

Komunikasi Kooperatif D2D dengan Bantuan UAV Berbasis AF/DF Multi Relay Dengan Dampak *Hardware Impairment*

Annysa Aprilia¹⁾, Meyra Chusna Mayarakaca²⁾, Arifin³⁾, Faridatun Nadziroh⁴⁾, Yoedy Moegiharto⁵⁾

Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Jl. Raya ITS, Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur

¹⁾annysapriya@te.student.pens.ac.id

²⁾meyrachus@te.student.pens.ac.id

³⁾arifin@pens.ac.id

⁴⁾faridatun@pens.ac.id

⁵⁾ymoegiharto@pens.ac.id

Abstract

This work investigates the implementation of hybrid AF and DF relay protocols in D2D multi-relay wireless communication systems. To obtain system performance we propose four scenarios for using the AF and DF relay protocols and three S – R and R – D distance conditions that have an impact on system performance in terms of throughput values. From the simulation results it is concluded that the R – D distance will produce the highest SNR value which produces the best system throughput value compared to . The simulation results also prove that applying the AF relay protocol to all relays produces better SNR values and better throughput values than applying the DF relay protocol. Simulation results with the impact of hardware impairment (HI) levels show that system performance in the first scenario is actually worse than other scenarios when the κ value is above 0.1.

Keywords: D2D communication, hybrid AF and DF, throughput.

1. Pendahuluan

Komunikasi *Device-to-Device* (D2D) adalah model sistem baru yang dapat memenuhi tuntutan kecepatan data yang tinggi, efisiensi energi, dan efisiensi spektrum yang baik. [1]. Komunikasi D2D memungkinkan dua atau lebih pengguna D2D untuk berkomunikasi secara langsung tanpa partisipasi *base station* eNB yang mendukung efisiensi spektrum dan latensi rendah [2]. Pada sistem komunikasi D2D terdapat dua skema pembagian spektrum yaitu skema *in-band* dan *out-band* atau *licensed* dan *unlicensed spectral* [3]-[5]. Pengguna D2D dan pengguna seluler pada skema *in-band* berbagi spektrum yang sama, sedangkan pada skema *out-band*, pengguna D2D dan seluler menempati spektrum yang berbeda.

Sementara itu, komunikasi kooperatif merupakan sistem MIMO virtual yang telah dipelajari dan dianalisis secara luas dan dapat menghasilkan kinerja yang sama dengan sistem MIMO sebenarnya. Dengan skema kooperatif, satu atau lebih pengguna relai (dilambangkan R) mengirim data secara kooperatif dengan pengguna pemancar (S) ke pengguna penerima di node tujuan (dilambangkan D). Terdapat dua protokol relay dasar yang dikenal sebagai protokol *Amplify and Forward* (AF) dan *Decode and Forward* (DF) [6]. Protokol-protokol ini adalah metode bagaimana sinyal diproses di relai sebelum diteruskan ke tujuan. Protokol relai AF, beroperasi dengan memperkuat sinyal yang masuk di node relai dan kemudian meneruskannya ke tujuan. Protokol relai DF, melibatkan terminal relai yang mendekode sinyal yang diterima sebelum mentransmisikan sinyal yang dikodekan ulang tersebut ke penerima yang

ditunjuk. Proses *decoding* ini memungkinkan relai untuk mengekstraksi dan menginterpretasikan informasi asli yang tertanam di dalam sinyal sebelum menyampaikannya untuk memastikan akurasi dan keandalan transmisi yang optimal. Pemanfaatan skema kooperatif pada sistem komunikasi D2D juga menarik minat banyak peneliti. Dalam makalah [7] penulis mengusulkan algoritma kontrol daya pada sistem komunikasi D2D yang mendasari dengan skema relai AF dua arah untuk memperluas jangkauan komunikasi D2D. Dari hasil simulasi dapat ditunjukkan bahwa algoritma kontrol daya yang diusulkan meningkatkan kinerja saluran komunikasi D2D pada minimum rata-rata pengguna D2D. Makalah [8] mengusulkan komunikasi D2D di band mmWave dengan protokol relai DF. Dan metode pemilihan relai berdasarkan algoritma DRS diusulkan untuk memilih relai terbaik untuk bertukar sinyal informasi. Dari hasil simulasi dapat dibuktikan keefektifan skema relai DF yang diusulkan. Makalah [9] mempelajari implementasi nyata dari sistem komunikasi kooperatif D2D pada Aplikasi Kesehatan Seluler. Untuk sistem layanan kesehatan seluler, relai memiliki keandalan dan node relai adalah poin penting. Penulis mengusulkan algoritma pemilihan relai berdasarkan algoritma RSCF kompromi untuk memilih relai dan relai yang dapat meningkatkan keandalan transmisi data medis. Dari hasil simulasi dapat diverifikasi bahwa algoritma RSCF dapat memilih relai yang sangat meningkatkan tingkat transmisi dan keandalan.

Konsumsi energi merupakan tantangan lain dalam jaringan nirkabel berikutnya dan teknologi pemanenan energi adalah teknik baru untuk memecahkan masalah konsumsi energi. Radio

frequency energy harvesting (RF-EH) atau *radio frequency wireless power transfer* (WPT), merupakan salah satu teknologi pemanenan energi [10]-[13]. Kemudian teknik pemanenan energi berbasis RF baru, disebut informasi simultan dan transfer daya (SWIPT) diperkenalkan, dimana sinyal RF membawa energi dan informasi secara bersamaan [14][15]. Di SWIPT, sinyal yang diterima dibagi menjadi bagian pemanenan energi dan bagian *decoding* informasi dan dua protokol yaitu *time switching protocol* (TS) dan *power-splitting protocol* (PS) telah diperkenalkan. RF-EH adalah teknik yang cocok untuk komunikasi D2D karena perangkat D2D biasanya berukuran kecil dengan energi baterai yang terbatas. Oleh karena itu untuk memperpanjang masa pakai baterai, perangkat D2D harus dilengkapi dengan rangkaian yang sesuai untuk mengubah sinyal RF menjadi arus DC dan mengisi ulang baterai. Implementasi RF-EH dan protokol relai pada sistem komunikasi D2D dipelajari [16]-[19]. Dalam paper [16] penulis mengusulkan protokol *time division duplexing* (TDD) sebagai mekanisme untuk mengontrol interferensi dengan skema *fixed* (FTP) dan *adaptive transmission probabilities* (ATP) dan *RF Energy Harvesting* pada komunikasi D2D. Dengan skema ATP, pengguna D2D dapat mengontrol interferensi di antara pengguna D2D dengan menggunakan kemampuan penginderaan salurannya. Dari hasil dapat ditunjukkan bahwa probabilitas *outage* dan D2D *sum-rate* dari sistem sangat dipengaruhi oleh kanal sensing dari skema ATP. Dalam makalah [17] penulis mengusulkan komunikasi D2D *two-way relaying* (TWR) mendasari jaringan selular. Relai menggunakan protokol pemisahan daya (PS) untuk memanen energi. Dari hasil tersebut dapat dibuktikan bahwa pemanfaatan radio RF-EH dalam komunikasi TWR D2D bermanfaat. Algoritma penjadwalan tautan terdistribusi EHLinQ untuk sistem komunikasi D2D diusulkan dalam makalah [18]. Perangkat D2D memanen energi dari sinyal RF yang diterima RF-EH dari tautan transmisi lainnya. Algoritma penjadwalan terdistribusi diusulkan karena penerapan RF-EH pada komunikasi D2D mengakibatkan penjadwalan tautan menjadi lebih rumit. Dengan algoritma HLiQ, tautan D2D dapat menentukan penjadwalannya secara terdistribusi dan hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma EHLinQ meningkatkan kinerja sistem dan persyaratan QoS.

Selain *base station* (BS), *power beacon* (PB), atau perangkat D2D lainnya sebagai sumber sinyal RF, UAV dapat dianggap sebagai *mobile* BS untuk mendukung proses RF-EH pada sistem komunikasi D2D, terutama di area infrastruktur jaringan nirkabel. belum dibangun atau rusak. Beberapa studi tentang komunikasi D2D jaringan yang dibantu UAV dengan strategi pemanenan energi dilaporkan dalam [19]-[21]. Dalam makalah [19] penulis menyelidiki masalah alokasi sumber daya untuk

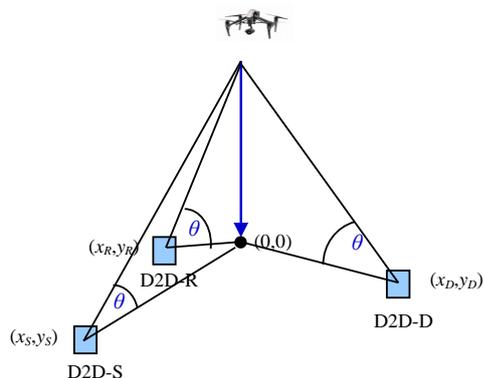
komunikasi D2D di Jaringan yang dibantu UAV. Beberapa pasangan D2D memanen energi menyanyikan model panen-transmisi-penyimpanan umum dari sinyal RF yang ditransmisikan oleh UAV. Setelah merumuskan masalah optimisasi non-cembung, algoritma alokasi sumber daya yang efisien dirancang untuk memaksimalkan kinerja *throughput* rata-rata sistem. Makalah [20] menyelidiki pemanenan energi (EH) pada beberapa jaringan yang dibantu relai UAV dalam *system Internet of Things* (IoT). Pemilihan relai oportunistik dan strategi pemilihan relai parsial digunakan untuk memilih relai UAV terbaik untuk meneruskan sinyal dari sumber D2D ke tujuan D2D. Serta protokol TS dan PS EH diterapkan di setiap UAV. Penulis mengusulkan skema optimisasi bersama dengan beberapa parameter misalnya strategi pemilihan relai UAV, daya pancar, dan faktor penskalaan untuk meningkatkan *throughput sistem* dan mengurangi probabilitas *outage*. Dalam makalah [21] penulis mengusulkan kerangka kerja yang menerapkan strategi pemanenan energi dan teknik pengelompokan yang disempurnakan (CFT) di daerah bencana. Strategi EH digunakan untuk memperpanjang masa pakai baterai UE dan menjaga agar jaringan nirkabel tetap beroperasi selama bencana. Hasil simulasi membuktikan bahwa kerangka yang diusulkan optimal jika UE tersebar luas di daerah bencana. Dalam makalah [21] penulis mengusulkan kerangka kerja yang menerapkan strategi pemanenan energi dan teknik CFT di daerah bencana. Namun jaringan nirkabel pada makalah [21] menggunakan BS bukan UAV sebagai sumber energi untuk mendukung EH.

Dalam kasus khusus UAV dapat digunakan sebagai BS terbang untuk mendukung RF-EH pada sistem komunikasi D2D. Dalam penelitian ini diasumsikan komunikasi D2D sebagai komunikasi antar sensor di area bencana. Dan ada objek penghalang antara pemancar dan penerima D2D sehingga penerima D2D tidak menerima sinyal langsung dari pemancar D2D. Oleh karena itu pemancar D2D lainnya akan bekerja sama untuk menerima sinyal dari pemancar D2D kemudian meneruskannya ke penerima D2D. Kami juga menganggap tidak semua relai D2D bekerja dengan protokol relai AF atau DF yang sama, sehingga kami mengusulkan sistem multi relai komunikasi kooperatif D2D dengan protokol relai AF dan DF.

Tujuan dari makalah ini adalah untuk menemukan protokol relai yang lebih baik untuk meneruskan sinyal dengan mengusulkan empat skenario konfigurasi dengan tiga relai. Kinerja sistem disajikan dalam kurva *throughput* dengan menerapkan strategi RF-EH *hybrid*.

2. Metode Penelitian

2.1. Gain Kanal Saluran UAV-D2D



Gambar 1. Model kanal antara UAV – D2D user

Kami mengasumsikan UAV terletak di titik asal sistem koordinat Cartesian. Gain saluran UAV ke pengguna D2D yang dikenal sebagai model kanal air-to-ground (ATG) berbeda dengan gain saluran *ground-to-ground*. Saluran ATG dicirikan oleh tautan LoS dan NLoS, sudut elevasi antara pengguna UAV dan D2D di darat, dan ketinggian UAV [22]-[24] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Sehingga gain saluran dari UAV ke D2D-S dapat ditulis sebagai,

$$h_{US}(x, y) = P_{UAV,LoS} \times \left(\sqrt{(x^S - x^{UAV})^2 + (y^S - y^{UAV})^2 + h^2} \right)^{-m} + P_{UAV,NLoS} \times \alpha \left(\sqrt{(x^S - x^{UAV})^2 + (y^S - y^{UAV})^2 + h^2} \right)^{-m} \quad (2-1)$$

dimana, $P_{UAV,LoS}$, $P_{UAV,NLoS}$, masing-masing adalah probabilitas saluran LoS, dan NLoS. x_S , x_R , y_S , y_R adalah korrdrinat lokasi horizontal dari D2D-S and D2D-R. Lokasi horizontal UAV diasumsikan sebagai titik asal (0,0) dari koordinat Cartesian. m_u dan α adalah eksponen path loss dari UAV ke pengguna D2D, dan n tenn pelemahan karena saluran NLoS. Probabilitas LoS dapat dituliskan sebagai [12],

$$P_{UAV,LoS} = \frac{1}{1 + a \exp(-b[\theta - a])} \quad (2-2)$$

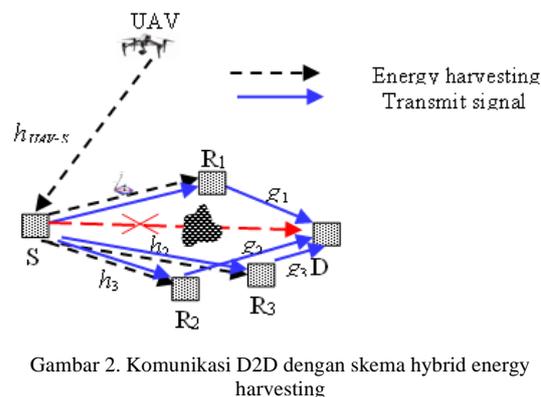
$$P_{UAV,NLoS} = 1 - P_{UAV,LoS} \quad (2-3)$$

dan sudut elevasi antara node S dan R posisi UAV dinyatakan,

$$\theta = \frac{180}{\pi} \times \sin^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{(x^S - x^{UAV})^2 + (y^S - y^{UAV})^2 + h^2}} \right) \quad (2-4)$$

dimana, a dan b adalah parameter saluran untuk lingkungan perkotaan yang dipengaruhi oleh kepadatan dan ketinggian bangunan dan lebar jalan. Kami menotasikan S, R, dan D sebagai D2D-S, D2D-R, dan D2D-D.

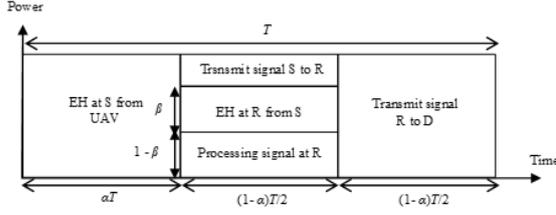
2.2. Skema Energy Harvesting Hybrid TS-PS



Gambar 2. Komunikasi D2D dengan skema hybrid energy harvesting

Kami mengusulkan sistem model multi relai komunikasi kooperatif D2D yang terdiri dari satu sumber D2D (S), tiga relai D2D I dan satu tujuan D2D (D) tanpa transmisi langsung antara S ke D seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Kami memperkenalkan skema pemanenan energi *hybrid* di mana setiap R memanen energi dari S, sedangkan S memanen energi dari UAV. Setiap perangkat R, S dan D dilengkapi satu antena, dan masing-masing R bekerja pada mode *half duplex* (HD). Dengan menggunakan daya yang dipanen, setiap R dapat meneruskan sinyal yang diterima ke D menggunakan protokol AF atau protokol DF. Sehingga D menerima sinyal penjumlahan dari tiga sinyal yang diperkuat sama dari tiga R ketika semua R menggunakan protokol relai AF. Atau D menerima penjumlahan sinyal yang diperkuat dan didekode ketika satu atau dua dari tiga R menggunakan protokol relai AF dan DF.

Untuk mengimplementasikan *hybrid* RF-EH, kami membagi satu *frame* waktu menjadi tiga slot waktu. Selama slot waktu pertama, S memanen energi dari sinyal RF yang ditransmisikan oleh UAV. Dan kemudian selama slot waktu kedua $(1 - \alpha)T/2$ S menggunakan seluruh daya yang dipanen ini untuk mengirim sinyal informasi ke R_i , ($i = 1, 2, 3$) sehingga S menggunakan protokol time switching (TS). Juga selama slot waktu kedua, $(1 - \alpha)T/2$ penerima setiap R memanen energi dengan β bagian dari sinyal yang diterima dari S dan memproses sinyal yang diterima dengan $(1 - \beta)$ bagian. Kemudian daya yang dipanen digunakan oleh masing-masing R untuk meneruskan sinyal ke D selama slot waktu ketiga $(1 - \alpha)T/2$ dengan demikian setiap R menggunakan protokol power splitting (PS) untuk memanen energi. Sementara selama slot waktu ketiga S tetap diam. Skema ini kami sebut sebagai skema pemanenan energi radio frekuensi hybrid TS-PS, seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hybrid radio frequency energy harvesting (RF-EH)

Energi yang dipanen di S selama slot waktu pertama dapat ditulis sebagai,

$$E_S = \eta_S P_{UAV} |h_{UAV-S}|^2 \alpha T \quad (2-5)$$

Dan daya yang ditransmisikan di S, dari proses pemanenan energi pada time slot kedua dengan menggunakan protokol *time switching* dapat ditulis sebagai,

$$P_S = \frac{E_S}{(1-\alpha)T/2} = \eta_S P_{UAV} |h_{UAV-S}|^2 \left(\frac{\alpha}{(1-\alpha)/2}\right) \quad (2-6)$$

dimana P_{UAV} , h_{UAV-S} , η_S and α adalah daya pancar UAV, koefisien kanal dari saluran UAV-S, faktor energi konversi dari modul konversi yang diterima di S, dan faktor peralihan waktu.

Dan energi yang dipanen pada R dengan menggunakan protokol *power splitting* (PS) selama slot waktu kedua, dapat ditulis sebagai,

$$E_{R_i} = \eta_{R_i} \beta P_S |h_i|^2 d_{Si}^{-m} (1-\alpha)T/2 \quad (2-7)$$

dimana η_{R_i} dan β , $0 \leq \beta \leq 1$ adalah energi konversi faktor dari modul konversi yang diterima di *i*-th R, dan faktor pemisahan daya h_i , d_{Si} dan m adalah koefisien kanal dari saluran S – *i*th R, jarak antara S – *i*th R dan eksponen *path loss*. h_i dan $(|h_i|^2 d_{Si}^{-m})$ adalah koefisien gain daya kanal saluran S – *i*th R. Model saluran antara S – *i*th R adalah model kanal Rayleigh fading. Dan daya yang ditransmisikan pada *i*th R atau $P_{\{R_i\}}$ sebagai hasil dari proses pemanenan energi dengan menggunakan protokol pemisahan daya ditulis sebagai berikut,

$$P_{R_i} = \frac{E_{R_i}}{(1-\alpha)T/2} = \eta_{R_i} \beta P_S |h_i|^2 d_{Si}^{-m} \quad (2-8)$$

2.3. Transmisi Sinyal Informasi

Sinyal yang diterima di *i*th R pada slot waktu kedua dapat ditulis sebagai,

$$y_{SR_i} = \sqrt{(1-\beta)P_S d_{Si}^{-m}} h_i x_S + n_{R_i} \quad (2-9)$$

dimana x_S , dan n_{R_i} adalah sinyal yang ditransmisikan dari S yang memiliki daya unit konstan dan kebisingan (noise) AWGN yang dipengaruhi oleh antena di *i*th R, dengan rata-rata nol dan varians N_0 .

A. Skenario pertama, ketiga R menggunakan protokol relai AF

Seluruh R menerapkan protokol amplifikasi dan teruskan (AF) untuk memproses sinyal informasi sebelum diteruskan ke D. Kemudian dengan protokol relai AF, sinyal yang diperkuat dari *i*-th R yang diteruskan ke D dapat ditulis sebagai,

$$x_{R_i} = A_i y_{SR_i} \quad (2-10)$$

dimana A_i adalah faktor yang diperkuat,

$$A_i = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta)P_S d_{Si}^{-m} |h_i|^2 + N_0}} \quad (2-11)$$

Sinyal yang diterima di D pada slot waktu ketiga dapat ditulis sebagai,

$$y_D = \sum_{i=1}^3 \sqrt{P_{R_i}} \sqrt{d_{id}^{-m}} g_i x_{R_i} + n_D \quad (2-12)$$

dimana, $d_{id} = \sqrt{(x_{ri} - x_d)^2 + (y_{ri} - y_d)^2}$, (x_d, y_d) , g_i and $(|g_i|^2 d_{id}^{-m})$ adalah jarak antara *i*th R to D, lokasi horizontal D, koefisien saluran dan penguatan daya saluran S – *i*th R link masing-masing.

$$y_D = \sqrt{P_{R_1}} \sqrt{d_{1d}^{-m}} g_1 x_{R_1} + \sqrt{P_{R_2}} \sqrt{d_{2d}^{-m}} g_2 x_{R_2} + \sqrt{P_{R_3}} \sqrt{d_{3d}^{-m}} g_3 x_{R_3} + n_D$$

$$y_D = \sqrt{P_{R_1}} \sqrt{d_{1d}^{-m}} g_1 A_1 (\sqrt{(1-\beta)P_S d_{s1}^{-m}} h_1 x_S + n_{R_1}) + \sqrt{P_{R_2}} \sqrt{d_{2d}^{-m}} g_2 A_2 (\sqrt{(1-\beta)P_S d_{s2}^{-m}} h_2 x_S + n_{R_2}) + \sqrt{P_{R_3}} \sqrt{d_{3d}^{-m}} g_3 A_3 (\sqrt{(1-\beta)P_S d_{s3}^{-m}} h_3 x_S + n_{R_3}) + n_D \quad (2-13)$$

dimana, d_{id} dan n_D adalah jarak antara *i*th R – D, dan AWGN yang dipengaruhi oleh antena dengan rata-rata nol dan varians N_0 . Sedangkan $(|h_{id}|^2 d_{id}^{-m})$ adalah koefisien saluran *i*th R – D link. Berdasarkan persamaan (2 – 13) nilai SNR sesaat pada D dapat didefinisikan sebagai,

$$\gamma_D = \frac{\sum_{i=1}^3 (P_{R_i} d_{id}^{-m} |g_i|^2 A_i^2 (1-\beta) P_S d_{s1}^{-m} |h_i|^2)}{\sum_{i=1}^3 (P_{R_i} d_{id}^{-m} |g_i|^2 A_i^2 N_0) + N_0}$$

$$\gamma_D = \sum_{i=1}^3 \frac{P_{R_i} G_{id} A_i^2 (1-\beta) P_S H_{si}}{P_{R_i} G_{id} A_i^2 N_0 + N_0} = \sum_{i=1}^3 \frac{P_{R_i} G_{id} (1-\beta) P_S H_{si}}{\left(\frac{P_{R_i} G_{id} + \frac{1}{A_i^2}}{N_0}\right)} \quad (2-14)$$

dimana $G_{id} = d_{id}^{-m} |g_i|^2$, $H_{si} = d_{s1}^{-m} |h_i|^2$ dan $N_0 = \sigma_{r_i}^2 = \sigma_D^2$.

B. Skenario kedua, dua R menggunakan protokol relai AF dan satu R menggunakan protokol relai DF

Dua R menerapkan protokol AF dan satu R menerapkan protokol DF untuk memproses sinyal informasi sebelum diteruskan ke D. Kemudian dengan protokol relai AF, sinyal yang diperkuat dari *i*-th R yang diteruskan ke D dituliskan pada (2 – 10), sedangkan sinyal yang dikirimkan dengan protokol relai DF dituliskan sebagai,

$$x_{R(DF)} = x_S \quad (2-15)$$

$$y_D = \sqrt{P_{R_1}} \sqrt{d_{1d}^{-m}} g_1 x_S + \sum_{i=2}^3 \sqrt{P_{R_i}} \sqrt{d_{id}^{-m}} g_i x_{R_i} + n_D$$

$$y_D = \sqrt{P_{R_1}} \sqrt{d_{1d}^{-m}} g_1 x_S + \sqrt{P_{R_2}} \sqrt{d_{2d}^{-m}} g_2 A_2 (\sqrt{(1-\beta)P_S d_{S2}^{-m}} h_2 x_S + n_{R_2}) + \sqrt{P_{R_3}} \sqrt{d_{3d}^{-m}} g_3 A_3 (\sqrt{(1-\beta)P_S d_{S3}^{-m}} h_3 x_S + n_{R_3}) + n_D \quad (2-16)$$

Berdasarkan persamaan (2 - 16) nilai SNR sekuat pada D dapat didefinisikan sebagai,

$$\gamma_D = \frac{P_{R_1} d_{1d}^{-m} g_1^2 + \sum_2^3 (P_{R_i} d_{id}^{-m} |g_i|^2 A_i^2 (1-\beta) P_S d_{Si}^{-m} |h_i|^2)}{\sum_2^3 (P_{R_i} d_{id}^{-m} |g_i|^2 A_i^2 N_0) + N_0}$$

$$\gamma_D = \frac{P_{R_1} G_{1d} + \sum_2^3 (P_{R_i} G_{id} A_i^2 (1-\beta) P_S H_{Si})}{\sum_2^3 (P_{R_i} G_{id} A_i^2 N_0) + N_0} \quad (2-17)$$

dimana $G_{id} = d_{id}^{-m} |g_i|^2$, $H_{Si} = d_{Si}^{-m} |h_i|^2$ dan $N_0 = \sigma_{r_i}^2 = \sigma_D^2$.

C. Skenario ketiga, satu R menggunakan protokol relai AF dan dua R menggunakan protokol relai DF

$$y_D = \sqrt{P_{R_1}} \sqrt{d_{1d}^{-m}} g_1 x_{R_1} + \sum_{i=2}^3 \sqrt{P_{R_i}} \sqrt{d_{id}^{-m}} g_i x_S + n_D$$

$$y_D = \sqrt{P_{R_1}} \sqrt{d_{1d}^{-m}} g_1 A_1 (\sqrt{(1-\beta)P_S d_{S1}^{-m}} h_1 x_S + n_{R_1}) + \sqrt{P_{R_2}} \sqrt{d_{2d}^{-m}} g_2 x_S + \sqrt{P_{R_3}} \sqrt{d_{3d}^{-m}} g_3 x_S + n_D$$

$$y_D = \sqrt{P_{R_1}} \sqrt{d_{1d}^{-m}} g_1 A_1 \sqrt{(1-\beta)P_S d_{S1}^{-m}} h_1 x_S + \sqrt{P_{R_1}} \sqrt{d_{1d}^{-m}} g_1 A_1 n_{R_1} + \sqrt{P_{R_2}} \sqrt{d_{2d}^{-m}} g_2 x_S + \sqrt{P_{R_3}} \sqrt{d_{3d}^{-m}} g_3 x_S + n_D \quad (2-18)$$

Dan nilai SNR seketika pada D dapat didefinisikan sebagai,

$$\gamma_D = \frac{P_{R_1} d_{1d}^{-m} |g_1|^2 A_1^2 (1-\beta) P_S d_{S1}^{-m} |h_1|^2 + \sum_2^3 P_{R_i} d_{id}^{-m} g_i^2}{P_{R_1} d_{1d}^{-m} |g_1|^2 A_1^2 N_0 + N_0}$$

$$\gamma_D = \frac{P_{R_1} G_{1d} A_1^2 (1-\beta) P_S H_{S1} + \sum_2^3 P_{R_i} G_{id}}{P_{R_1} G_{1d} A_1^2 N_0 + N_0} \quad (2-19)$$

dimana $G_{id} = d_{id}^{-m} |g_i|^2$, $H_{Si} = d_{Si}^{-m} |h_i|^2$ dan $N_0 = \sigma_{r_i}^2 = \sigma_D^2$.

D. Skenario keempat, ketiga R menggunakan protokol relai DF

$$y_D = \sum_{i=1}^3 \sqrt{P_{R_i}} \sqrt{d_{id}^{-m}} g_i x_S + n_D$$

$$y_D = \sqrt{P_{R_2}} \sqrt{d_{2d}^{-m}} g_2 x_S + \sqrt{P_{R_2}} \sqrt{d_{2d}^{-m}} g_2 x_S + \sqrt{P_{R_3}} \sqrt{d_{3d}^{-m}} g_3 x_S + n_D \quad (2-20)$$

Dan nilai SNR sementara pada D dapat didefinisikan sebagai,

$$\gamma_D = \frac{\sum_1^3 P_{R_i} d_{id}^{-m} g_i^2}{N_0}$$

$$\gamma_D = \frac{\sum_2^3 P_{R_i} G_{id}}{N_0} \quad (2-21)$$

dimana $G_{id} = d_{id}^{-m} |g_i|^2$ dan $N_0 = \sigma_{r_i}^2 = \sigma_D^2$.

2.4. Outage Probability dan Throughput Sistem

Kami melakukan simulasi untuk mendapatkan outage probability (OP) dari komunikasi kooperatif D2D dengan UAV berbasis pemanenan energi frekuensi radio *hybrid*. OP didefinisikan sebagai rasio *signal-to-noise* (SNR) minimum pada penerima atau node tujuan yang kurang dari ambang batas yang telah ditentukan, $\gamma_{th} = 2^R - 1$, dimana R [bits/sec/Hz] mewakili laju transmisi target), atau $R \triangleq \log_2(1 + \gamma_{th})$. Menggunakan persamaan (2 - 13, 16, 18) nilai *outage probability* P_{out} dapat ditulis sebagai,

2.5. Outage Probability dan Throughput Sistem

Kami melakukan simulasi untuk mendapatkan outage probability (OP) dari komunikasi kooperatif D2D dengan UAV berbasis pemanenan energi frekuensi radio *hybrid*. OP didefinisikan sebagai rasio *signal-to-noise* (SNR) minimum pada penerima atau node tujuan yang kurang dari ambang batas yang telah ditentukan, $P_{out} =$

$$\Pr \left(\frac{\sum_{i=1}^3 P_{R_i} G_{id} (1-\beta) P_S H_{Si}}{(P_{R_i} G_{id} + \frac{1}{A_i^2}) N_0} < \gamma_{th} \right) \quad (2-22)$$

$$P_{out} = \Pr \left(\frac{P_{R_1} G_{1d} + \sum_2^3 (P_{R_i} G_{id} A_i^2 (1-\beta) P_S H_{Si})}{\sum_2^3 (P_{R_i} G_{id} A_i^2 N_0) + N_0} < \gamma_{th} \right) \quad (2-23)$$

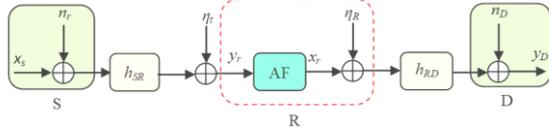
$$P_{out} = \Pr \left(\frac{P_{R_1} G_{1d} A_1^2 (1-\beta) P_S H_{S1} + \sum_2^3 P_{R_i} d_{id}^{-m} g_i^2}{P_{R_1} d_{1d}^{-m} |g_1|^2 A_1^2 N_0 + N_0} < \gamma_{th} \right) \quad (2-24)$$

Berdasarkan persamaan (19) - (21) dapat dilihat beberapa nilai variabel seperti, $\eta_S, \eta_R, \beta, P_{UAV}, h_{UAV-S}, d_{Si}$, dan d_{id} dapat mempengaruhi *outage probability*. Oleh karena itu kami menyajikan hasil simulasi probabilitas pemadaman untuk daya pancar UAV yang berbeda, jarak yang berbeda antara S dan masing-masing R, d_{Si} and d_{id} untuk tiga skenario.

Throughput dinilai dengan mengevaluasi *probability outage*, P_{out} , dengan tingkat transmisi tetap dari sumber. Jika pemancar sumber mentransmisikan dengan kecepatan transmisi sebesar R [bits/sec/Hz] dan periode efektif transmisi sinyal dari sumber ke tujuan melalui relai adalah $(1 - \alpha)T/2$, throughput di tujuan, τ ditulis sebagai,

$$\tau = (1 - P_{out}) R \frac{(1-\alpha)T/2}{T} = \frac{(1-P_{out})R(1-\alpha)}{2} \quad (2-25)$$

2.6. Hardware Impairment Sistem



Gambar 4. Blok diagram komunikasi D2D dengan *hardware impairment* pada node Sumber dan Relai.

Kemudian kami melanjutkan pengamatan kinerja sistem dengan mempertimbangkan gangguan hardware atau hardware impairment. Transceiver sebenarnya dari perangkat nirkabel bukanlah hardware yang ideal sehingga menghasilkan noise distorsi yang dihasilkan oleh berbagai sumber seperti ketidakseimbangan I/Q, non-linearitas HPA, dan phase-noise. Kami mempertimbangkan gangguan perangkat dari transceiver di S dan R seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Level hardware impairment (HI) dari transceiver di S dan R didefinisikan sebagai $\kappa_1, \kappa_2 \geq 0$. Noise distorsi yang dihasilkan oleh gangguan hardware pada pemancar dan penerima didefinisikan sebagai μ_1, μ_2 secara berturut-turut.

Oleh karena itu, sinyal yang diterima di R dapat ditulis sebagai,

$$y_{SR} = \sqrt{(1-\beta)P_S} \sqrt{d_{SR}^{-m}} h_{SR} (\mu_1 + x_s) + n_{SR} \quad (2-26)$$

dengan, $\mu_1 \sim \mathcal{CN}(0, (1-\beta)P_S \kappa_1^2)$

$$y_{RD} = \sqrt{P_R} \sqrt{d_{RD}^{-m}} h_{RD} x_R + \sqrt{d_{RD}^{-m}} h_{RD} \mu_2 + n_{RD} \quad (2-27)$$

dengan, $\mu_2 \sim \mathcal{CN}(0, G^2 \kappa_2^2 ((1-\beta)P_S H_{SR} (1+\kappa_1^2) + N_0))$

Sinyal yang diteruskan dari D2D-R, x_R dapat dituliskan seperti,

$$x_R = G y_{SR} \quad (2-28)$$

Faktor penguatan sinyal di D2D-R, G dituliskan dengan persamaan (2-27),

$$G = \frac{1}{\sqrt{P_S |h_{SR}|^2 d_{SR}^{-m} (1+\kappa_1^2) + N_0}} \quad (2-29)$$

Parameter $\kappa_1, \kappa_2 \geq 0$ masing-masing menyatakan level ketidak-idealitas perangkat keras rangkaian pemancar dan rangkaian penerima. Secara lengkap sinyal yang diterima D2D-D dituliskan seperti persamaan,

$$y_D = y_{RD} = \sqrt{P_R} \sqrt{d_{RD}^{-m}} h_{RD} G y_{SR} + \sqrt{d_{RD}^{-m}} h_{RD} \mu_2 + n_{RD}$$

$$y_D = \sqrt{P_R} \sqrt{d_{RD}^{-m}} h_{RD} G \left(\sqrt{(1-\beta)P_S} \sqrt{d_{SR}^{-m}} h_{SR} (\mu_1 + x_s) + n_{SR} \right) + \sqrt{d_{RD}^{-m}} h_{RD} \mu_2 + n_{RD}$$

$$y_D = \sqrt{P_R} \sqrt{d_{RD}^{-m}} h_{RD} G \sqrt{(1-\beta)P_S} \sqrt{d_{SR}^{-m}} h_{SR} \mu_1$$

$$+ \sqrt{P_R} \sqrt{d_{RD}^{-m}} h_{RD} G \sqrt{(1-\beta)P_S} \sqrt{d_{SR}^{-m}} h_{SR} x_s + \sqrt{P_R} \sqrt{d_{RD}^{-m}} h_{RD} G n_{SR} + \sqrt{d_{RD}^{-m}} h_{RD} \mu_2 + n_{RD} \quad (2-30)$$

Dari sinyal yang diterima oleh D2D-D, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai SNR, yang digunakan sebagai salah satu parameter dalam mengukur nilai *outage probability*, dan *throughput*. Sehingga *end-to-end* SNR pada D2D-D dapat dituliskan dengan persamaan,

$$\gamma_D = \frac{P_R H_{RD} G^2 (1-\beta) P_S H_{SR}}{H_{RD} G^2 (1-\beta) P_S H_{SR} (P_R \kappa_1^2 + \kappa_2^2 + \kappa_1^2 \kappa_2^2) + H_{RD} G^2 (P_R + \kappa_2^2) N_0 + N_0} \quad (2-31)$$

dimana, $H_{SR} = |h_{SR}|^2 d_{SR}^{-m}$ dan $H_{RD} = |h_{RD}|^2 d_{RD}^{-m}$.

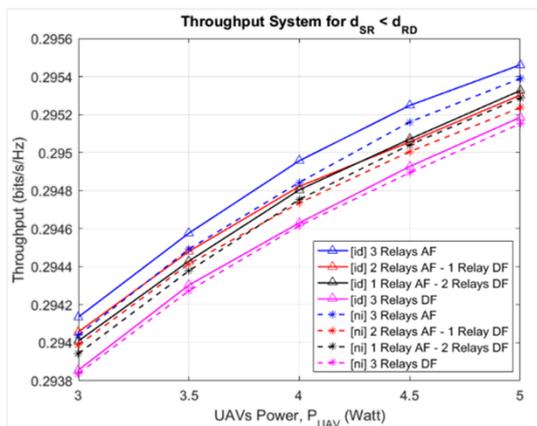
3. Hasil Simulasi

Pada bagian ini, *throughput sistem* disajikan melalui simulasi dalam bentuk kurva. Parameter yang digunakan dalam simulasi tercantum dalam Tabel 1.

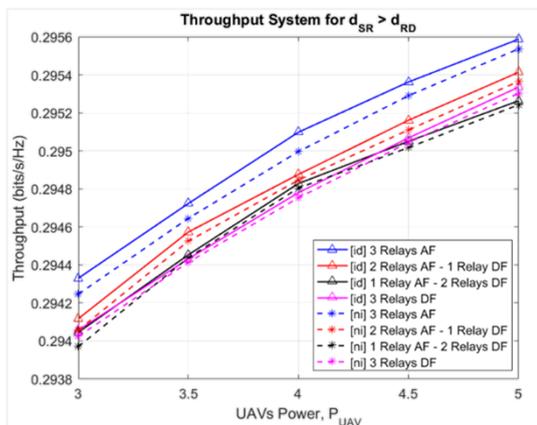
Tabel 1. Parameter Simulasi

Parameter	Nilai	Keterangan
P_{UAV}	3 – 5 Watt	Daya pancar UAV
h_{UAV}	100 meters	Ketinggian UAV
η_S	0.75	Faktor konversi energi di S
η_R	0.75	Faktor konversi energi di R
α	0.4	Faktor <i>time switching</i> (TS)
β	0.5	Faktor <i>power splitting</i> (PS)
κ_1, κ_2	0.1	Level <i>hardware impairment</i>
N_0	-100 dBm	Daya noise AWGN
m	2.7	Eksponen path loss saluran D2D
m_u	2	Eksponen path loss saluran UAV – D2D
R	1 bps/Hz	Target bit rate
a, b	11.95 dan 0.136	Parameter kanal A2G untuk daerah padat (<i>dense urban</i>)
ρ	20 dB	Faktor atenuasi

Kami menyelidiki perbandingan empat skenario protokol relai pada sistem multi relai yaitu 3 relai menggunakan protokol AF, 2 relai menggunakan protokol AF - 1 relai menggunakan protokol, 1 relai menggunakan protokol AF - 2 relai, dan 3 relai menggunakan protokol DF. *Throughput sistem* dari keempat skenario ini disajikan untuk kondisi ketika jarak antara S – R lebih pendek daripada jarak antara R – D yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Kinerja *throughput* sistem untuk kondisi jarak S – R lebih dekat daripada jarak R – D



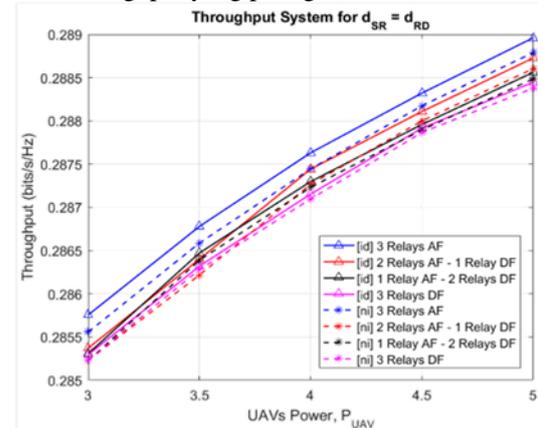
Gambar 6. Kinerja *throughput* sistem untuk kondisi jarak S – R lebih jauh daripada jarak R – D

Dan dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa pada skenario pertama dimana ketiga relai menggunakan protokol AF menghasilkan nilai *throughput* terbaik. Sedangkan skenario keempat dimana seluruh relai menggunakan protokol DF menghasilkan nilai *throughput* yang paling buruk.

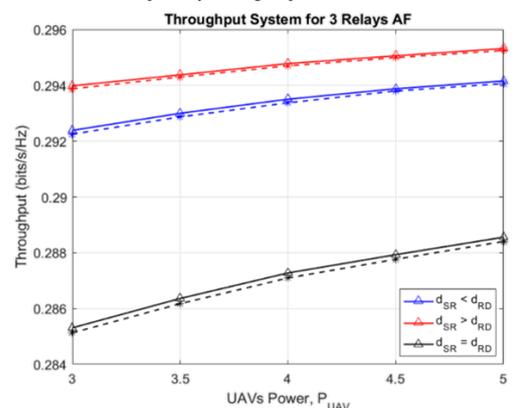
Kemudian kami menyelidiki dampak dari kondisi ketika jarak antara S – R lebih jauh daripada jarak antara R – D ke sistem *throughput* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Dari hasil simulasi terlihat bahwa skenario pertama dimana ketiga relai menggunakan protokol AF menghasilkan nilai *throughput* terbaik saat daya pancar UAV di atas 3,5 Watt. Di bawah 3,5 Watt nilai *throughput* hampir sama dengan skenario kedua.

Selanjutnya kami menyelidiki *throughput* sistem ketika jarak antara S – R sama jauhnya dengan jarak antara R – D seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario pertama menghasilkan nilai *throughput* terbaik, dimana ketiga relai menggunakan protokol AF. Skenario keempat dimana penggunaan protokol DF menghasilkan

nilai *throughput* yang paling buruk.



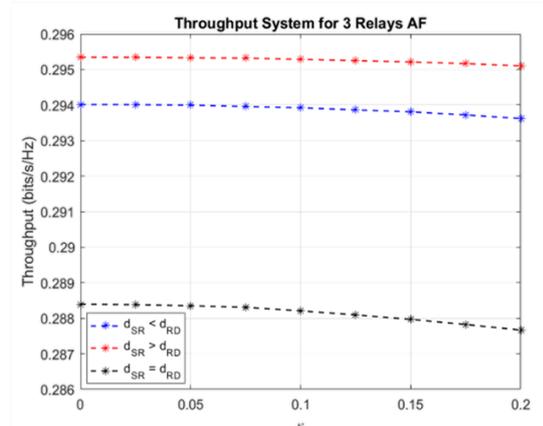
Gambar 7. Kinerja *throughput* sistem untuk kondisi jarak S – R sama jauhnya dengan jarak R – D



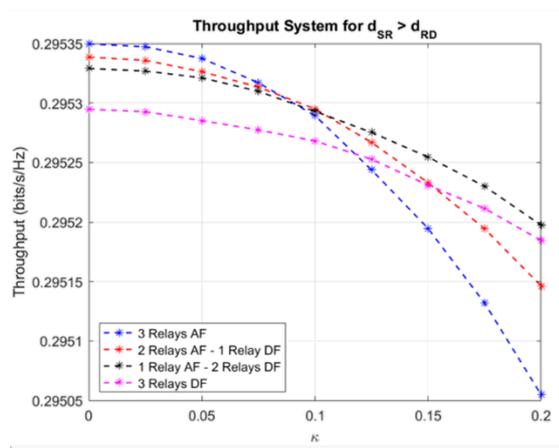
Gambar 8. Kinerja *throughput* sistem untuk perbedaan kondisi jarak S – R dan jarak R – D

Selanjutnya kami membandingkan ketiga kondisi perbedaan jarak perangkat tersebut pada skenario relai pertama yaitu menggunakan protokol relai AF seperti pada Gambar 8. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi dimana jarak antara R – D lebih pendek daripada jarak S – R dapat dicapai nilai *throughput* terbaik. Energi yang akan ditransmisikan di relai merupakan hal yang paling penting. Ketika jarak semakin jauh, energi yang dikumpulkan di relai tidak cukup untuk ditransmisikan sesuai yang dibutuhkan. Akibatnya, *throughput* memiliki tren menurun dalam nilainya.

Dalam seluruh hasil simulasi, garis lurus pada grafik menunjukkan kinerja *throughput* sistem ketika tidak mempertimbangkan level *hardware impairment* (HI), sedangkan garis putus-putus pada grafik menunjukkan kinerja sistem ketika mempertimbangkan dampak dari level HI pada perangkat S dan R atau κ_1 dan κ_2 . Dari seluruh hasil simulasi dapat dilihat juga bahwa kinerja *throughput* sistem menjadi lebih baik dengan peningkatan daya pancar UAV.



Gambar 9. Kinerja *throughput* sistem untuk perbedaan kondisi jarak S – R dan jarak R – D terhadap dampak *Hardware Impairment*



Gambar 10. Kinerja *throughput* sistem untuk perbedaan skenario relai terhadap dampak *Hardware Impairment*

Gambar 9. menampilkan kinerja *throughput sistem* dengan skenario relai AF dari ketiga kondisi pengaturan jarak antar perangkat sebagai atau terhadap fungsi level HI, κ . Dapat diamati *throughput sistem* dengan kondisi jarak antara R – D lebih pendek daripada jarak S – R mencapai nilai yang lebih baik dibandingkan dengan dua kondisi lainnya.

Selanjutnya kami mengamati kinerja *throughput sistem* untuk keempat skenario relai terhadap fungsi level HI, κ yang ditampilkan pada Gambar 10. Dari hasil simulasi terlihat bahwa sistem dengan skenario full relai AF mengalami penurunan kinerja yang cukup curam pada saat κ diatas 0,1 dibandingkan dengan ketiga skenario relai lainnya yang lebih tahan terhadap HI.

Level HI yang lebih tinggi menyebabkan *throughput sistem* yang lebih rendah, yang menurunkan kinerja sistem. Karena perangkat keras atau *device* dengan harga lebih rendah memiliki tingkat HI yang lebih tinggi, maka kualitas perangkat yang dapat memberikan keseimbangan antara kinerja *throughput* dan harga perangkat tersebut dapat dipilih dengan tepat dalam desain sistem secara praktik.

4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa semakin pendek jarak R – D lebih dominan dibanding jarak S – R untuk mendapatkan nilai SNR tinggi dan nilai *throughput sistem* yang terbaik pada seluruh skenario. Penerapan protokol relai *amplify and forward* (AF) pada semua relai atau skenario pertama menghasilkan nilai SNR yang lebih baik dan nilai *throughput* yang lebih baik daripada protokol relai *decode and forward* (DF) seperti skenario kedua, ketiga dan keempat. Untuk nilai κ di atas 0,1 nilai *throughput* skenario pertama justru lebih buruk dibanding ketiga skenario yang lain.

Daftar Pustaka

- [1] "Enabling device-to-device communications in millimeter-wave 5G cellular networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 1, pp. 209-215, January 2015, doi: 10.1109/J. Qiao, X. S. Shen, J. W. Mark, Q. Shen, Y. He and L. Lei, MCOM.2015.7010536.
- [2] Biswash, S.K., Ziviani, A., Jain, R. et al. Editorial: Device-to-Device Communication in 5G Networks. Mobile Netw Appl 22, 995–997 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11036-017-0828-7>.
- [3] D. Feng, L. Lu, Y. Yuan-Wu, G. Y. Li, S. Li and G. Feng, "Device-to-device communications in cellular networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 4, pp. 49-55, April 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6807946.
- [4] Gandotra, Pimmy & Jha, Rakesh. (2016), "Device-to-Device Communication in Cellular Networks: A Survey", Journal of Network and Computer Applications. 71. 10.1016/j.jnca.2016.06.004.
- [5] Kar, Udit & Sanyal, Debarshi. (2017), "An overview of device-to-device communication in cellular networks", ICT Express. 4. 10.1016/j.icte.2017.08.002.
- [6] J. N. Laneman, D. N. C. Tse and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," in IEEE Transactions on Information Theory, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [7] Huang H, Xiang W, Tao Y, Liu B, Hu M., "Relay-Assisted D2D Transmission for Mobile Health Applications", Sensors (Basel). 2018 Dec 13;18(12):4417. doi: 10.3390/s18124417.
- [8] L. Han, R. Zhou, Y. Li, B. Zhang and X. Zhang, "Power Control for Two-Way AF Relay Assisted D2D Communications Underlying Cellular Networks," in IEEE Access, vol. 8, pp. 151968-151975, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3017799.
- [9] Sarma, S.S.; Hazra, R.; Chong, P.H.J. Performance Analysis of DF Relay-Assisted D2D Communication in a 5G mmWave Network. Future Internet 2022, 14, 101. <https://doi.org/10.3390/fi14040101>.
- [10] C. Yuen, M. Elkashlan, Y. Qian, T. Q. Duong, L. Shu, and F. Schmidt, "Energy harvesting communications: Part 1 [Guest Editorial]," IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 6, pp. 54–55, Jun. 2015.
- [11] C. Yuen, M. Elkashlan, Y. Qian, and T. Q. Duong, "Energy harvesting communications: Part 2 [Guest Editorial]," IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 6, pp. 54–55, Jun. 2015.
- [12] C. Yuen, M. Elkashlan, Y. Qian, T. Q. Duong, L. Shu, and F. Schmidt, "Energy harvesting communications: Part 3 [Guest Editorial]," IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 6, pp. 54–55, Jun. 2015.
- [13] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 17, no. 2, pp. 757–789, 2nd Quart., 2015.
- [14] I. Krikidis, S. Timotheou, S. Nikolaou, G. Zheng, D. W. K. Ng and R. Schober, "Simultaneous wireless information and

- power transfer in modern communication systems," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 11, Nov. 2014, pp. 104-110.
- [15] Perera, T.D., & Jayakody, D.N., "Analysis of time-switching and power-splitting protocols in wireless-powered cooperative communication system", *Phys. Commun.*, vol. 31, 2018, pp. 141-151.
- [16] Razmi, Nasrin, Mehdi Mahdavi, Mohammadali Mohammadi, and Petar Popovski. "Analysis of D2D Communication with RF Energy Harvesting and Interference Management." *arXiv preprint arXiv:2002.01686* (2020).
- [17] Ghosh, Sayanti and Mondal, Soumen and AU - Roy, Sanjay Dhar and Kundu, Sumit," D2D communication with energy harvesting relays for disaster management", *International Journal of Electronics*, vol. 107, no. 8, 2020, pp. 1272-1290, doi : 10.1080/00207217.2020.1726488.
- [18] Nguyen Thanh, Luan & Do, T., "Investigation on energy harvesting enabled device-to-device networks in presence of co-channel interference", *TELKOMNIKA*, vol. 19, no. 1, February 2021, pp. 27-35.
- [19] Seif, M., El-Keyi, A., Seddik, K. G., & Nafie, M., "Cooperative D2D communication in downlink cellular networks with energy harvesting capability", In *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC) 2017*, pp. 183-189.
- [20] H. Hu, Y. Xu, Q. Wang and D. Huang, "Robust Resource Allocation for Energy Harvesting-Powered UAV-Assisted D2D Networks," *2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Changsha, China, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/WCSP52459.2021.9613527.
- [21] Z. Su, J. Tang, W. Feng, Z. Chen, Y. Fu and K. -K. Wong, "Energy Efficiency Optimization for D2D communications in UAV-assisted Networks with SWIPT," *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Madrid, Spain, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685800.
- [22] Su et al., "Energy-Efficiency Optimization for D2D Communications Underlying UAV-Assisted Industrial IoT Networks With SWIPT," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 1990-2002, 1 Feb.1, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3142026.
- [23] Q. Feng, J. McGeehan, E. K. Tameh, and A. R. Nix, "Path loss models for air-to-ground radio channels in urban environments," in *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Melbourne, Vic, Australia, May 2006.
- [24] J. Holis and P. Pechac, "Elevation dependent shadowing model for mobile communications via high altitude platforms in built-up areas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 4, pp. 1078-1084, Apr. 2008.
- [25] [25] A. Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, "Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments," in *Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, Austin, TX, USA, Dec. 2014.