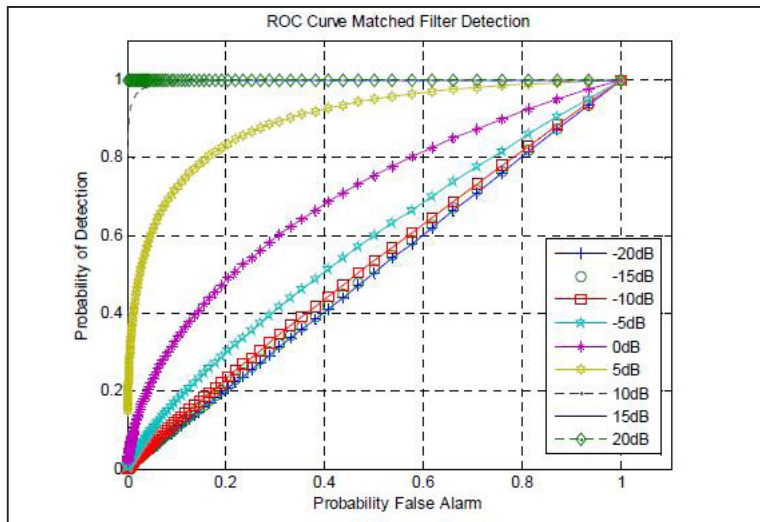
Gambar 3.2 Deteksi Energi pada Sistem Radio Kognitif

Hasil kinerja deteksi energi pada kanal AWGN dan *Rayleigh fading* dilakukan oleh (Armi, Chaeriah, et al., 2015). Hasil ini membandingkan kinerja deteksi energi pada kedua kanal tersebut. Dari hasil riset tersebut menunjukkan bahwa kinerja deteksi energi pada kanal Rayleigh lebih baik dibandingkan pada kanal AWGN. Kemudian penginderaan spektrum dengan metode deteksi energi diterapkan pada pengguna jamak (Armi, Wahab, et al., 2015). Dengan penginderaan kooperatif, masing-masing pengguna bekerja sama dengan mengumpulkan hasil deteksi untuk memutuskan keputusan akhir terkait lubang spektrum yang tersedia. Semakin banyak jumlah pengguna sekunder yang bekerja sama dalam mendeteksi lubang spektrum, maka kesalahan hasil deteksi dapat diminimalisir. Penginderaan spektrum dengan sinyal OFDM baik dengan derau yang beraturan dan tidak beraturan dilakukan oleh (Armi, Chaeriah, Oktafiani, et al., 2017). Hasil ini menunjukkan bahwa deteksi sinyal dengan derau yang beraturan menghasilkan nilai kesalahan yang lebih kecil dibandingkan deteksi sinyal dengan derau tidak beraturan. Dengan pembanding sinyal PSK (*Phase Shift Keying*), deteksi dengan sinyal OFDM menghasilkan akurasi deteksi yang lebih baik.

Penginderaan spektrum dengan menggunakan filter yang sesuai (*matched filter*) bertujuan untuk meningkatkan sensitivitas dan akurasi deteksi sinyal dengan derau. Namun

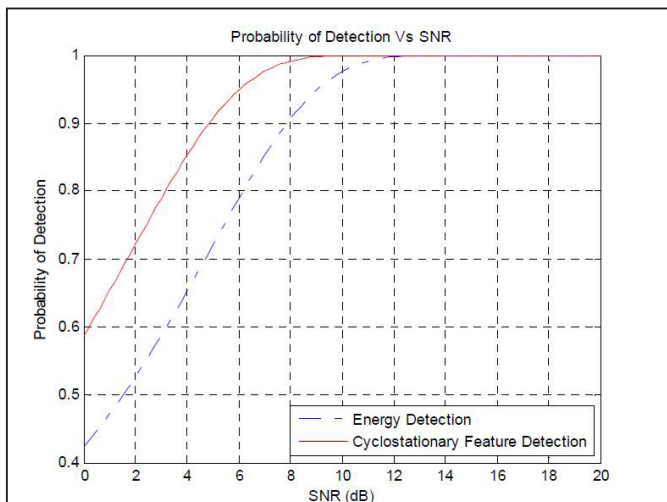
jenis penginderaan ini membutuhkan informasi awal terkait sinyal pengguna primer seperti jenis modulasi, frekuensi kerja, bandwidth, bentuk pulsa, dan format frame (Angga et al., 2013). Hasil kinerja berupa kurva operasi penerima dari detektor ini dengan variasi nilai SNR terlihat pada gambar 3.3. Detektor ini akan optimal bila filter yang dirancang sesuai dengan karakteristik sinyal yang dideteksi.

Kemudian sinyal pengguna primer dapat dideteksi dengan mengamati sinyal berdasarkan siklus (*cyclostationary detector*) (Cahyo et al., 2013). Namun teknik ini juga membutuhkan informasi terkait sinyal pengguna utama. Kelebihannya adalah teknik ini memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan deteksi energi, seperti terlihat pada gambar 3.4



Sumber: Angga et al. (2013)

Gambar 3.3 ROC Matched Filter Detector dengan Variasi Nilai SNR



Sumber: Cahyo et al. (2013)

Gambar 3.4 Perbandingan Metode Pengindraan Spektrum

Sinyal OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) merupakan sinyal yang digunakan dalam komunikasi nirkabel modern, terutama dalam sistem-sistem komunikasi modern broadband seperti Wi-Fi, LTE (Long-Term Evolution), dan DVB (Digital Video Broadcasting). Sinyal OFDM dirancang untuk mengatasi beberapa tantangan yang dihadapi dalam komunikasi nirkabel, seperti redaman multipath dan interferensi frekuensi selektif (selective frequency fading).

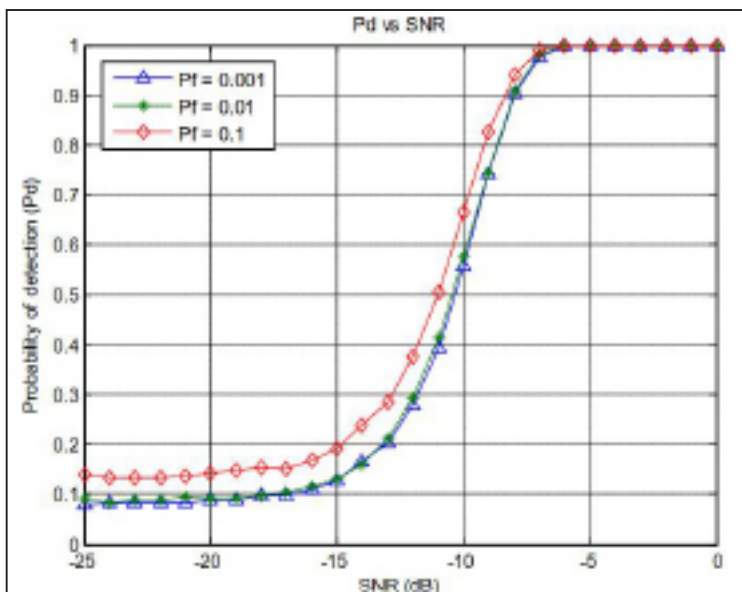
Penelitian penginderaan spektrum dengan menggunakan sinyal OFDM termodulasi QAM dengan daya sinyal rendah dilakukan pada (Armi, Chaeriah, Oktafiani, et al., 2017). Parameter kinerja waktu penginderaan dan jumlah data yang terkirim menjadi acuan. Semakin lama waktu penginderaan maka semakin sedikit jumlah data yang bisa terkirim ke penerima.

Sebaliknya ketika waktu penginderaan semakin singkat, maka akan semakin banyak data yang terkirim ke penerima. Waktu penginderaan berbanding terbalik terhadap jumlah data yang terkirim. Perbandingan hasil deteksi antara sinyal OFDM dan Gaussian dilakukan oleh (Armi et al., 2018). Kinerja penginderaan spektrum dengan menggunakan sinyal OFDM sedikit lebih baik dibandingkan dengan sinyal Gaussian.

Penelitian terkait kendali daya transmisi sinyal OFDM dilakukan pada (Wael, Armi, Miftahushudur, et al., 2017), dimana kendali daya menggunakan algoritma Iterative Partitioned Water Filling (IPW) dengan kanal berderau Rician dan Rayleigh (Rician dan Rayleigh channels).

Penelitian penginderaan spektrum dengan menggunakan sinyal berbasis pada nilai Eigen (eigenvalue) dilakukan oleh (Wael, Armi, & Rohman, 2017) sebagai solusi deteksi sinyal dengan daya rendah. Pada Gambar 3.5 menunjukkan bahwa hasil deteksi dengan menggunakan nilai eigenvalue mampu mendeteksi pada daya sinyal rendah dengan variasi nilai kesalahan yang beragam. Ketika daya sinyal yang dideteksi semakin besar, maka probabilitas deteksi akan semakin besar.

Pada deteksi sinyal pengguna primer, adakalanya hadir sinyal pengguna primer palsu yang menyebabkan kesalahan deteksi. Sinyal dari pengguna palsu ini terdeteksi seolah-olah berasal dari pengguna primer, sehingga pengguna sekunder menahan diri untuk tidak mengakses spektrum pengguna primer. Dan pengaruh munculnya sinyal dari pengguna primer palsu ini memiliki peran yang signifikan dalam kesalahan deteksi (Armi, Rizvi, Khan, Zangoti, et al., 2017) (Armi, Gharibi, Khan, Zangoti, et al., 2017).



Sumber: Wael, **Armi**, dan **Rohman** (2017)

Gambar 3.5 Hasil Pengindraan Sinyal dengan Daya Rendah Menggunakan Nilai Eigen

B. Penginderaan Spektrum Pada Lapisan MAC

Penginderaan spektrum pada lapisan MAC tidak hanya terfokus pada ketersediaan spektrum yang dapat digunakan oleh pengguna sekunder, tapi juga mempertimbangkan strategi akses yang dapat meningkatkan jumlah bit yang dapat dikirimkan dalam satu slot komunikasi dan efisiensi waktu penginderaan. Algoritma POMDP membantu dalam proses otomatis pengambilan keputusan. Model POMDP akan memberikan informasi kepada pengguna sekunder terkait langkah apa yang harus diambil. Model ini berupa fungsi atau pemetaan yang tergantung dari kondisi kanal. Model POMDP memberikan satu kerangka kerja (*framework*) kepada pengguna sekunder untuk melakukan akses ke spektrum frekuensi tertentu dan berkomunikasi tanpa mengganggu pengguna lainnya. Kemudian penerima pengguna sekunder akan memberikan penghargaan untuk keberhasilan transmisi data berupa nilai numerik yang menjadi panduan untuk penginderaan dan akses berikutnya.

Pada umumnya, model POMDP terdiri atas beberapa komponen, yaitu keadaan (*state*), pengamatan (*observation*), aksi (*action*), penghargaan (*reward*), kebijakan (*policy*), dan probabilitas transisi (*transition probability*) (Armi, Saad, Yusoff, et al., 2010)

Penerapan POMDP pada penginderaan spektrum memungkinkan sistem untuk membuat keputusan yang lebih cerdas dan adaptif, mengingat ketidakpastian yang terkait dengan kondisi spektrum (Armi, Saad, & Zuki, 2010). Hal ini dapat membantu dalam mengoptimalkan penggunaan spektrum, mengurangi interferensi, dan meningkatkan efisiensi jaringan secara keseluruhan. Namun, penggunaan POMDP juga memerlukan komputasi yang canggih dan pengelolaan sumber daya yang efisien untuk menghadapi kompleksitas perhitungan.

1. Pemodelan Trafik Komunikasi Pada POMDP

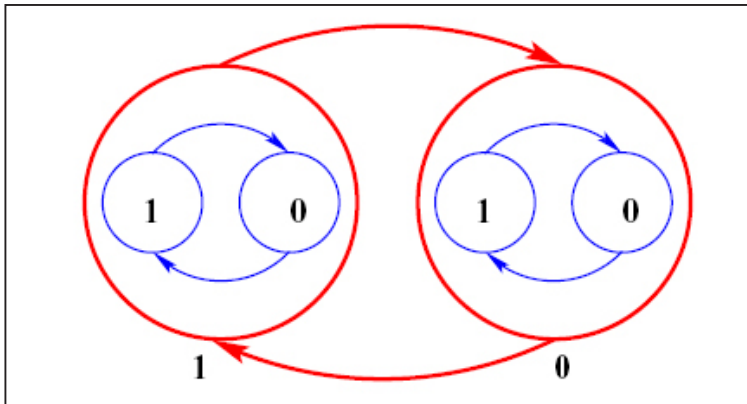
Pada algoritma model POMDP yang dirancang, aktifitas trafik komunikasi pada jaringan pengguna utama sangat penting dalam kebijakan akses spektrum frekuensi dan memastikan bahwa pengguna radio kognitif dapat mengakses spektrum tanpa mengganggu aktifitas pengguna primer dan meminimalisir interferensi sesama pengguna. Trafik penggunaan spektrum dapat berupa model statistik aktual penggunaan trafik spektrum yang digunakan oleh pengguna primer.

Model statistik Markov merupakan salah satu cara untuk memodelkan trafik komunikasi dalam sebuah jaringan dengan menggunakan sejumlah kondisi (Armi, Yusoff, et al., 2012). Akurasi model akan meningkat bila jumlah kondisinya meningkat. Akan tetapi meningkatnya jumlah kondisi akan berimbas pada kompleksitas model.

Pada gambar 3.6 menunjukkan model Markov untuk trafik jaringan. Mode “0” berarti bahwa jaringan dalam kondisi ON. Ini menandakan bahwa kanal dalam keadaan sibuk (*busy*), yang berarti bahwa pengguna primer sedang menggunakan spektrum frekuensi dan berkomunikasi dengan pengguna lain. Sementara mode “1” menandakan bahwa jaringan dalam kondisi OFF (*idle*), yang berarti bahwa spektrum frekuensi dapat diakses oleh pengguna sekunder.

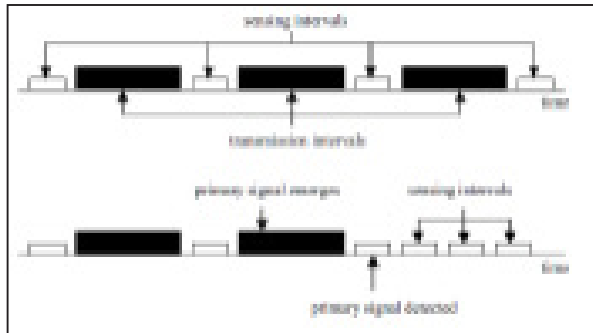
2. Algoritma Model POMDP Pada Penginderaan Spektrum

Pengguna sekunder harus melakukan penginderaan secara kontinyu terhadap aktivitas pengguna utama dalam waktu interval yang singkat. Ilustrasi interval waktu penginderaan dan transmisi data terlihat pada gambar 3.7. Interval waktu transmisi adalah waktu yang dibutuhkan oleh pengguna sekunder untuk melakukan transmisi data. Sementara interval waktu penginderaan adalah waktu yang dibutuhkan oleh pengguna sekunder dalam melakukan penginderaan spektrum. Model ini memastikan bahwa pengguna sekunder melakukan pengamatan sampai akhir interval waktu. Kemudian masing-masing pengguna sekunder dapat bekerjasama dalam melakukan pengamatan spektrum frekuensi.



Sumber: Misra dan Gong (1998)

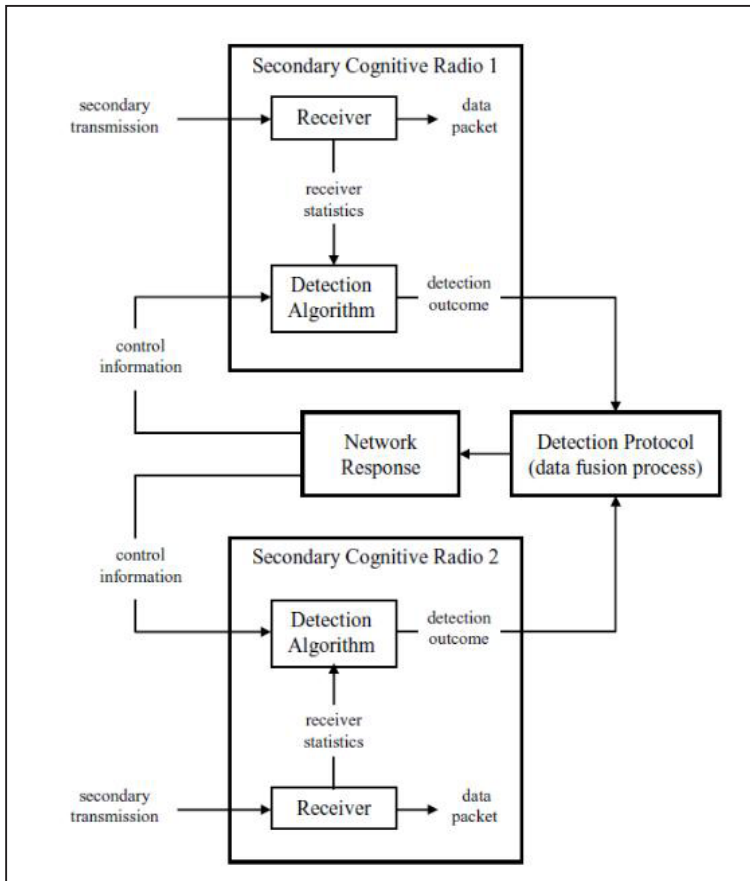
Gambar 3.6 Model Pengindraan Spektrum Berbasis Algoritma Markov untuk Trafik Jaringan Pengguna Primer



Sumber: Akyildiz et al. (2006)

Gambar 3.7 Interval Waktu Penginderaan dan Transmisi Data pada Jaringan Radio Kognitif

Hasil pengamatan dari masing-masing pengguna dikumpulkan dan dibandingkan untuk proses pengambilan keputusan. Ilustrasi bentuk kerjasama dari 2 pengguna radio kognitif dijelaskan pada gambar 3.8.

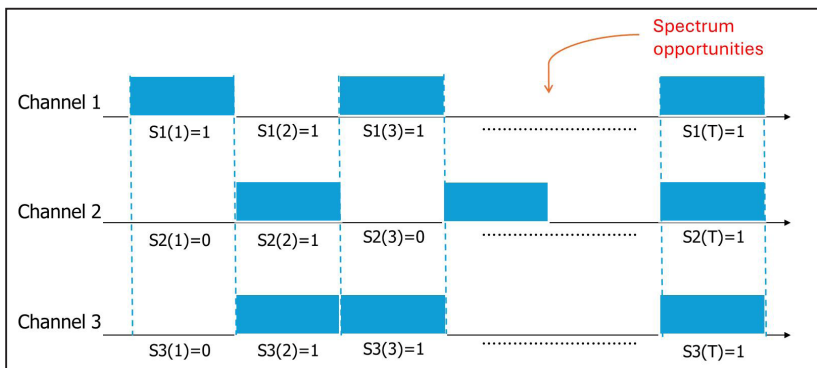


Sumber: Zhang et al. (2008)

Gambar 3.8 Contoh diagram kerjasama antara 2 pengguna sekunder

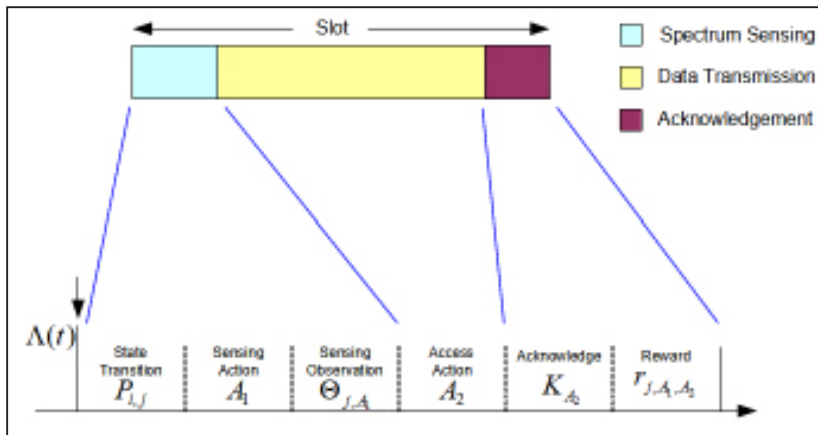
Pemodelan 3 buah kanal dengan aktivitas kosong (*idle*) dan terisi (*occupied*) pada masing-masing kanal dengan menggunakan model POMDP dijelaskan pada gambar 3.9. Setiap kanal mengalami perubahan yang dinamis pada berbagai kondisi. Pengguna sekunder dapat mengakses kanal spektrum ketika kondisi spektrum kosong.

Pengguna radio kognitif memiliki 3 tugas aktivitas dalam setiap slot komunikasi, yakni penginderaan spektrum, transmisi data (komunikasi), dan pemberitahuan (*acknowledgement*) bahwa transmisi dilakukan dengan sukses (Armi, Saad, Yusoff, et al., 2010). Struktur slot komunikasi terlihat pada gambar.



Sumber: Armi, Saad, Yusoff, et al. (2010)

Gambar 3.9 Aktivitas Pengguna pada Kanal Spektrum Frekuensi Menggunakan Model POMDP



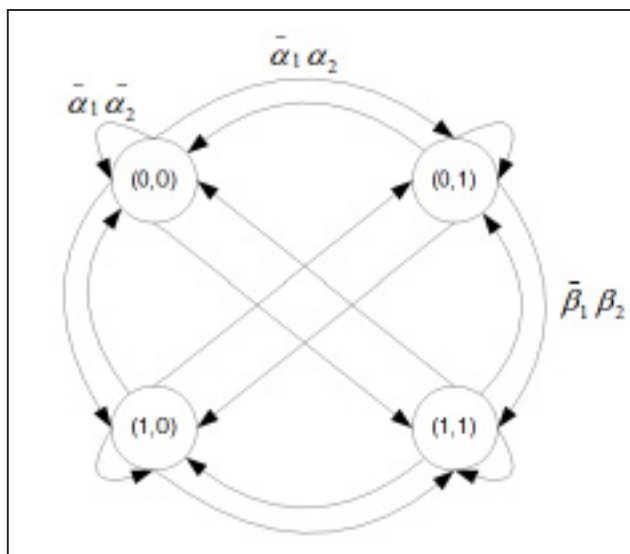
Sumber: Armi, Saad, Yusoff, et al. (2010)

Gambar 3.10 Struktur Slot Komunikasi pada Radio Kognitif (Cognitive MAC)

Pada tahapan awal, pengguna sekunder menentukan kanal spektrum yang akan diamati. Ketika tidak ada aktivitas pada spektrum frekuensi yang diamati, maka pengguna sekunder akan mulai mengirimkan paket data. Dan pada tahapan akhir, penerima pengguna sekunder akan mengirimkan sinyal pemberitahuan bahwa paket data diterima dengan sukses dan mengirimkan penghargaan dari setiap paket data yang dikirimkan dengan sukses.

3. Model POMDP Untuk Akses Spektrum Dinamis

Akses kanal spektrum berbasis POMDP dikenal dengan strategi penginderaan spektrum optimal dimana kanal spektrum dimodelkan sebagai deretan Markov dengan waktu diskrit (*discrete time Markov chain*) dengan jumlah kondisi kanal adalah $M = 2^N$, dimana N adalah jumlah kanal. Diagram kondisi (state diagram) untuk $N = 2$ digambarkan pada gambar 3.11.

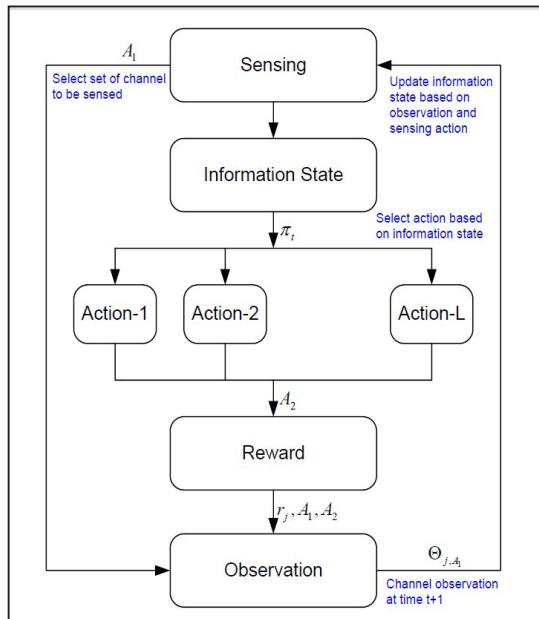


Sumber: Armi, Saad, Yusoff, et al. (2010)

Gambar 3.11 Diagram Kondisi untuk Jumlah Kanal $N = 2$ pada Model Markov untuk Akses Spektrum Dinamis

Pada gambar tersebut, kondisi (0,1) menyatakan bahwa kanal pertama adalah kosong (*idle*) dan kanal kedua dalam kondisi terisi (*busy*). Istilah pengamatan secara parsial berarti bahwa pengguna radio kognitif hanya mengamati sebagian kanal. Tujuannya adalah agar hasil pengamatan lebih optimal dan jumlah paket data (*throughput*) yang dikirimkan dapat maksimal (Armi et al., 2011c).

Pada proses akses spektrum dinamis dengan menggunakan model Markov, pengamatan kanal spektrum dapat dilakukan sebelum atau setelah pengguna sekunder mengakses spektrum yang tersedia. Gambar 3.12 menunjukkan bagaimana proses pengamatan, penginderaan, dan akses pada sistem dinamis dengan algoritma pemodelan POMDP.



Sumber: Armi, Saad, Yusoff, et al. (2010)

Gambar 3.12 Akses Spektrum Dinamis dengan Menggunakan Algoritma Pemodelan POMDP

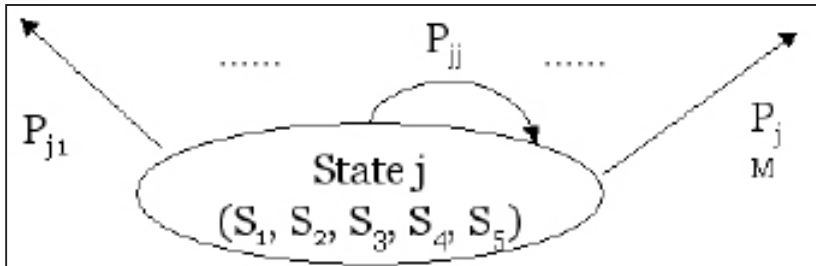
Informasi kondisi merupakan kumpulan hasil pengamatan dan penginderaan spektrum. Penghargaan dan pemberitahuan dikirimkan ketika pengguna sekunder berhasil mengirimkan paket data. Pengamatan dan penginderaan spektrum terus dilakukan meskipun pengguna sekunder sedang mengirimkan data.

Pengguna sekunder harus meninggalkan spektrum frekuensi yang digunakan dan mencari lubang spektrum ketika pengguna primer kembali dan ingin menggunakan spektrum frekuensi miliknya.

Untuk mengurangi meningkatnya kompleksitas komputasi pada penginderaan optimal karena meningkatnya jumlah kondisi, maka diperkenalkan teknik penginderaan sub-optimal Greedy (lapar). Teknik ini akan mengurangi tingkat kompleksitas perhitungan pada penginderaan ketika jumlah kondisi meningkat dari eksponensial ke linear (Armi et al., 2011a).

Pada penginderaan optimal dengan menggunakan model POMDP, vektor keyakinan (belief vector) meningkat secara eksponensial ketika jumlah kanal meningkat. Hal ini tentu akan meningkatkan kompleksitas komputasi dan waktu yang dibutuhkan untuk pengolahan hasil-hasil penginderaan menjadi lebih lama. Ilustrasi sederhana digambarkan pada gambar 3.13. Sebagai contoh bila jumlah kanal $N = 5$. Maka kondisi proses Markov menjadi $M = 2^N = 2^5 = 32$ kondisi. Selanjutnya kemungkinan transisi menjadi $2^5 \times 2^5 = 1024_{(2)}$.

Penginderaan optimal memilih aksi yang memberikan informasi yang maksimal sepanjang waktu penginderaan dari semua kanal spektrum frekuensi yang terpilih. Pengamatan dan penginderaan dilakukan terus menerus untuk mengurangi ketidakpastian terkait kondisi kanal spektrum untuk menghasilkan pengambilan keputusan yang lebih baik dalam jangka waktu lama. Sementara penginderaan sub-optimal Greedy fokus pada pemilihan aksi penginderaan yang memberikan manfaat langsung tanpa memperhitungkan implikasi jangka panjang.



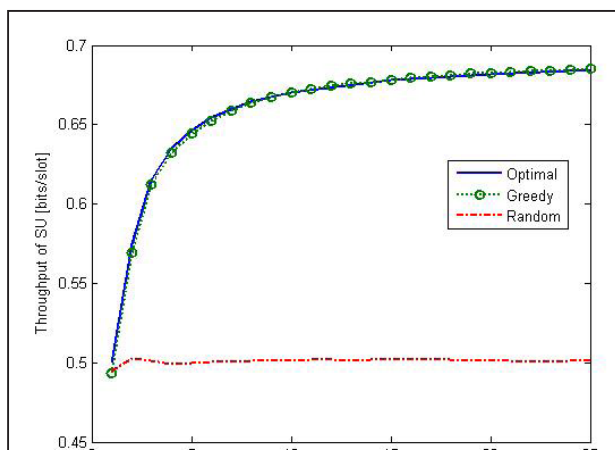
Sumber: Armi, Saad, Yusoff, et al. (2010)

Gambar 3.13 Jumlah Kondisi dan Probabilitas Transisi ketika $N=5$ Menggunakan Teknik Pengindraan Optimal

Perbedaan utama dari kedua teknik penginderaan tersebut terletak pada pendekatan eksploratif dan komprehensif dalam penginderaan optimal serta sifat lebih lokal dan segera dalam pendekatan *Greedy*. Penginderaan optimal mencoba untuk mengeksplorasi seluruh ruang untuk menemukan solusi terbaik, sementara greedy lebih fokus pada keputusan yang tampaknya optimal pada setiap langkahnya tanpa memperhatikan keseluruhan gambaran. Untuk melihat hasil optimasi penginderaan spektrum dari algoritma pemodelan POMDP ini kemudian dilakukan perbandingan dengan algoritma penginderaan acak.

Hasil optimasi penginderaan spektrum pada lapisan MAC dengan mengadopsi algoritma model POMDP ditunjukkan pada Gambar 3.14. Hasil optimasi yang diperoleh dibandingkan dengan penginderaan acak (Armi, Saad, & Zuki, 2010), (Armi, Saad, Yusoff, et al., 2010). Tidak seperti penginderaan acak, dimana pengguna sekunder melakukan penginderaan secara acak terhadap sejumlah kanal spektrum dan dilakukan pada slot waktu tertentu, penginderaan spektrum berbasis POMDP melakukan penginderaan berdasarkan kondisi hasil pengamatan sebelumnya dengan mengambil sejumlah kanal spektrum

untuk diamati. Hasil pengamatan ini secara kontinyu dilakukan perbaharuan untuk menentukan penginderaan pada periode berikutnya. Penginderaan spektrum optimal akan meningkatkan akurasi hasil penginderaan namun kompleksitas perhitungan dan waktu juga akan meningkat secara eksponensial. Penginderaan sub-optimal *Greedy* diajukan untuk menggantikan penginderaan optimal dimana dari hasil yang diperoleh, penggunaan teknik penginderaan *Greedy* relatif identik dibandingkan dengan penginderaan optimal.



Sumber: Armi, Saad, & Zuki (2010)

Gambar 3.14 Perbandingan Teknik Deteksi Optimal, Sub-Optimal *Greedy*, dan Random Berbasis Algoritma Model POMDP

4. Penginderaan dan Akses Kanal Spektrum Yang Tidak Ideal

Pendekatan yang dijelaskan diatas adalah ketika penginderaan dilakukan pada kondisi ideal tanpa mempertimbangkan faktor kesalahan (*false detection*, *probability of miss-detection*, dan *collision threshold*). Faktanya bahwa kesalahan-kesalahan tersebut tidak dapat diabaikan. Sering pengguna sekunder mendeteksi lubang spektrum, namun faktanya kanal spektrum tersebut sedang digunakan oleh pengguna primer sehingga terjadi tabrakan (*collission*). Sebaliknya, ketika pengguna sekunder mendeteksi kanal spektrum terisi, namun faktanya bahwa kanal spektrum tersebut kosong. (Armi et al., 2011)

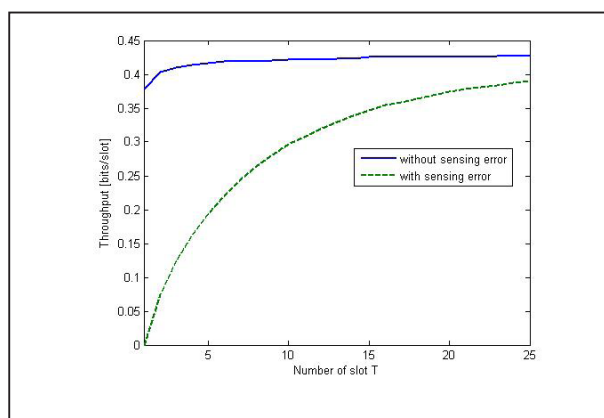
Kesalahan deteksi bisa disebabkan karena masalah derau propagasi, lintasan propagasi yang kabur (*fading*), ataupun berbayang (*shadowing*). Kesalahan penginderaan spektrum juga bisa disebabkan pengguna primer yang tersembunyi (*hidden*) atau terekspose (*exposed*). Pengguna yang tersembunyi adalah pengguna primer yang aktif mengirimkan sinyal pada spektrum tertentu tetapi tidak terdeteksi oleh pengguna sekunder. Kondisi ini biasanya disebabkan oleh jarak yang terlalu jauh atau adanya hambatan fisik (seperti dinding atau bangunan) antara pengguna primer dan pengguna sekunder. Sementara pengguna yang terekspos adalah pengguna sekunder yang menunda penggunaan spektrum atau menghindari transmisi karena mendeteksi sinyal pengguna primer. Padahal sebenarnya transmisi pengguna primer tidak akan menyebabkan interferensi. Situasi ini terjadi ketika pengguna sekunder terlalu sensitif atau mendeteksi sinyal pengguna primer yang sebenarnya tidak berada di kanal yang sama.

Riset terkait penginderaan spektrum dengan kondisi kanal tidak ideal dilakukan dengan syarat batas maksimal tabrakan yang dibolehkan oleh pengguna primer menunjukkan bahwa

faktor kesalahan-kesalahan dalam deteksi kanal spektrum akan menyebabkan jumlah paket (throughput) yang dapat dikirimkan pada satu slot komunikasi menjadi lebih rendah dibandingkan dengan penginderaan spektrum tanpa kesalahan seperti terlihat pada gambar 3.15. (Armi et al., 2011b; Armi, Arshad, et al., 2012).

5. Kerangka kerja POMDP Untuk Penginderaan Spektrum Kosong Bersama

Penginderaan spektrum dapat dilakukan dengan pengguna tunggal atau dengan sejumlah pengguna yang bekerjasama dalam penginderaan spektrum (penginderaan kooperatif) untuk meningkatkan akurasi hasil penginderaan. Semakin banyak pengguna sekunder yang bekerja sama, maka hasil penginderaan akan semakin baik (Armi, N.M. Saad & Arshad, 2009).



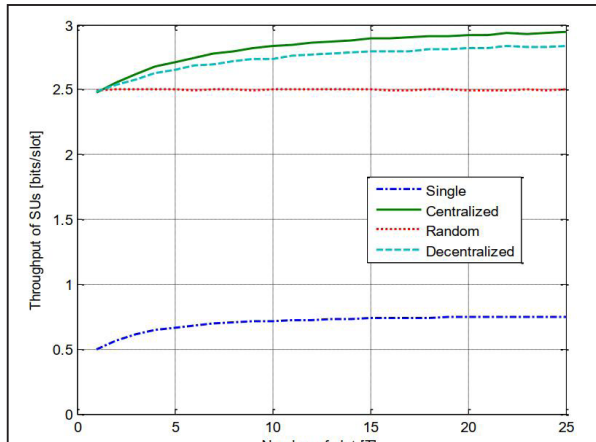
Sumber: Armi et al. (2011b)

Gambar 3.15 Kinerja Paket Data Terkirim (*Throughput*) sebagai Fungsi Jumlah Slot Komunikasi dengan Menggunakan Pendekatan Algoritma Sub-Optimal *Greedy*

Penginderaan spektrum kooperatif mampu meningkatkan efisiensi dan akurasi hasil deteksi. Masing-masing pengguna sekunder melakukan penginderaan spektrum dan kordinator pusat menentukan spektrum frekuensi mana yang bisa diakses (sentralisasi) atau masing-masing pengguna sekunder menentukan spektrum frekuensi mana yang bisa diakses berdasarkan hasil koleksi data penginderaan dari pengguna sekunder lainnya. Perbedaan utama antara keduanya adalah pada teknik pengambilan keputusan dan kontrol. Sentralisasi memiliki struktur hierarkis dengan entitas pusat yang mengontrol, sementara desentralisasi memberikan keputusan yang lebih independen kepada setiap perangkat di jaringan pengguna sekunder.

Pengembangan POMDP untuk teknik sentralisasi dan desentralisasi penginderaan spektrum dilakukan oleh (Armi, Yusoff, et al., 2015). Untuk melakukan evaluasi kinerja kedua teknik penginderaan tersebut, dilakukan perbandingan seperti terlihat pada Gambar 3.16. Pada gambar tersebut terlihat bahwa penginderaan kooperatif memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan penginderaan tunggal. Dan penginderaan kooperatif tersentralisasi memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan desentralisasi dalam hal jumlah bit yang mampu ditransmisikan dalam setiap slot transmisi data. Namun penginderaan kooperatif desentralisasi masih lebih baik dibandingkan sistem penginderaan acak.

Sementara Gambar 3.17 menunjukkan perbandingan kinerja antara teknik sentralisasi dan desentralisasi. Berdasarkan gambar tersebut, teknik desentralisasi memiliki peningkatan jumlah data yang lebih agresif dan mampu ditransmisikan ketika probabilitas kanal terpilih semakin besar dibandingkan teknik sentralisasi. Dari gambar tersebut terlihat bahwa kinerja teknik terdesentralisasi memiliki jumlah throughput yang relatif sama dengan teknik sentralisasi ketika probabilitas kanal terpilih adalah 1 (100%).

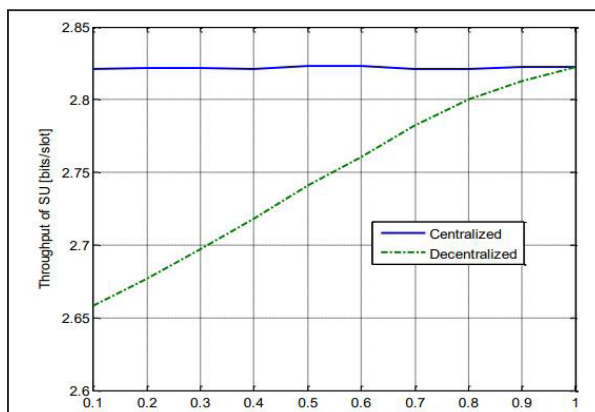


Sumber: Armi, Wahab, dan Yudi (2015)

Gambar 3.16 Perbandingan Kinerja Penginderaan Spektrum Frekuensi dengan Menggunakan Model POMDP

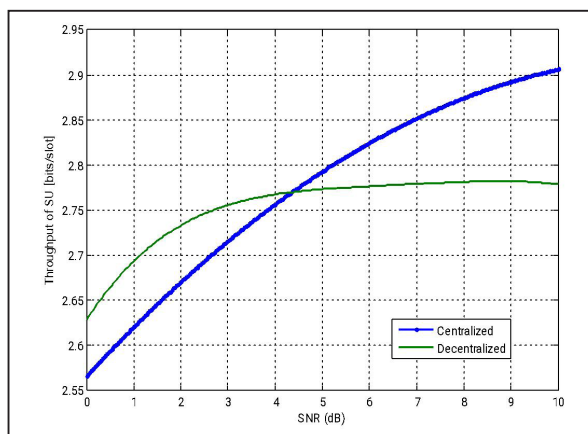
Hasil yang menarik adalah ditunjukkan pada Gambar 3.18 dimana perbandingan antara kedua teknik kooperatif ini mengambil sampel nilai SNR yang beragam. Dari hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kinerja dari penginderaan (spektrum kooperatif terdesentralisasi lebih baik dibandingkan dengan penginderaan spektrum sentralisasi ketika nilai SNR berada dibawah 4.5 dB. Namun ketika nilai SNR semakin besar, maka kinerja dari penginderaan spektrum kooperatif sentralisasi lebih baik dari terdesentralisasi (Armi et al., 2013)

Dari kedua hasil tersebut, masing-masing teknik sentralisasi dan desentralisasi memiliki kelebihan. Pilihan antara sentralisasi dan desentralisasi dipengaruhi oleh faktor seperti kebutuhan untuk koordinasi yang ketat atau fleksibilitas yang lebih besar dalam lingkungan spektrum frekuensi yang berubah-ubah.



Sumber: Armi et al. (2013)

Gambar 3.17 Perbandingan Teknik Sentralisasi dan Desentralisasi



Sumber: Armi et al. (2013)

Gambar 3.18 Perbandingan Teknik Sentralisasi dan Desentralisasi dengan Variasi Nilai SNR

Buku ini tidak diperjualbelikan.

IV. RELEVANSI, IMPLIKASI, DAN REKOMENDASI PENGINDERAAN SPEKTRUM PADA RADIO KOGNITIF

Penginderaan spektrum memiliki peran penting pada radio kognitif karena hasil-hasil penginderaan tersebut akan berimplikasi terhadap optimasi penggunaan spektrum frekuensi pada komunikasi nirkabel. Penginderaan spektrum memungkinkan perangkat untuk mendeteksi dan memanfaatkan spektrum yang tidak sedang digunakan oleh pengguna primer. Hal ini tentu akan meningkatkan efisiensi penggunaan spektrum, sehingga sumber daya spektrum frekuensi yang terbatas dapat dimanfaatkan secara lebih maksimal. Dengan penginderaan spektrum, perangkat radio kognitif dapat menggunakan spektrum yang kosong secara dinamis. Ini membantu menambah kapasitas jaringan secara keseluruhan tanpa perlu menambah alokasi spektrum yang baru. Hal ini sangat bermanfaat dalam jaringan seluler atau Wi-Fi yang padat, di mana penggunaan spektrum yang lebih efisien membantu melayani lebih banyak pengguna sekaligus (Talay & Altılar, 2013).

Di lingkungan yang memiliki keterbatasan alokasi spektrum, seperti di perkotaan atau area padat, penginderaan spektrum memungkinkan penggunaan spektrum yang lebih cerdas, membantu mengatasi kelangkaan spektrum akibat kepadatan jaringan. Dengan penginderaan spektrum, pengguna radio kognitif bisa menggunakan saluran yang tidak aktif sementara waktu, yang membantu mengurangi kemacetan pada jaringan utama.

Sistem komunikasi selular yang akan datang (5G, 6G) mengandalkan efisiensi spektrum yang tinggi dan kemampuan untuk menangani banyak perangkat secara bersamaan. Penginderaan spektrum membantu jaringan ini dengan menyediakan akses fleksibel pada spektrum yang tersedia.

Masalah-masalah yang akan muncul terkait pertumbuhan pengguna komunikasi nirkabel dimasa yang akan datang dengan fitur-fitur aplikasi yang semakin kaya akan berimplikasi terhadap kelangkaan spektrum frekuensi akibat padatnya jaringan komunikasi. Tuntutan efisiensi penggunaan spektrum juga menjadi alasan bahwa penginderaan spektrum yang memungkinkan akses spektrum secara dinamis menjadi sangat vital dan krusial.

Oleh karena hal-hal tersebut, penginderaan spektrum yang tidak hanya terfokus pada lapisan fisik tapi juga mempertimbangkan metode akses menjadi sangat penting. Penginderaan spektrum berbasis algoritma pemodelan POMDP merupakan salah satu teknik yang tidak hanya memperhatikan akurasi penginderaan juga strategi dan metode akses yang harus diambil untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja

A. Pemanfaatan Penginderaan Spektrum Pada Sistem Komunikasi Modern

Perkembangan teknologi komunikasi dan digital yang berkembang sangat cepat, memunculkan fitur-fitur komunikasi baru yang menuntut penggunaan sumber daya spektrum frekuensi yang semakin luas. Untuk itu dibutuhkan efisiensi penggunaan sumber daya spektrum frekuensi.

Untuk menyelesaikan permasalahan yang muncul terkait kelangkaan sumber daya spektrum frekuensi dimasa

mendatang akibat meningkatnya jumlah pengguna spektrum nirkabel, penginderaan spektrum merupakan salah satu solusi yang ditawarkan untuk mencari spektrum kosong yang tidak digunakan untuk ditempati oleh pengguna nirkabel lainnya tanpa menimbulkan interferensi terhadap pengguna utama (M. Ali et al., 2023).

Komunikasi nirkabel generasi ke-5 (5G) menawarkan sistem komunikasi dengan kecepatan data tinggi, konektivitas yang luas, waktu tunda transmisi yang singkat (*low latency*), kapasitas yang besar, dan efisiensi daya yang besar (Rizvi et al., 2017). Komunikasi 5G akan mendominasi sistem komunikasi masa depan yang mendukung pertumbuhan platform-platform baru dibidang industri, hiburan, pertanian, medis, dan lain-lain. Untuk memenuhi kebutuhan akses komunikasi dan kapasitas yang cukup besar maka dibutuhkan manajemen sumber daya spektrum yang lebih efisien. Penginderaan spektrum merupakan solusi optimasi penggunaan kanal frekuensi dengan banyak kelebihan. Diantara kelebihan-kelebihan tersebut adalah efisiensi alokasi spektrum frekuensi, akses dinamis dan adaptif pada spektrum frekuensi yang tersedia, optimasi efisiensi konsumsi daya, dan lain-lain.

Internet of things (IoTs) merupakan salah satu paradigma baru dalam dunia informasi dan komunikasi. IoT akan memainkan peran penting dalam modernisasi segala bidang, seperti otomotif, pertanian, hiburan, lingkungan, medis (Mardiana et al., 2021), industri (Khan et al., 2020)(Reegu et al., 2020), dan lain-lain. Dengan melengkapi sebuah perangkat dengan perangkat sensor dan alat komunikasi, maka perangkat tersebut akan dapat saling bertukar data dan informasi melalui koneksi internet.

Beberapa alasan bahwa penginderaan spektrum merupakan solusi efisiensi spektrum akibat pertumbuhan pengguna IoT

adalah karena penggunaan IoT akan semakin luas dimasa yang akan datang dan memungkinkan transfer data yang sangat besar sehingga kebutuhan akan bandwidth akan semakin besar. Dengan meningkatnya pengguna IoT, tentu dibutuhkan manajemen spektrum yang lebih efisien, adaptif, dan dinamis. Penginderaan spektrum yang memungkinkan pengguna mengoptimalkan sumber daya spektrum merupakan salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan-permasalahan tersebut. Penginderaan spektrum memungkinkan perangkat IoT mendeteksi dan menggunakan kanal yang tidak aktif, sehingga memaksimalkan pemanfaatan spektrum yang terbatas dan menghindari konflik dengan perangkat lain yang menggunakan frekuensi yang sama. Dengan penginderaan spektrum, perangkat IoT dapat menghindari kanal yang penuh atau sibuk, memilih frekuensi yang lebih stabil, dan mengurangi risiko interferensi, sehingga komunikasi antar-perangkat menjadi lebih andal. Penginderaan spektrum juga membantu perangkat IoT beradaptasi dengan lingkungan yang beragam dan memilih saluran yang paling sesuai dengan kondisi setempat, meningkatkan kualitas dan keandalan komunikasi di berbagai situasi (Al-Dulaimi et al., 2023a; Leena K.and Hiremath, 2022)

Penginderaan spektrum memungkinkan pengguna lain berkomunikasi pada frekuensi yang berbeda dalam satu waktu. Hal ini dapat dimanfaatkan oleh pengguna yang berada di daerah minim sinyal, seperti daerah pedesaan, dengan memanfaatkan spektrum frekuensi yang tersedia untuk layanan akses data dan komunikasi (Liang et al., 2008). Penginderaan spektrum memiliki kelebihan dalam kelincahan melakukan akses dinamis sehingga mampu memberikan layanan komunikasi darurat di daerah bencana (Ghafoor et al., 2014). Hal ini memberikan akses jaringan dengan cepat sebelum pemulihan infrastruktur komunikasi yang rusak akibat bencana alam. Selain itu,

kemampuannya dalam beradaptasi terhadap kanal spektrum baru memiliki potensi mampu digunakan sebagai alat komunikasi darurat karena dapat memberikan layanan jaringan akses dan pengiriman data dengan cepat, ekonomis, dan efisien.

Pada masa yang akan datang, transportasi akan dilengkapi dengan fitur-fitur canggih. Salah satu diantaranya sistem komunikasi antar kendaraan (*vehicle to vehicle communication – V2V*), komunikasi kendaraan dengan infrastruktur jalan (*vehicle to infrastructure – V2I*), dan komunikasi kendaraan dengan semua perangkat (*vehicle to everything – V2X*) (Nurkahfi et al., 2024) (C. Bin Ali Wael et al., 2020). Peningkatan jumlah pengguna dalam sistem komunikasi kendaraan tentu akan membutuhkan spektrum kanal yang lebih luas dan bandwidth yang lebih lebar untuk menampung kapasitas pengguna. Penginderaan spektrum mampu memberi ruang akses layanan komunikasi dan data yang lebih luas. Akses spektrum dinamis memungkinkan terjadinya komunikasi kendaraan secara kontinyu tanpa mengurangi kualitas layanan (Eze et al., 2017). Teknologi penginderaan spektrum juga bisa dimanfaatkan pada komunikasi maritim.

B. Kolaborasi Riset

Penginderaan spektrum akan menjadi pondasi penting bagi sistem komunikasi masa depan karena meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas jaringan di tengah tantangan kebutuhan data yang terus berkembang. Penginderaan spektrum memungkinkan penggunaan spektrum yang lebih efisien dengan memanfaatkan frekuensi yang tidak digunakan secara dinamis. Hal ini mengurangi kebutuhan alokasi spektrum yang tetap dan memungkinkan perangkat untuk berkomunikasi tanpa perlu menunggu alokasi resmi, terutama dalam lingkungan spektrum padat.

Dengan pertumbuhan IoT, jumlah perangkat yang terhubung ke jaringan akan meningkat pesat. Penginderaan spektrum dapat membantu jaringan mengakomodasi lebih banyak perangkat dengan memungkinkan mereka menemukan dan berbagi spektrum kosong, mengurangi risiko interferensi antar perangkat IoT.

Riset terkait penginderaan spektrum terus dilakukan sehingga dibutuhkan mitra kolaborasi untuk akselerasi hasil-hasil riset. Beberapa kolaborasi riset yang telah dilakukan hingga saat ini adalah dengan peneliti-peneliti di Indonesia diantaranya dengan Institut Teknologi Telkom Purwokerto, Telkom University (Armi, Chaeriah, Suratman, et al., 2017)(Armi, Chaeriah, Oktafiani, et al., 2017), dan Institut Teknologi Nasional(Cahyo et al., 2013) (Angga et al., 2013). Demikian juga kolaborasi dengan mitra luar negeri yang memiliki minat yang sama seperti Universiti Teknologi Petronas (Malaysia), University of Wah (Pakistan), University of Missouri (US), Dublin University (Irlandia). Mitra individu dari luar negeri ini yang memiliki minat dalam bidang penginderaan spektrum dan banyak memberikan masukan terkait riset dan pengembangan.

Kolaborasi juga harus dilakukan adalah dengan Kementerian Komunikasi dan Informasi (Kominfo) saat ini menjadi Kementerian Komunikasi dan Digital (Komdigi) sebagai pengambil kebijakan dan lembaga otoritas alokasi spektrum frekuensi nirkabel. Pengujian implementasi penginderaan spektrum semestinya memperoleh izin terlebih dahulu oleh badan regulasi spektrum frekuensi dibawah Kominfo / Komdigi.

C. Rekomendasi

Penginderaan spektrum berbasis POMDP menawarkan solusi probabilistik untuk masalah penginderaan spektrum dalam kondisi yang tidak sepenuhnya terlihat, tetapi penerapannya dalam jaringan nirkabel menghadapi tantangan yang cukup besar. Keterbatasan komputasi, kebutuhan data, latensi, perangkat keras, regulasi spektrum dan adaptasi dalam lingkungan dinamis menjadi kendala utama (Armi et al., 2013).

Dalam jaringan besar yang melibatkan banyak perangkat dan titik akses, penginderaan spektrum berbasis POMDP menjadi semakin kompleks karena harus mengelola banyak probabilitas kondisi spektrum dan tindakan yang saling ketergantungan. Penggunaan algoritma model POMDP dalam skala besar memerlukan koordinasi yang kompleks dan membutuhkan sumber daya yang lebih besar. Hal ini membutuhkan pengelolaan jaringan secara efisien, terutama dalam hal pemanfaatan spektrum dan pengaturan interferensi di antara banyak perangkat.

Dengan melihat potensi pengembangan yang luas saat ini dan masa yang akan datang, riset penginderaan spektrum harus terus dilakukan terutama untuk pengujian lapangan terhadap algoritma model POMDP yang sudah dikembangkan dengan menggunakan perangkat keras yang sesuai dengan algoritma pemodelan POMDP.

Implementasi dan pengujian bisa dilakukan pada skala kecil yang melibatkan beberapa pengguna. Kemudian berlanjut dengan meningkatkan jumlah pengguna. Pengujian dan implementasi lebih lanjut bisa dilakukan dengan mengintegrasikan kemampuan penginderaan spektrum ini pada komunikasi nirkabel modern seperti 5G, IoTs, komunikasi kendaraan, dan lain-lain.

Dalam pengujian lapangan perlu bekerjasama dengan pemegang otoritas penggunaan spektrum frekuensi. Di Indonesia pemegang hak pengaturan penggunaan frekuensi adalah Kementerian Komunikasi dan Informasi (Kominfo) yang saat ini menjadi Kementerian Komunikasi dan Digital (Komdigi).

Selain riset dan pengembangan penginderaan spektrum sebagai salah satu solusi kelangkaan frekuensi, hal yang tidak kalah penting adalah optimasi alokasi spektrum sebagai bagian dari sumber daya sistem komunikasi. Riset yang dilakukan saat ini adalah fokus pada optimasi alokasi sumber daya (*resource allocation*) yang tersedia termasuk didalamnya penggunaan spektrum frekuensi dengan memanfaatkan pembelajaran mesin (*machine learning*) yang diterapkan pada komunikasi kendaraan (*vehicular communication*). Alokasi sumber daya pada sistem komunikasi kendaraan menjadi kunci penting dalam *Vehicle-to-Everything* (V2X), jaringan 5G, dan sistem transportasi pintar. Sistem ini mengatur sumber daya jaringan (seperti spektrum, *bandwidth*, daya, dan waktu transmisi) untuk memastikan bahwa kendaraan dapat berkomunikasi dengan cepat, aman, dan efisien. Riset ini dilakukan dengan bekerjasama dengan mitra universitas di luar negeri (Universite Polytechnique Hauts de France) dan dalam negeri (ITB).

V. KESIMPULAN

Penginderaan spektrum adalah salah satu metode dalam mengatasi kelangkaan spektrum yang memungkinkan pengguna melakukan akses spektrum secara dinamis. Namun saat ini juga berkembang metode alokasi sumber daya yang merupakan salah satu teknik optimasi dalam sistem komunikasi nirkabel.

Pengembangan metode penginderaan spektrum nirkabel untuk meningkatkan efisiensi waktu dan akurasi hasil penginderaan pada lapisan fisik telah dilakukan. Begitu juga dengan metode penginderaan kooperatif yang terbukti mampu meningkatkan efisiensi waktu dan akurasi hasil penginderaan.

Selanjutnya pengembangan metode penginderaan yang tidak hanya fokus pada akurasi hasil tapi juga mempertimbangkan metode akses yang meningkatkan jumlah data yang mampu ditransmisikan juga telah dilakukan. Algoritma pemodelan penginderaan spektrum frekuensi berbasis POMDP (*Partially Observable Markov Decision Process*) pada lapisan MAC mampu meningkatkan kinerja dan akurasi deteksi lubang spektrum frekuensi yang mampu meminimalisir efek kesalahan deteksi akibat derau yang terjadi pada sistem komunikasi nirkabel. Algoritma pemodelan ini tidak hanya diterapkan pada deteksi menggunakan pengguna sekunder tunggal (*single user*), namun juga diterapkan pada penginderaan spektrum kooperatif (*Cooperative Spectrum Sensing*), baik dengan penginderaan tersentralisasi maupun terdesentralisasi. Algoritma ini juga terbukti mampu meningkatkan jumlah *throughput* yang dikirimkan dibandingkan dengan metode acak yang umumnya digunakan pada metode penginderaan spektrum sebelumnya.

Penginderaan spektrum berbasis POMDP unggul dalam meminimalkan interferensi dengan pengguna primer. kemampuan teknik penginderaan ini dalam mempertimbangkan probabilitas dan mengoptimalkan penginderaan di bawah ketidakpastian memberikan efisiensi spektrum yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Selain itu, pendekatan ini dapat mengurangi jumlah kesalahan dalam penginderaan dan meningkatkan akurasi deteksi. Implementasi POMDP dalam penginderaan spektrum memiliki tantangan komputasi yang besar, karena penghitungan probabilitas dan penghargaan yang terus-menerus. Selain itu, algoritma pemodelan POMDP membutuhkan informasi yang cukup mengenai model spektrum dan pola perilaku pengguna primer, yang tidak selalu tersedia atau dapat diandalkan di lingkungan nyata.

Pengembangan POMDP dalam penginderaan spektrum diperkirakan akan melibatkan peningkatan adaptabilitas dan efisiensi komputasi. Salah satu arah yang menjanjikan adalah penggunaan POMDP dengan melibatkan kecerdasan buatan berbasis pembelajaran mesin (*machine learning*) dan pembelajaran dalam (*deep learning*), yang memungkinkan sistem untuk mengenali pola penggunaan spektrum secara otomatis. Selain itu, pengembangan perangkat keras yang dapat mendukung pemrosesan POMDP secara *realtime* akan meningkatkan efektivitas penginderaan spektrum berbasis POMDP.

Arah riset yang dilakukan saat ini dan kedepan adalah optimasi alokasi sumber daya komunikasi diantaranya adalah penggunaan spektrum dan efisiensi (*waktu, daya, bandwidth, komputasi*) dengan memanfaatkan kecerdasan artifisial berbasis pembelajaran mesin dan pembelajaran dalam terutama untuk aplikasi komunikasi kendaraan.

VI. PENUTUP

Penginderaan spektrum merupakan aspek penting pada teknologi akses spektrum dinamis yang diproyeksikan sebagai salah satu solusi dalam mengatasi kelangkaan spektrum akibat semakin meningkatnya jumlah pengguna nirkabel yang menuntut perangkat untuk dapat berkomunikasi dan melakukan transfer data yang masif. Peningkatan jumlah pengguna nirkabel ini sebagai akibat semakin besar lebar bandwidth yang tersedia untuk sistem komunikasi nirkabel generasi 5G/6G dan meningkatnya kecepatan transfer data komunikasi.

Dalam penerapan teknologi akses spektrum dinamis, beberapa hal yang perlu diperhatikan seperti regulasi penggunaan spektrum, desain perangkat keras, algoritma penginderaan dan deteksi lubang spektrum, dan masalah keamanan jaringan karena pengguna akan berpindah dari satu jaringan ke jaringan yang lain secara dinamis.

Regulasi penggunaan spektrum semestinya melibatkan badan yang berwenang dalam mengatur penggunaan spektrum frekuensi. Di Indonesia, lembaga atau badan yang berwenang dan memiliki otoritas penuh dalam penggunaan spektrum frekuensi adalah Kementerian Komunikasi dan Informasi (Kominfo) yang saat ini menjadi Kementerian Komunikasi dan Digital (Komdigi).. Untuk kebutuhan penelitian dan percobaan lapangan terkait implementasi teknologi akses spektrum dinamis, perizinan penggunaan frekuensi diperlukan dengan syarat bahwa percobaan lapangan tidak mengganggu pengguna berlisensi. Kerjasama dengan *stakeholder* otoritas pengaturan spektrum

frekuensi sangat diperlukan dalam penerapan teknologi akses spektrum dinamis.

Kerjasama para peneliti lintas bidang seperti bidang-bidang RF (Radio Frequency), antena, pengolahan sinyal pada proses baseband, jaringan nirkabel, serta pengembangan IC (Integrated Circuit) dan chip elektronika sangat diperlukan. Kolaborasi dan sinergi antar peneliti-peneliti lintas bidang ini diharapkan dapat mempercepat pengembangan implementasi teknologi akses spektrum dinamis pada sistem komunikasi nirkabel.

Kemudian pengembangan teknik deteksi dan penginderaan lubang spektrum adalah hal yang penting untuk menghasilkan hasil deteksi yang akurat. Integrasi dengan teknologi baru seperti kecerdasan buatan (*artificial intelligent*), pembelajaran mesin (*machine learning*), dan pembelajaran dalam (*deep learning*) sangat diperlukan dalam meningkatkan kinerja penginderaan seperti sensitivitas, akurasi, efisiensi, dan lain-lain. Hal-hal yang menjadi pertimbangan dalam penggunaan metode dan algoritma penginderaan spektrum adalah sederhana, singkat, dan akurat sehingga faktor kesalahan deteksi menjadi minimal.

Keamanan dan privasi juga merupakan isu yang harus diperhatikan pada implementasi penginderaan spektrum karena pengguna sekunder mampu berpindah secara dinamis dari satu spektrum frekuensi ke spektrum frekuensi lainnya. Penerapan regulasi dan standar keamanan untuk beragam komunikasi nirkabel dan transfer data bisa jadi berbeda untuk tingkat keamanannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah segala puji bagi ALLAH SWT yang telah memberikan rahmat-Nya sehingga naskah orasi ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik. Semoga dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan bidang teknologi komunikasi nirkabel, khususnya pada bidang penginderaan spektrum frekuensi dan teknologi akses spektrum dinamis.

Dalam kesempatan kali ini, saya mengucapkan terimakasih kepada Presiden Republik Indonesia, Jenderal TNI (Purn.) H. Prabowo Subianto Djojohadikusumo, Presiden terdahulu Ir. H. Joko Widodo, atas mandat dan penugasan saya sebagai Peneliti Ahli Utama di BRIN; Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional, Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc. atas dukungannya dalam penyelesaian naskah orasi ilmiah ini; Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani; Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D; Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah Prof. Dr. M. Rokhis Khomarudin, Prof. Dr. Asif Awaludin, dan Prof. Dr. Aloysius Adya Pramudita yang telah memberikan masukan yang konstruktif dalam perbaikan naskah orasi ini; Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Aries Suestiningtyas, S.IP., M.A; Kepala Organisasi Riset Elektronika dan Informatika Dr.Eng. Budi Prawara; Para Kepala Pusat Riset dibawah Organisasi Riset Elektronika dan Informatika BRIN. Kepala Biro Organisasi dan Sumber Daya Manusia BRIN Ratih Retno Wulandari, S.Sos., M.Si. Panitia pelaksana pengukuhan profesor riset; serta pihak-pihak lain yang berkontribusi terhadap penyelesaian naskah orasi ilmiah ini.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Terima kasih juga disampaikan kepada Kepala Pusat Riset Elektronika dan Telekomunikasi LIPI terdahulu Dr. Masbah Siregar, Dr. Totok Sugandhi (Alm), Dr. Purwoko Adhi, dan Dr. Hiskia atas dukungan beliau terhadap pengembangan karir saya sebagai peneliti. Terimakasih banyak juga atas dukungan dan interaksi yang hangat kepada teman-teman di Pusat Riset Elektronika dan Telekomunikasi LIPI khususnya Kelompok Riset Komunikasi dan Pengolahan Sinyal.

Dalam menempuh pendidikan, tak lupa saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada guru-guru SD, SMP, dan SMA yang telah memberikan pendidikan moral dan etika sebagai pelajar dan ilmu pengetahuan yang menjadi dasar pengembangan kompetensi kandidat. Ucapan terima kasih yang besar kepada Ir. Poernomo Trisapto sebagai pembimbing kandidat pada jenjang S-1 di ITENAS; Prof Akihiko Sugiura sebagai pembimbing S2 kandidat di Toyohashi University of Technology, Japan; dan Prof. Moch Naufal bin Moch Saad di Universiti Teknologi Petronas sebagai pembimbing S3 kandidat. Kandidat juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada teman-teman di Farasan Network Research Laboratory, Jazan University, Kingdom of Saudi Arabia atas interaksi dan dukungan yang hangat selama kandidat menjalani riset sebagai peneliti postdoc. Terimakasih juga kepada para dosen dan civitas akademik Telkom University sebagai mitra kolaborator dan tempat kandidat berbagi ilmu sebagai tenaga pengajar profesional.

Tidak lupa saya menghaturkan terima kasih yang tak ternilai kepada kedua orang tua, Bapak Bayumi Thohir (Almarhum) dan Ibu Arini, yang telah membesarkan, mengasuh, mendidik, membimbing, dan tak putus memberikan doa kepada kandidat

hingga sampai pada pencapaian saat ini. Untuk kakak-kakakku, Arief Rahman Hakim (Almarhum) dan Henny Rachmawati, serta adikku Moelli Fitriyuni, terimakasih banyak atas dukungan dan doanya selama ini. Kemudian untuk istriku tercinta, Mia Murtikasari dan anak-anakku-Muhammad Rafy Nasrullah dan Haifa Varisha Fitri Nasrullah terima kasih atas kesabaran, dukungan, dan doanya untuk kandidat dalam meniti karir sebagai peneliti. Terakhir, saya mengucapkan terima kasih kepada semua teman-teman yang tidak dapat disebutkan satu per satu

DAFTAR PUSTAKA

- Akyildiz, I. F., Lee, W. Y., & Chowdhury, K. R. (2009). CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 7(5), 810–836. <https://doi.org/10.1016/J.ADHOCA.2009.01.001>
- Al-Dulaimi, O., Al-Dulaimi, M., Al-Dulaimi, A., & Alexandra, M. O. (2023). Cognitive Radio Network Technology for IoT-Enabled Devices. *Engineering Proceedings*, 41(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2023041007>
- Ali, A. M., Adoum, B. A., Bachar, I. S., **Armi, N.**, Idriss, M. S., & Khayal, M. Y. (2021). A Review of the Use Cases and Possible Technologies for 5G and Beyond Communications. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 94–111. <https://doi.org/10.9734/cjast/2021/v40i1831447>
- Ali, M., Yasir, M. N., Bhatti, D. M. S., & Nam, H. (2023). Optimization of Spectrum Utilization Efficiency in Cognitive Radio Networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 12(3), 426–430. <https://doi.org/10.1109/LWC.2022.3229110>
- Angga, B. S., Aryanta, D., & Armi, N. (2013). Kinerja Spectrum Sensing dengan Metode Matched Filter Detector pada Radio Kognitif. *ELKOMIKA: Jurnal Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, dan Teknik Elektronika*, 1(1), 60–67. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v1i1.26>
- Armi, N.**, Arshad, M., Rizvi, S. S. A., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M. (2012). Performance of opportunistic spectrum access with sensing error in cognitive radio Ad hoc networks. *Journal of Engineering Science and Technology*, 7(2), 142–155. https://jestec.taylors.edu.my/Vol%207%20Issue%202%20April%2012/Vol_7_2_142_155_N.%20ARMI.pdf

- Armi, N., Chaeriah, B. A. W., & Arhad, M. (2015).** Performance evaluation of energy detector in cognitive radio system. *Advanced Science Letters*, 21(11). <https://doi.org/10.1166/asl.2015.6596>
- Armi, N., Chaeriah, B. A. W., Mahmudin, D., Daud, P., & Arshad, M. (2016).** Energy detector threshold under White Gaussian Noise channel in cognitive radio system. 2015 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE): Green Technology Strengthening in Information Technology, Electrical and Computer Engineering Implementation, Proceedings (ICITACEE), 372–375. Semarang, Indonesia, 16–18 October 2015. <https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2015.7437832>
- Armi, N., Chaeriah, B. A. W., Oktafiani, F., Suratman, F. Y., & Wijaya, A. (2017).** Performance of energy detector with certain and uncertain noise in OFDM cognitive radio system. Proceedings - 2016 International Electronics Symposium (IES), 299–302. Denpasar, Indonesia, 29–30 September 2016. <https://doi.org/10.1109/ELECSYM.2016.7861021>
- Armi, N., Chaeriah, B. A. W., Suratman, F. Y., & Wijaya, A. (2017).** Sensing time-based throughput performance in OFDM cognitive radio system. Proceedings - 2016: 2nd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), 88–91. Yogyakarta, Indonesia, 1–2 August 2016. <https://doi.org/10.1109/ICWT.2016.7870858>
- Armi, N., Gharibi, W., Khan, W. Z., Zangoti, H., Rizvi, S., & Wael, C. (2017).** Error detection of malicious user attack in cognitive radio networks. Proceeding - 2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET), 89–92. Jakarta, Indonesia, 23–24 October 2017. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2017.8253152>

- Armi, N., Rizvi, S., Khan, W. Z., Zangoti, H., Gharibi, W., & Wael, C.** (2017). Malicious user attack in cognitive radio networks. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 15(3), 1096–1102. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v15i3.5794>
- Armi, N., Saad, N. M., & Arshad, M.** (2009). Hard Decision Fusion based Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio System. *ITB Journal of Information and Communication Technology*, 3(2), 109–122. <http://journals.itb.ac.id/index.php/jictra/article/view/186>
- Armi, N., Saad, N. M., Yusoff, M. Z., & Arshad, M.** (2010a). MAC protocol for opportunistic spectrum access in cognitive radio system. *2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA)*, 300–305. Penang, Malaysia, 3–5 October 2010. <https://doi.org/10.1109/ISIEA.2010.5679452>
- Armi, N., Saad, N. M., Yusoff, M. Z., & Arshad, M.** (2010b). Optimal Sensing for Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio. *International Journal of Engineering (IJE)*, 4(3), 243–253. <https://www.researchgate.net/publication/45728900>
- Armi, N., Saad, N. M., Zuki, M. Y., & Arshad, M.** (2010). Cooperative spectrum sensing and signal detection in cognitive radio. *2010 International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*, 1–5. Kuala Lumpur, Malaysia, 15–17 June 2010. <https://doi.org/10.1109/ICIAS.2010.5716151>
- Armi, N., Wael, C., Taufiqurrahman, Wijayanto, Y. N., Khan, W. Z., & Gharibi, W.** (2018). OFDM based signal detection performance in cognitive radio systems. *2018 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, 591–594. Yogyakarta, Indonesia, 21–22 November 2018. <https://doi.org/10.1109/ISRITI.2018.8864276>
- Armi, N., Wahab, M., & Asep Yudi, H.** (2015). Performance evaluation of energy detector in Cooperative Spectrum Sensing. *Proceedings of 2014 8th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA)*, 1–4. Kuta, Bali, 22–23 October 2014. Indonesia, <https://doi.org/10.1109/TSSA.2014.7065917>

- Armi, N., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M. (2011a).** Multiuser sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks. *European Journal of Scientific Research*, 52(4). <http://scholars.utp.edu.my/id/eprint/7098>
- Armi, N., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M. (2011b).** Sensing and access over imperfect channel in opportunistic spectrum access system. *2011 National Postgraduate Conference (NPC) - Energy and Sustainability: Exploring the Innovative Minds*, 1–5. Perak, Malaysia, 19–20 September 2011. <https://doi.org/10.1109/NatPC.2011.6136439>
- Armi, N., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M. (2011c).** Spectrum sensing and throughput performance in opportunistic spectrum access system. *2011 IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA)*, 66–71. Langkawi, Malaysia, 25–28 September 2011. <https://doi.org/10.1109/ISWTA.2011.6089555>
- Armi, N., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M. (2012).** Decentralized cooperative user in opportunistic spectrum access system. *2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS): A Conference of World Engineering, Science and Technology Congress (ESTCON)-Conference Proceedings*, 179–183. Kuala Lumpur, Malaysia, 12–14 June 2012. <https://doi.org/10.1109/ICIAS.2012.6306183>
- Armi, N., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M. (2013).** Cooperative spectrum sensing in decentralized cognitive radio system. *IEEE EuroCon 2013*, 113–118. Zagreb, Croatia, 1–4 July 2013. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2013.6624974>
- Armi, N., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M. (2015).** Decentralized multiuser cooperative spectrum sensing in cognitive radio system. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 7(3). <https://doi.org/10.15676/ijeei.2015.7.3.5>
- Axell, E., Leus, G., Larsson, E. G., & Poor, H. V. (2012).** Spectrum Sensing for Cognitive Radio : State-of-the-Art and Recent Advances. *IEEE Signal Processing Magazine*, 29(3), 101–116. <https://doi.org/10.1109/MSP.2012.2183771>

- Baby, S. M., & James, M. (2016). A Comparative Study on Various Spectrum Sharing Techniques. *Procedia Technology*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.152>
- Cahyo, H., Aryanta, D., & Armi, N. (2013). Kinerja Spectrum Sensing dengan Metode Cyclostationary Feature Detector pada Radio Kognitif. *ELKOMIKA: Jurnal Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, dan Teknik Elektronika*, 1(1), 26–34. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v1i1.26>
- Cordeiro, C., Challapali, K., Birru, D., & Shankar, S. (2005). IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios. *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005*. DySPAN 2005., 328–337. <https://doi.org/10.1109/DYSPAN.2005.1542649>
- Dannana, S., Chapa, B. P., & Rao, G. S. (2018). Spectrum Sensing Using Matched Filter Detection. Dalam Bhateja, V., Coello Coello, C., Satapathy, S., Pattnaik, P. (Ed.), *Intelligent Engineering Informatics. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 695, 497–503. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7566-7_49
- Eze, J., Zhang, S., Liu, E., & Eze, E. (2017). Cognitive radio technology assisted vehicular ad-hoc networks (VANETs): Current status, challenges, and research trends. *ICAC 2017 - 2017 23rd IEEE International Conference on Automation and Computing: Addressing Global Challenges through Automation and Computing*. <https://doi.org/10.23919/IConAC.2017.8082035>
- Faulhaber, G. R. (2006). The future of wireless telecommunications: Spectrum as a critical resource. *Information Economics and Policy*, 18(3), 256–271 <https://doi.org/10.1016/j.infoecopol.2006.06.004>
- Ghafoor, S., Sutton, P. D., Sreenan, C. J., & Brown, K. N. (2014). Cognitive radio for disaster response networks: Survey, potential, and challenges. *IEEE Wireless Communications*, 21(5). <https://doi.org/10.1109/MWC.2014.6940435>
- Haykin, S. (2005). Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in*

- Communications*, 23(2), 201–220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>
- ITU. (2019). *ITU-R: Managing the radio-frequency spectrum for the world*. World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19), Sharm el-Sheikh, Egypt, 28 October to 22 November 2019. <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/itu-r-managing-the-radio-frequency-spectrum-for-the-world.aspx>
- Kaelbling, L. P., Littman, M. L., & Cassandra, A. R. (1998). Planning and acting in partially observable stochastic domains. *Artificial Intelligence*, 101(1), 99–134. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0004-3702\(98\)00023-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0004-3702(98)00023-X)
- Khan, W. Z., Rehman, M. H., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., **Armi, N.**, & Salah, K. (2020). Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers and Electrical Engineering*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522>
- Kim, K., Xin, Y., & Rangarajan, S. (2010). Energy Detection Based Spectrum Sensing for Cognitive Radio: An Experimental Study. *IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2010.5683560>
- Leena, K., & Hiremath, S. G. (2022). Cognitive Radio Networks for Internet of Things. Dalam Raj, J. S., Palanisamy, R., Perikos, I., Shi, Y. (Ed.), *Intelligent Sustainable Systems. Lecture Notes in Networks and Systems*, 213, 515–526. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2422-3_40
- Liang, Y.-C., Hoang, A. T., & Chen, H.-H. (2008). Cognitive radio on TV bands: a new approach to provide wireless connectivity for rural areas. *IEEE Wireless Communications*, 15(3), 16–22. <https://doi.org/10.1109/MWC.2008.4547518>
- Mahmood, M. R., & Matin, M. A. (2020). Current Research Trends on Cognitive Radio Based Internet of Things (IoT). Dalam M. A. Matin (Ed.), *Towards Cognitive IoT Networks*, 5–17. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42573-9_2

- Mardiana, V. A., Martadinata, M. M., Nurkahfi, G. N., Mitayani, A., Kurniawan, D., **Armi, N.**, Prawara, B., Sudirja, S., Arisal, A., Firmansyah, R. D., Rozie, A. F., Priyo, S., Setiana, S., & Setiarini, A. (2021). SIMONIC: IoT Based Quarantine Monitoring System for Covid-19. *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, 21(2), 112. <https://doi.org/10.14203/jet.v21.112-121>
- Misra, V., & Gong, W.-B. (1998). A hierarchical model for teletraffic. *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.98CH36171)*, 2, 1674–1679. <https://doi.org/10.1109/CDC.1998.758534>
- Mitola, J. (2000). *Cognitive Radio An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio* [Dissertation]. Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:61207536>
- Nurelmadina, N., Hasan, M. K., Memon, I., Saeed, R., Zainol Ariffin, K. A., Sayed Ali Ahmed, E., Mokhtar, R., Islam, S., Hossain, E., & Hassan, M. (2021). A Systematic Review on Cognitive Radio in Low Power Wide Area Network for Industrial IoT Applications. *Sustainability*, 13, 338. <https://doi.org/10.3390/su13010338>
- Nurkahfi, G. N., Triwinarko, A., Prawara, B., **Armi, N.**, Juhana, T., Syambas, N. R., Mulyana, E., Dogheche, E., & Dayoub, I. (2024). On SDN to Support the IEEE 802.11 and C-V2X-Based Vehicular Communications Use-Cases and Performance: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 12, 95926–95958. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3341092>
- Reegu, F., Zada Khan, W., Mohd Daud, S., Arshad, Q., & **Armi, N.** (2020). A Reliable Public Safety Framework for Industrial Internet of Things (IIoT). *2020 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 189–193. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET51080.2020.9298690>
- Rizvi, S., Aziz, A., Jilani, M. T., **Armi, N.**, Muhammad, G., & Butt, S. H. (2017). An investigation of energy efficiency in 5G wireless networks. *2017 International Conference on Circuits, System and Simulation (ICCSS)*, 142–145. <https://doi.org/10.1109/CIRSYSSIM.2017.8023199>

- Sahoo, A., & Souryal, M. (2014, April). Dynamic Spectrum Access: Current State of the Art and Future Challenges. *2014 International Conference on Computing, Networking and Communications, Invited Position Papers*, 226–230. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=914583
- Song, M., Xin, C., Zhao, Y., & Cheng, X. (2012). Dynamic spectrum access: From cognitive radio to network radio. *IEEE Wireless Communications*, 19(1). <https://doi.org/10.1109/MWC.2012.6155873>
- Song, M., Xin, C., Zhao, Y., & Cheng, X. (2012). Dynamic spectrum access: From cognitive radio to network radio. *IEEE Wireless Communications*, 19(1), 23–29. <https://doi.org/10.1109/MWC.2012.6155873>
- Talay, A. C., & Altılar, D. T. (2013). Self adaptive routing for dynamic spectrum access in cognitive radio networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 36(4), 1140–1151. <https://doi.org/10.1016/J.JNCA.2013.01.007>
- Wael, C. B. A., **Armi, N.**, & Rohman, B. P. A. (2017). Spectrum sensing for low SNR environment using maximum-minimum eigenvalue (MME) detection. *Proceeding - 2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application (ISITIA) 2016*, 435–438. Lombok, Indonesia, 28–30 July 2016. <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2016.7828699>
- Wael, C. B. A., **Armi, N.**, Miftahushudur, M. T., Muliawarda, D., & Sugandi, G. (2017). Power allocation in OFDM-based cognitive radio networks for fading channel. *Proceeding - 2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 184–187. Jakarta, Indonesia, 23–24 October 2017. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2017.8253172>
- Wael, C. B. A., **Armi, N.**, Miftahushudur, T., Amrullah, Y. S., & Sariningrum, R. (2018). NC-OFDM Transceiver design for maritime cognitive radio. *Proceedings - 2018 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET) 2018*, 117–120. Serpong,

Indonesia, 1–2 November 2018. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2018.8683927>

Wael, C. B. A., **Armi**, N., Mitayani, A., Kurniawan, D., Satyawan, A. S., & Subekti, A. (2020). Analysis of IEEE 802.11p MAC Protocol for Safety Message Broadcast in V2V Communication. *2020 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 320–324. Tangerang, Indonesia, 18–20 November 2020. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET51080.2020.9298654>

Wael, C. B. A., Armi, N., Rohman, B. P. A., & Miftahushudur, T. (2017). Performance analysis of sub-Nyquist sampling for Wideband spectrum sensing in cognitive radio. *Proceeding - 2016 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET) 2016*, 152–156. Jakarta, Indonesia, 3–5 October 2016. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2016.7849603>

Yin, M., Li, K., & Zheng, M. (2018). Spectrum Utilization of Cognitive Radio in Industrial Wireless Sensor Networks - A Review. Dalam Li, K., Fei, M., Du, D., Yang, Z., & Yang, D. (Ed.), *Intelligent Computing and Internet of Things. ICSEE IMIOT. Communications in Computer and Information Science*, 924, 419–428. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2384-3_39

Yucek, T., & Arslan, H. (2009). A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(1), 116–130. <https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090109>

Zhang, W., Mallik, R. K., & Letaief, K. B. (2008). Cooperative Spectrum Sensing Optimization in Cognitive Radio Networks. *2008 IEEE International Conference on Communications*, 3411–3415. <https://doi.org/10.1109/ICC.2008.641>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Jurnal Internasional

1. Al Mushayt, O. S., Gharibi, W., & **Armi, N.** (2019). Multicast routing protocol for advanced vehicular ad hoc networks. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 17(3). <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.V17I3.10240>
2. Ali, A. M., Adoum, B. A., Bachar, I. S., **Armi, N.**, Idriss, M. S., & Khayal, M. Y. (2021). A Review of the Use Cases and Possible Technologies for 5G and Beyond Communications. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 94–111. <https://doi.org/10.9734/cjast/2021/v40i1831447>
3. Al-Mushayt, O. S., Gharibi, W., & **Armi, N.** (2022). An E-Commerce Control Unit for Addressing Online Transactions in Developing Countries: Saudi Arabia - Case Study. *IEEE Access*, 10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3180329>
4. **Armi, N.**, Arshad, M., Rizvi, S. S. A., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M. (2012). Performance of opportunistic spectrum access with sensing error in cognitive radio Ad hoc networks. *Journal of Engineering Science and Technology*, 7(2).
5. **Armi, N.**, Gharibi, W., & Khan, W. Z. (2020). Error rate detection due to primary user emulation attack in cognitive radio networks. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(5). <https://doi.org/10.11591/IJECE.V10I5.PP5385-5391>
6. **Armi, N.**, Rizvi, S., Khan, W. Z., Zangoti, H., Gharibi, W., & Wael, C. (2017). Malicious user attack in cognitive radio networks. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 15(3). <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v15i3.5794>

7. **Armi, N., Saad, N. M., Yusoff, M. Z., & Arshad, M. (2010).** Optimal sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio. *International Journal of Engineering*, 4(3), 243-253.
8. **Armi, N., & Suryadi, A. (2015).** Detection threshold in cognitive radio system. *Advanced Science Letters*, 21(1). <https://doi.org/10.1166/asl.2015.5752>
9. **Armi, N., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M. (2011).** Multiuser sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks. *European Journal of Scientific Research*, 52(4).
10. **Armi, N., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M. (2015).** Decentralized multiuser cooperative spectrum sensing in cognitive radio system. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 7(3). <https://doi.org/10.15676/ijeei.2015.7.3.5>
11. **Armi, N. M. Saad, N., & Arshad, M. (2009).** Hard Decision Fusion based Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio System. *ITB Journal of Information and Communication Technology*, 3(2), 109–122. <https://doi.org/10.5614/itbj.ict.2009.3.2.3>
12. **Arshad, M., Armi, N., Kamel, N., & Saad, N. M. (2011).** Mobile data collector based routing protocol for wireless sensor networks. *Scientific Research and Essays*, 6(29). <https://doi.org/10.5897/SRE11.1339>
13. **Gharibi, W., & Armi, N. (2018).** Towards improving road safety using advanced vehicular networks. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 16(2). <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v16i2.8210>
14. **Khan, W. Z., Rehman, M. H., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., Armi, N., & Salah, K. (2020).** Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers and Electrical Engineering*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522>

15. Latukolan, M. I. C., Pramudita, A. A., **Armi, N.**, Hamdani, N. A., Susilawati, H., & Satyawan, A. S. (2024). Random sample consensus-based room mapping using light detection and ranging. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 13(6), 4532–4545. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i6.6932>
16. Nurkahfi, G. N., **Armi, N.**, Mardiana, V. A., Dinata, M. M. M., Mitayani, A., Setiarini, A., Prawara, B., Kurniawan, D., Firmansyah, R., Sudirja, Rozie, A. F., Arisal, A., & Setiana, S. (2022). Development of a low-cost wearable device for Covid-19 self-quarantine monitoring system. *Public Health in Practice*, 4, 100299. <https://doi.org/10.1016/J.PUHIP.2022.100299>
17. Rizvi, S., Aziz, A., Saad, N., **Armi, N.**, & Zuki Yusoff, M. (2011). Tight Coupling Internetworking Between UMTS and WLAN: Challenges, Design Architectures and Simulation Analysis. *International Journal of Computer Networks (IJCN) (Issue 3)*.
18. I.Rohman, B. P. A., Satyawan, A. S., Kurniawan, D., Indrawijaya, R., Wael, C. B. A., & **Armi, N.** (2024). Robust automotive radar interference mitigation using multiplicative-adaptive filtering and Hilbert transform. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 14(1), 326–336. <https://doi.org/10.11591/ijece.v14i1.pp326-336>
19. Samafou, F., Adoum, B. A., Ari, A. A. A., Fidel, F. M., MOUNGACHE, A., **Armi, N.**, & Gueroui, A. M. (2024). A new approach to joint resource management in MEC-IoT based federated meta-learning. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 13(5), 3196–3217. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i5.7993>
20. Suyoto, Subekti, A., Satyawan, A. S., **Armi, N.**, Wael, C. A., & Nurkahfi, G. N. (2022). Impact of carrier frequency offset and in-phase and quadrature imbalance on the performance of wireless precoded orthogonal frequency division multiplexing. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(5). <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i5.pp5153-5163>

21. Suyoto, Subekti, A., Satyawana, A. S., Mardiana, V. A., **Armi, N.**, & Kurniawan, D. (2021). Performance analysis of OFDM-IM scheme under STO and CFO. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(4). <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i4.pp3293-3299>

Jurnal Nasional

22. Angga, B. S., Aryanta, D., & **Armi, N.** (2013). Elkomika ©Teknik Elektro Itenas | No Kinerja Spectrum Sensing dengan Metode Matched Filter Detector pada Radio Kognitif. *Jurnal Teknik Elektro Januari-Juni (Vol. 1)*.
23. Cahyo, H., Aryanta, D., & **Armi, N.** (2013). Elkomika ©Teknik Elektro Itenas | No Kinerja Spectrum Sensing Dengan Metode Cyclostationary Feature Detector Pada Radio Kognitif. *Jurnal Teknik Elektro Januari-Juni (Vol. 1)*.
24. Mardiana, V. A., Martadinata, M. M., Nurkahfi, G. N., Mitayani, A., Kurniawan, D., **Armi, N.**, Prawara, B., Sudirja, S., Arisal, A., Firmansyah, R. D., Rozie, A. F., Priyo, S., Setiana, S., & Setiarini, A. (2021). SIMONIC: IoT Based Quarantine Monitoring System for Covid-19. *Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi*, 21(2), 112. <https://doi.org/10.14203/jet.v21.112-121>
25. Setiawan, A., Taufiqurrachman, T., Firdaus, A. K., Darwis, F., Rizal, A., Desvasari, W., Arisesa, H., Sulistyaningsih, S., Putranto, P., **Armi, N.**, & Arseno, D. (2021). Design and Realization of Band Pass Filter in K-Band Frequency for Short Range Radar Application. *Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi*, 21(1), 1. <https://doi.org/10.14203/jet.v21.1-7>
26. Wael, C. B. A., **Armi, N.**, Mitayani, A., Suyoto, S., Prini, S. U., Desvasari, W., Dahlan, R., & Sariningrum, R. (2020). Cooperative Game Theory Approach for Energy-Efficient Node

Clustering in Wireless Sensor Network. *Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi*, 20(2), 76. <https://doi.org/10.14203/jet.v20.76-81>

Prosiding Internasional

27. Aalsalem, M. Y., Khan, W. Z., Gharibi, W., & **Armi, N.** (2017). An intelligent oil and gas well monitoring system based on Internet of Things. *Proceeding - 2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET) 2017*. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2017.8253159>
28. Adoum, B. A., Fidel, F. M., Faustin, S., MOUNGACHE, A., & **Armi, N.** (2023). Federated Meta-Learning for task offloading and resource allocation in MEC-IoT. *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 122–128. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET60171.2023.10366780>
29. Arshad, M., Alsalem, M., Siddqui, F. A., Saad, N. M., **Armi, N.**, & Kamel, N. (2012). Data Fusion in Mobile Wireless Sensor Networks. In *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists: IMECS 2012: 14–16 March, 2012, the Royal Garden Hotel, Kowloon, Hong Kong*. Newswood Ltd.: International Association of Engineers. https://www.academia.edu/73607089/Data_Fusion_in_Mobile_Wireless_Sensor_Networks?auto=download
30. **Armi, N.**, Andiyani, A. N., Susilawati, H., & Wael, C. B. A. (2021). Comparative Study of the LEACH and LEACH-PSO Protocols on Wireless Sensor Networks. *Proceeding - 2021 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications: Managing the Impact of Covid-19 Pandemic: Together Facing Challenges Through Electronics and ICTs (ICRAMET) 2021*, 176–179. Bandung,

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Indonesia, 23–24 November 2021. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET53537.2021.9650502>

31. **Armi, N.**, Chaeriah, B. A. W., & Arshad, M. (2016). Spectrum sensing performance in cognitive radio system. *ICITACEE 2015 - 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering: Green Technology Strengthening in Information Technology, Electrical and Computer Engineering Implementation, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2015.7437834>
32. **Armi, N.**, Chaeriah, B. A. W., Mahmudin, D., Daud, P., & Arshad, M. (2016). Energy detector threshold under White Gaussian Noise channel in cognitive radio system. *ICITACEE 2015 - 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering: Green Technology Strengthening in Information Technology, Electrical and Computer Engineering Implementation, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2015.7437832>
33. **Armi, N.**, Chaeriah, B. A. W., Oktafiani, F., Suratman, F. Y., & Wijaya, A. (2017). Performance of energy detector with certain and uncertain noise in OFDM cognitive radio system. *Proceedings - 2016 International Electronics Symposium (IES) 2016*. <https://doi.org/10.1109/ELECSYM.2016.7861021>
34. **Armi, N.**, Chaeriah, B. A. W., Suratman, F. Y., & Wijaya, A. (2017). Sensing time-based throughput performance in OFDM cognitive radio system. *Proceedings - 2016: 2nd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*. <https://doi.org/10.1109/ICWT.2016.7870858>
35. **Armi, N.**, Gharibi, W., Khan, W. Z., Zangoti, H., Rizvi, S., & Wael, C. (2017). Error detection of malicious user attack in cognitive radio networks. *Proceeding - 2017 International*

Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET),. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2017.8253152>

36. **Armi, N., Saad, N. M., Yusoff, M. Z., & Arshad, M.** (2010). MAC protocol for opportunistic spectrum access in cognitive radio system. *2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA)*. <https://doi.org/10.1109/ISIEA.2010.5679452>
37. **Armi, N., Saad, N. M., Zuki, M. Y., & Arshad, M.** (2010). Cooperative spectrum sensing and signal detection in cognitive radio. *2010 International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*. <https://doi.org/10.1109/ICIAS.2010.5716151>
38. **Armi, N., & Sugiura, A.** (2004). SB-9-1 evaluation of quantization effects on w-cdma baseband processing (SB-9. Broadband wireless access techniques for the next generation wireless communications). *Proceedings of the IEICE General Conference, 2004(1), "SE-66"- "SE-67."* <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570009752484787200>
39. **Armi, N., Wael, C., Mitayani, A., Arief Suryadi, S., & Galih Nugraha, N.** (2019). Quantization effect on 5G millimeter wave communication. *2019 4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE)*. <https://doi.org/10.1109/ICITISEE48480.2019.9004026>
40. **Armi, N., Wael, C., Taufiqurrahman, Wijayanto, Y. N., Khan, W. Z., & Gharibi, W.** (2018). OFDM based signal detection performance in cognitive radio systems. *2018 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*. <https://doi.org/10.1109/ISRITI.2018.8864276>

41. **Armi, N., Wahab, M., & Asep Yudi, H.** (2015). Performance evaluation of energy detector in Cooperative Spectrum Sensing. *Proceedings of 2014 8th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA)*. <https://doi.org/10.1109/TSSA.2014.7065917>
42. **Armi, N., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M.** (2011a). Sensing and access over imperfect channel in opportunistic spectrum access system. *2011 National Postgraduate Conference (NPC) - Energy and Sustainability: Exploring the Innovative Minds*. <https://doi.org/10.1109/NatPC.2011.6136439>
43. **Armi, N., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M.** (2011b). Spectrum sensing and throughput performance in opportunistic spectrum access system. *2011 IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA)*. <https://doi.org/10.1109/ISWTA.2011.6089555>
44. **Armi, N., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M.** (2012). Decentralized cooperative user in opportunistic spectrum access system. *2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS): A Conference of World Engineering, Science and Technology Congress (ESTCON) - Conference Proceedings, I*. <https://doi.org/10.1109/ICIAS.2012.6306183>
45. **Armi, N., Yusoff, M. Z., & Saad, N. M.** (2013). Cooperative spectrum sensing in decentralized cognitive radio system. *IEEE EuroCon 2013*. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2013.6624974>
46. **Arshad, M., Kame, N., Saad, N. M., & Armi, N.** (2010). Performance enhancement of wireless sensor nodes for environmental applications. *2010 International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*. <https://doi.org/10.1109/ICIAS.2010.5716244>

47. Arshad, M., Saad, N. M., **Armi, N.**, Shujauddin, M., & Siddqui, F. A. (2011). Multi-frequency scenario within UMTS/3G. *13th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. 1.1614–1619. Gangwon, Korea (South), 13–16 February 2011. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5746113>
48. Arshad, M., Saad, N. M., Kamel, N., & **Armi, N.** (2011). Routing strategies in hierarchical cluster based mobile wireless sensor networks. *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering (InECCE)* 2011, 65–69. Kuantan, Malaysia, 21–22 June 2011. <https://doi.org/10.1109/INECCE.2011.5953851>
49. Wael, C. B. A., Armi, N., Mitayani, A., Kurniawan, D., Satyawan, A. S., & Subekti, A. (2020). Analysis of IEEE 802.11p MAC Protocol for Safety Message Broadcast in V2V Communication. *2020 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 320–324. Tangerang, Indonesia, 18–20 November 2020. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET51080.2020.9298654>
50. Daud, P., Heriana, O., Rahman, A. N., Pristianto, E. J., Mahmudin, D., Wijayanto, Y. N., Syamsi, D., & **Armi, N.** (2015). Concept development of Integrated Monitoring System model to support activities monitoring in the Border Region. *2015 International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA) 2015*, 60–64. Kuala Lumpur, Malaysia, 26–28 May 2015. <https://doi.org/10.1109/ICSSA.2015.7322511>
51. Daud, P., Sri, H., Mahmudin, D., Estu, T. T., Fathnan, A. A., Wijayanto, Y. N., & Armi, N. (2016). 1x2 Array of U-Slotted Rectangular Patch Antennas for HighSpeed LTE Mobile Networks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 105(1), International Conference on Engineering and Technology for Sustainable Development (ICET4SD) 2015*.

Yogyakarta, Indonesia, 11–12 November 2015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/105/1/012010>

52. Gharibi, W., Aalsalem, M., Khan, W. Z., **Armi, N.**, & Ghribi, W. (2017). Monitoring gas and oil fields with reliable wireless sensing and Internet of Things. *2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 188–191. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2017.8253173>
53. Hanifah, M., Nur, L. O., Taufiqqurrachman, **Armi, N.**, Sarief, I., & Munir, A. (2020). Experimental characterization of AMC-based thin tunable absorber using varactor diode. *Proceeding of 14th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)*, 1–4. Bandung, Indonesia, 4–5 November 2020. <https://doi.org/10.1109/TSSA51342.2020.9310855>
54. Hercuadi, A. Y., Armi, N., Sudrajat, N., & Adi, W. A. (2016). Calculation of complex permeability and permittivity on Lanthanum barium manganite materials at X-band frequency. *Proceedings of the 2015 4th IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 2015*. <https://doi.org/10.1109/APCAP.2015.7374462>
55. Mahmudin, D., Estu, T. T., Daud, P., **Armi, N.**, Wijayanto, Y. N., & Wiranto, G. (2015). Environmental liquid waste sensors using polymer multi-coupled ring resonators. Dalam *2015 International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA)*, 88–91. <https://doi.org/10.1109/ICSSA.2015.7322516>
56. Mardinata, V. A., Kurniawan, D., & **Armi, N.** (2021). Impact of Overloading Factor on MIMO-SCMA Systems. *Proceeding - 2021 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET): Managing the Impact of Covid-19 Pandemic: Together Facing*

Challenges Through Electronics and ICTs, 95–98. Bandung, Indonesia, 23–24 November 2021. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET53537.2021.9650474>

57. Mitayani, A., Nurkahfi, G. N., DInata, M. M. M., Mardiana, V. A., Wael, C. B. A., & **Armi, N.** (2019). Performance Analysis of Channel Effect on NC-OFDM Maritime Communication System in Indonesia Seas. *Proceedings - 2019 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 135–138. Tangerang, Indonesia, 23–24 October 2019. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET47453.2019.8980448>
58. Mitayani, A., Nurkahfi, G. N., Mardi Marta Dinata, M., Mardiana, V. A., **Armi, N.**, Ali Wael, C. B., & Suryadi Satyawati, A. (2020). Path Loss Model of the Maritime Wireless Communication in the Seas of Indonesia. *Proceeding - 2020 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications (ICRAMET)*, 97–101. Tangerang, Indonesia, 18–20 November 2020. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET51080.2020.9298652>
59. Numan, M., Subhan, F., Khan, W. Z., Assiri, B., & **Armi, N.** (2018). Well-organized bully leader election algorithm for distributed system. *Proceedings - 2018 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 5–10. Serpong, Indonesia, 1–2 November 2018. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2018.8683916>
60. Nurkahfi, G. N., Syambas, N. R., Mulyana, E., **Armi, N.**, Dayoub, I., Dogheche, E., Ahdan, S., Mayasari, R., Negara, R. M., & Nurhayati, A. (2022). Cross-Layer Design on Software Defined Vehicular Network(SDVN) based on Radio Access Technology(RAT) IEEE 802.11 bd to Improve End-to-End Communication Performance. *Proceeding of 8th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, 1–6. Yogyakarta, Indonesia, 21–22 July 2022.. <https://doi.org/10.1109/ICWT55831.2022.9935506>

61. Panji Kusuma Praja, M., Sulistyaningsih, Taufiqqurrachman, Desvasari, W., **Armi, N.**, & Munir, A. (2020). Design and Characterization of 1800MHz TM Mode Circular Waveguide Array Antenna for Energy Harvesting Application. *Proceeding - International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications (ICRAMET)*, 167–170. Tangerang, Indonesia, 18–20 November 2020.. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET51080.2020.9298605>
62. Prasetyo Adi, P. D., Mappadang, A., **Armi, N.**, Santiko, A. B., Adiprabowo, T., Suprpto, Zulkarnain, R., & Wirawan, A. (2023). Optimization and Development of Raspberry Pi 4 Model B for the Internet of Things. *IEEE 9th Information Technology International Seminar (ITIS)*, 1–6. Batu Malang, Indonesia, 18–20 October 2023. <https://doi.org/10.1109/ITIS59651.2023.10420261>
63. Rahman, S. M. A., **Armi, N.**, Abdelhag, M. E., Amin, S. T., & Eishah, H. A. (2023). Rapid and Efficient Facial Landmark Identification by Light and High Resolution Network using Artificial Intelligence. *2023 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 320–324. Bandung, Indonesia, 15–16 November 2023. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET60171.2023.10366566>
64. Ramadhan, R., **Armi, N.**, Magdalena, R., Nurkahfi, G. N., & Dinata, M. M. M. (2020). QoS Performance of Software Define Network Using Open Network Operating System Controller. *Proceeding - 2020 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications (ICRAMET)*, 124–128. Tangerang, Indonesia, 18–20 November 2020. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET51080.2020.9298662>
65. Reegu, F., Zada Khan, W., Mohd Daud, S., Arshad, Q., & **Armi, N.** (2020a). A Reliable Public Safety Framework for Industrial Internet of Things (IIoT). *2020 International Conference on Radar,*

Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET), 189–193. Tangerang, Indonesia, 18–20 November 2020. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET51080.2020.9298690>

66. Rizvi, S., Aziz, A., Jilani, M. T., **Armi, N.**, Muhammad, G., & Butt, S. H. (2017a). An investigation of energy efficiency in 5G wireless networks. *2017 International Conference on Circuits, System and Simulation (ICCSS)*, 142–145. London, UK, 14–17 July 2017. <https://doi.org/10.1109/CIRSYSSIM.2017.8023199>
67. Satyawan, A. S., Kurniawan, D., **Armi, N.**, & Wijayanto, Y. N. (2019). Room Map Estimation from Two-Dimensional Lidar's Point Cloud Data. *Proceedings - 2019 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 152–155. Tangerang, Indonesia, 23–24 October 2019. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET47453.2019.8980374>
68. Suyoto, S., Nurkahfi, G. N., Hamdani, M., Mardiana, V. A., Wael, C. B. A., Prini, S. U., **Armi, N.**, Mardiana, T., Ruhjana, N., Riyadi, A. A., & Bayhaqy, A. (2023). Time Synchronization for OFDM Systems Using the Symmetric Correlator-ELM Technique. *2023 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 206–209. Bandung, Indonesia, 15–16 November 2023. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET60171.2023.10366645>
69. Taryana, Y., Sulaeman, Y., Wahyu, Y., **Armi, N.**, Paramayudha, K., & Rojak, R. A. (2016). Design of two stage low noise amplifier using double stub matching network. *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing (ICARES)*, 1–5. Bali, Indonesia, 3–5 December 2015. <https://doi.org/10.1109/ICARES.2015.7429833>
70. Wael, C. B. A., **Armi, N.**, Miftahushudur, M. T., Amrullah, Y. S., & Sariningrum, R. (2018). NC-OFDM Transceiver design

for maritime cognitive radio. *Proceedings - 2018 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 117–120. Serpong, Indonesia, 1–2 November 2018. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2018.8683927>

71. Wael, C. B. A., **Armi, N.**, Miftahushudur, M. T., Muliawarda, D., & Sugandi, G. (2017). Power allocation in OFDM-based cognitive radio networks for fading channel. *Proceeding - 2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 184–187. Jakarta, Indonesia, 23–24 October 2017. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2017.8253172>
72. Wael, C. B. A., **Armi, N.**, & Rohman, B. P. A. (2016). PTS-based PAPR reduction in fixed WiMAX system with Grouping Phase Weighting (GPW). *Proceeding of the 2015 9th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA)*, 1–5. Bandung, Indonesia, 25–26 November 2015. <https://doi.org/10.1109/TSSA.2015.7440422>
73. Wael, C. B. A., **Armi, N.**, & Rohman, B. P. A. (2017). Spectrum sensing for low SNR environment using maximum-minimum eigenvalue (MME) detection. *Proceeding - 2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, (ISITIA)*, 435–438. Lombok, Indonesia, 28–30 July 2016. <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2016.7828699>
74. 1.Wael, C. B. A., **Armi, N.**, Rohman, B. P. A., & Miftahushudur, T. (2017). Performance analysis of sub-Nyquist sampling for Wideband spectrum sensing in cognitive radio. *Proceeding - 2016 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 152–156. Jakarta, Indonesia, 3–5 October 2016. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2016.7849603>

75. Wael, C. B. A., **Armi, N.**, & Sariningrum, R. (2016). Wideband spectrum sensing using Welch periodogram in cognitive radio. *Proceeding - 2015 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 104–108. Bandung, Indonesia, 5–7 October 2015. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2015.7380783>
76. Wael, C. B. A., Suyoto, **Armi, N.**, Satyawan, A. S., Sukoco, B. E., & Subekti, A. (2021). Performance of Regularized Zero Forcing (RZF) Precoding for Multiuser Massive MIMO-GFDM System over mmWave Channel. *Proceeding - 2021 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET) - Managing the Impact of Covid-19 Pandemic: Together Facing Challenges Through Electronics and ICTs*, 256–259. Bandung, Indonesia, 23–24 November 2021. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET53537.2021.9650347>
77. Wael, C. B. A., Suyoto, S., **Armi, N.**, Rohman, B. P. A., Kurniawan, D., Praludi, T., Satyawan, A. S., Subekti, A., & Adhi, P. (2022). Sparse Channel Estimation Using Orthogonal Matching Pursuit (OMP) for MIMO-OFDM System. *Proceeding-2022 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET): Emerging Science and Industrial Innovation in Electronics and Telecommunication*, 258–261. Bandung, Indonesia, 6–7 December 2022. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET56917.2022.9991205>
78. **Armi, N.**, & Akihiko, S. (2003). Quantization Effect of Baseband Process in Mobile Phone. *Proceedings of the IEICE General Conference 2003* (1), 469, 2003, March 03. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572543027312636416>

79. Andara, G., Arseno, D., & **Armi, N.** (2020). Analisis Kinerja Light Detecting And Ranging (LIDAR) untuk Deteksi Objek Menggunakan Metode Jarak Euclidean. *e-Proceeding of Engineering*, 17(3), 8864–8871. Universitas Telkom, Bandung, Indonesia.
80. Wijaya, A., Suratman, F. Y., & **Armi, N.** (2016). Pengaruh Waktu Sensing terhadap Kinerja Throughput dalam Sistem Cognitive Radio Networks. *e-Proceeding of Engineering*, 3(1), 225–232. Universitas Telkom, Bandung, Indonesia.
81. Karya, T. S., Lidyawati L., **Armi, N.** (2021). Pengaruh Warna Objek terhadap Jarak pada Implementasi Sistem Deteksi Objek Sensor Infrared Tingkat Berjalan Tunanetra. *Seminar Nasional Energi Telekomunikasi dan Otomasi (SNETO) 2021: Peranan Teknologi di Bidang Smart Grid, ICT-IoT dan Otomasi dalam menunjang Industri 4.0.*, 180–187. Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia, 16 Desember 2021. <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/sneto/article/view/731>
82. Aditya, M. I., Darlis, A. R., **Armi, N.** (2022). Implementasi Sistem Deteksi Jarak Kendaraan Menggunakan Sensor Ultrasonik. *Prosiding Diseminasi Fakultas Teknologi Industri Semester Genap 2021/2022. Institut Teknologi Nasional Bandung (ITENAS)*, Indonesia. <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/fti/article/view/1551/1304>
83. Taufik, R. R. , Hanuranto, A. T., **Armi, N.** (2023). Perancangan Media Pembelajaran Modulasi Digital (ASK, FSK, BPSK, QPSK, 16QAM) Berbasis Augmented Reality. *e-Proceeding of Engineering*, 8(6), 3678–3682. Universitas Telkom, Bandung, Indonesia.

84. Alghiffari, M. I., Muayyadi, A. A., & **Armi, N.** (2023). Simulasi dan Analisis Jaringan Ethernet Passive Optical Network (Epon) untuk Telkom. *e-Proceeding of Engineering*, 10(5), 4386–4391. Universitas Telkom, Bandung, Indonesia.
85. Ruslan, D. A., Muayyadi, A. A., & **Armi, N.** (2024). Distance Monitoring System Design To Reduce The Risk Of Losing Children Using Received Strength Signal Indicator. *e-Proceeding of Engineering*, 11(2), 1263–1268. Universitas Telkom, Bandung, Indonesia.

Paten

86. Giyana, R., F., **Armi, N.**, Kusuma, A. A. N. A., Pinastiko, W. S., Agastani, T., Xerandy, Irawan, D., Hamdani, M., Iqbal, M., Hartawan, A. R., Anggraeni, S. P., & Palokoto, T. B. (2023, 31 Agustus). Hak Cipta “Delay Packet Tester” (Nomor Permohonan: EC00202374398; Nomor Pencatatan: 000507351). <https://pdki-indonesia.dgip.go.id/detail/e1b-8c00f46ee4af18f52664ed190fa52d36e55511efc010b-949bc9c5fcbea9bd?nomor=EC00202374398&type=copyright&keyword=Delay%20Packet%20Tracer>

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data Pribadi

Nama	:	Dr. Nasrullah Armi, M.Eng
Tempat, Tanggal Lahir	:	Serang, 15 Desember 1973
Anak ke-	:	3 dari 4 Bersaudara
Jenis Kelamin	:	Laki-laki
Nama Ayah Kandung	:	Bayumi Thohir
Nama Ibu Kandung	:	Arini
Nama Istri	:	Mia Murtikasari
Jumlah Anak	:	2
Nama Anak	:	1. Muhammad Rafy Nasrullah 2. Haifa Varisha Fitri Nasrullah
Nama Instansi	:	Pusat Riset Telekomunikasi, Organisasi Riset Elektronika dan Informatika, BRIN
Judul Orasi	:	Optimasi Penginderaan Spektrum Pada Radio Kognitif Untuk Mengatasi Kelangkaan Frekuensi Dalam Komunikasi Nirkabel
Ilmu	:	Telekomunikasi
Bidang	:	Komunikasi Nirkabel
Kepakaran	:	Transmisi Telekomunikasi

No. SK Pangkat : Keppres No. 13/K
Terakhir tanggal 13 Juni 2023

No. SK Peneliti Ahli : KEPPRES No. 2/M
Utama tanggal 09 Januari 2023

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/ Universitas	Tempat/ Kota/ Negara	Tahun Lulus
1.	SD	YPWKS 1	Cilegon	1986
2.	SMP	Pulo Merak	Cilegon	1989
3.	SMA	Negeri 8	Bandung	1992
5.	S1	Institut Teknologi Nasional	Bandung	1997
6.	S2	Toyohashi University of Technology	Toyohashi, Japan	2004
7.	S3	Universiti Teknologi Petronas	Tronoh, Malaysia	2013

C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1	Latihan Prajabatan	Cirebon	1998
2.	Japanesse Course	UI/Jakarta/ Indonesia	2000
3.	Japanesse Course	ISI/Tokyo/Japan	2021

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
4.	Wireless communication and security	STEI ITB/Bandung/ Indonesia.	2006
5	Diklat Kepemimpinan Tingkat IV	Pusbindiklat LIPI Bogor	
6.	R3370 vector network analyzer training	Singapore	2007
7.	Biosensors and biophotonics workshop	ITRC/Taiwan	2007
8.	Metodologi Riset	UTP/Tronoh/Malaysia	2009
9.	Phased Array Radar & Pulse Compression Radar	LIPI/Bandung/ Indonesia	2015

D. Jabatan Struktural

No.	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1.	Kepala Sub Bidang Sarana Elektronika	LIPI	2004 – 2006
2	Kepala Sub Bidang Sarana Telekomunikasi	LIPI	2006 - 2008
2.	Kepala Bidang Sarana Penelitian	LIPI	2008 – 2009

No.	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
3.	Kepala Pusat Riset Telekomunikasi	BRIN	2022 – Sekarang

E. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Peneliti Ahli Muda	01-12-2008
2.	Peneliti Ahli Madya	01-08-2015
3.	Peneliti Ahli Utama	25-01-2023

F. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1.	Peneliti Paska Doktoral	Jazan University, KSA	2016 – 2018
2.	Dosen dengan NIDK	Telkom University	2019 – Sekarang
3.	Visiting Researcher	Université Polytechnique Hauts-de-France	5-21 Oktober, 2024

Buku ini tidak diperjualbelikan.

G. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1	IEICE Conference	Pemakalah	IEICE (Tohoku, Japan)	2003
2	IEICE Conference	Pemakalah	IEICE (Tokyo, Japan)	2004
3	ISIEA	Pemakalah	IEEE (Malaysia)	2010
4	ICIAS	Pemakalah	IEEE (Kuala Lumpur/Malaysia)	2010
5	ISWTA	Pemakalah	IEEE (Langkawi, Malaysia)	2011
6	NPC Con- ference	Pemakalah	IEEE (Tronoh, Malaysia)	2011
7	ICIAS	Pemakalah	IEEE (Kuala Lumpur/Malaysia)	2012
8	Seminar IPTEK Nasional	Pemakalah	LIPI (Jogja, Indo- nesia)	2013
9	Workshop Security	Nara Sum- ber	Lembaga Sandi Negara	2014
10	TSSA	Pemakalah	IEEE (Bali, Indonesia)	2014
11	ICITACEE	Pemakalah	IEEE (Semarang, Indonesia)	2015
12	IES	Pemakalah	IEEE (Bali, Indonesia)	2016

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
13	ICWT	Pemakalah	IEEE (Yogya, Indonesia)	2016
14	Vehicular Ad-Hoc Networks for Smart Cities Workshop	Committee & Reviewer	Springer	2016
15	ICRAMET	Pemakalah	IEEE (Jakarta, Indonesia)	2017
16	ICCEREC	Keynote Speaker	IEEE (Bandung, Indonesia)	2018
17	ICRAMET	Pemakalah	IEEE (Bandung, Indonesia)	2021
18	Studium General	Nara Sumber	ITENAS (Band- ung, Indonesia)	2022
19	Studium General	Nara Sumber	ITERA (Lam- pung, Indonesia)	2023
20	Seminar POLMAN	Nara Sumber	Politeknik Manu- faktur Bandung	2024
21	Interna- tional Virtual Courses - Intelligent Transport System	Nara Sumber	STEI ITB	

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
22	Kuliah Umum – Intelligent Transport System	Nara Sumber	UPI Purwakarta	2024
23	Focus Group Discussion - IoT	Nara Sumber	Pusat Riset Geoinformatika BRIN	2024

H. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
1.	INKOM	LIPI	Editor	2014–2016
2.	Elektronika & Telekomunikasi	LIPI	Editor	2013–Sekarang
3.	TEKTRIKA	Telkom University	Reviewer	2019– Sekarang
4.	IEEE Transaction on Wireless Communication	IEEE	Reviewer	2015–2016
5.	Wireless & Mobile Computing	Wiley	Reviewer	2015–2016

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
6	Computational Intelligence and Neuroscience	Hindawi	Reviewer	2021–2022

I. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	-
2.	Bersama Penulis Lainnya	87
	Total	87

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	12
2.	Bahasa Inggris	74
3	Bahasa Japan	1
	Total	87

J. Pembinaan Kader Ilmiah

Pejabat Fungsional Peneliti

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Chaeriah bin Ali Wael	BRIN	Pembimbing	2015-2022

2.	Galih Nugraha Nurkahfi	BRIN	Pembimbing	2018-2023
3.	Arumjeni Mitayani	BRIN	Pembimbing	2018-2022
4.	Mochamad Mardi Marta Dinata	BRIN	Pembimbing	2018-2022
5.	Vita Awalia Mardiana	BRIN	Pembimbing	2018-2020

Mahasiswa

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Hendry Cahyo	ITENAS	Pembimbing	2013
2.	Bayu Angga	ITENAS	Pembimbing	2013
3.	Angga Wijaya	Telkom University	Pembimbing	2016
4.	Merlyn Inova Christie Latukolan	Telkom University	Pembimbing	2019
5.	Giovano Andara	Telkom University	Pembimbing	2020
6	Fakkar Shohwal Islam Fathani	Telkom University	Pembimbing	2021
7	Riyan Ary Yanto	Telkom University	Pembimbing	2022
8	Riz-Riz Rahmat Taufik	Telkom University	Pembimbing	2022

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
9	Galih Nugraha Nurkahfi	ITB	Pembimbing (S3)	2022
10	Dimas Anugrah Ruslan	Telkom University	Pembimbing	2023
11	Muhammad Irfan Alghiffari	Telkom University	Pembimbing	2023
12	Nando Irawan Alsha	Telkom University	Pembimbing	2023
13	Aurellia Kartika Estiningtyas	Telkom University	Pembimbing	2023
14	Mila Puspasari Saputra	Telkom University	Pembimbing	2023
15	Wina Ayu Lestari	Telkom University	Pembimbing	2023
16	Rivo Dwi Yulianto	Telkom University	Pembimbing	2023
17	Bimo Wiko	Telkom University	Pembimbing	2024
18	Aufa Rachman Dzakky	Telkom University	Pembimbing	2024
19	Ridho Armanda	Telkom University	Pembimbing	2024
20	Muhammad Iqbal Ghazali	Telkom University	Pembimbing	2024
21	Moh. Irsyad Helmy	Telkom University	Pembimbing	2024
22	Hertini Wulandari H	Telkom University	Pembimbing	2024

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
23	Rio Novlensra	Telkom University	Pembimbing	2024
24	Prasetio Putranto	Université Polytechnique Hauts-de-France	Pembimbing (S3 DbR)	2024
25	Chaeriah bin Ali Wael	Université Polytechnique Hauts-de-France	Pembimbing (S3 DbR)	2023
26	Galih Nugraha Nurkahfi	STEI ITB	Pembimbing (S3 DbR)	2021

K. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	IEICE	2002 – 2024
2.	Anggota	IEEE Japan	2002 – 2004
3.	Anggota	IEEE Malaysia	2010 – 2013
4.	Anggota	IEEE Indonesia	2015 – Sekarang
5.	Anggota	PPI/Himpenindo	2018 – Sekarang

L. Tanda Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden RI	01-08-2008
2.	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden RI	30-07-2018

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Jumlah pengguna perangkat nirkabel yang meningkat, diikuti dengan jenis-jenis layanan komunikasi data yang beragam dengan fitur cerdas yang dibutuhkan masyarakat, membuat sumber daya spektrum frekuensi semakin langka.

Padatnya pengguna disatu rentang frekuensi tertentu, namun minim pengguna di rentang frekuensi lainnya membuat penggunaan spektrum frekuensi menjadi tidak efisien. Untuk itu dibutuhkan sebuah teknologi akses spektrum yang dinamis, yang memungkinkan pengguna berpindah dari satu frekuensi tertentu ke rentang frekuensi lainnya tanpa perubahan dari sisi perangkat keras.

Teknologi penginderaan dan akses spektrum dinamis merupakan solusi terhadap kelangkaan spektrum. Terdapat 2 metode dalam teknologi penginderaan dan akses spektrum dinamis, yakni lapisan bawah (*underlay*) dan lapisan atas (*overlay*). Metode lapisan bawah sering kita kenal dengan teknik komunikasi *ultra-wideband*. Pada teknik ini, pengguna komunikasi nirkabel dapat menempati spektrum frekuensi lebar dengan ketentuan bahwa daya transmisi berada dibawah batas yang sudah ditentukan sehingga tidak mengganggu pengguna komunikasi nirkabel lainnya. Sementara metode lapisan atas, pengguna dapat menggunakan spektrum frekuensi dengan daya transmisi melebihi nilai batas, namun dengan ketentuan bahwa spektrum frekuensi tidak digunakan oleh pengguna komunikasi nirkabel lainnya. Metode penginderaan dan akses lapisan atas ini sering dikenal dengan sistem radio kognitif.

Penginderaan spektrum menjadi hal yang paling krusial dan penting dalam radio kognitif. Pengembangan teknik penginderaan spektrum terus dilakukan sejak munculnya sistem radio kognitif yang diproyeksikan dapat mengatasi kelangkaan spektrum. Kegiatan riset teknik penginderaan spektrum tidak hanya dilakukan pada lapisan fisik saja, tapi juga pada lapisan MAC yang tidak hanya fokus pada deteksi ketersediaan spektrum, namun juga mempertimbangkan strategi akses dalam meningkatkan kinerja komunikasi. Prinsipnya bahwa penginderaan spektrum harus dilakukan dengan efektif agar menghasilkan akurasi data spektrum kosong yang tinggi dengan efisien (waktu penginderaan, konsumsi daya, dan kompleksitas).

