

Studi Q-EEG: Analisis Konektivitas Fungsional Otak Pada Anak *Autism Spectrum Disorder* (ASD)

N Handayani^{1,2} dan M Pangestu¹

¹Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga, Jl. Marsda Adisucipto No. 1 Yogyakarta

²E-mail: nita.handayani@uin-suka.ac.id

Abstrak. *Autism Spectrum Disorder* (ASD) merupakan gangguan perkembangan saraf yang ditandai dengan adanya kesulitan komunikasi sosial dan perilaku yang berulang. Kondisi pada penderita ASD ini berkaitan dengan gangguan konektivitas fungsional dan struktural otak. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis perubahan konektivitas fungsional otak dengan menggunakan metode *quantitative electroencephalography* (Q-EEG). Parameter fisis yang dikaji berupa fase sinkronisasi sinyal (*phase synchronization*) yang terdiri dari besaran *Phase-Lag Index* (PLI) dan *weighted Phase-Lag Index* (wPLI). Perekaman sinyal otak menggunakan Emotiv Epc 14-elektroda (AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T7, FC6, F4, F8, AF4) dan 2-elektroda referensi (CMS dan DRL). Subjek uji terdiri dari anak penderita ASD dan anak normal masing-masing sebanyak lima anak dengan rentang usia 10-15 tahun. Tahapan penelitian meliputi perekaman sinyal EEG, *pre-processing* data, dan pengolahan data. Analisis nilai PLI dan wPLI dilakukan pada lima rentang frekuensi gelombang otak (delta, theta, alpha, beta dan gamma). Berdasarkan hasil analisis perhitungan nilai PLI dan wPLI menunjukkan adanya penurunan konektivitas fungsional otak pada anak ASD di semua pita frekuensi. Penurunan konektivitas fungsional pada anak ASD yang signifikan berdasarkan hasil uji statistik, terjadi pada area otak intra-hemisphere kanan untuk frekuensi alpha.

Kata kunci: Autism Spectrum Disorder, EEG, konektivitas fungsional otak, PLI, wPLI

Abstract. Autism Spectrum Disorder (ASD) is a neurodevelopmental disorder characterized by social communication difficulties and repetitive behaviors. This condition in ASD is associated with lacking brain functional and structural connectivity. This study aimed to analyze changes in functional brain connectivity using the quantitative electroencephalography (Q-EEG) method. The physical parameter studied is the phase synchronization of the signal, which consists of the Phase-Lag Index (PLI) and the weighted Phase-Lag Index (wPLI) values. Brain signal recording used Emotiv Epc 14-electrodes (AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T7, FC6, F4, F8, AF4) and 2-reference electrodes (CMS and DRL). The test subjects consisted of children with ASD and normal children, each consisting of five children with an age range of 10-15 years. The research stages include recording EEG signals, pre-processing, and processing data. The PLI and wPLI values were analyzed in five brain wave frequency ranges (delta, theta, alpha, beta, and gamma). The PLI and wPLI values calculation show a decreased functional brain connectivity in ASD children in all frequency bands. Based on statistical test results, a significant decrease in functional connectivity in ASD children occurred in the right intra-hemisphere brain area for alpha frequencies.

Keywords: Autism Spectrum Disorder, EEG, functional brain connectivity, PLI, wPLI

1. Pendahuluan

ASD merupakan gangguan perkembangan syaraf yang mempengaruhi kemampuan komunikasi dan interaksi, dan munculnya perilaku, ketertarikan dan aktivitas yang berulang [1]. Gangguan yang ditimbulkan sangat kompleks, biasanya mulai tampak pada usia dua tahun. Kondisi ini menyebabkan penderita tidak mampu mengekspresikan keinginannya, sehingga mengakibatkan terganggunya perilaku dan hubungan dengan orang lain. Jumlah penderita autisme mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Berdasarkan data yang dirilis oleh *Centre of Disease Control (CDC)* Amerika pada tahun 2018 menyatakan bahwa prevalensi autisme di dunia mengalami peningkatan yang signifikan. Pada tahun 2014 menunjukkan 1 dari 68 anak merupakan penderita autisme, sedangkan pada tahun 2018 meningkat menjadi 1 dari 59 anak. Data CDC menunjukkan bahwa prevalensi ASD empat kali lebih besar pada anak laki-laki daripada anak perempuan [2]. Di Indonesia belum ada data pasti tentang jumlah penderita ASD. Berdasarkan data yang dirilis oleh Kementerian Kesehatan menyatakan pada tahun 2014 perkiraan jumlah penderita autisme mencapai 112.000. Angka tersebut terus meningkat 9% hingga 13% setiap tahunnya hingga tahun 2016.

Salah satu *biomarker* pada penderita ASD adalah adanya perubahan konektivitas fungsional dan struktural otak. Konektivitas fungsional mengacu pada ketergantungan statistik (korelasi temporal) data *time series* aktivitas elektrofisiologis dan kadar (de)oksigenisasi dalam darah untuk area otak yang berbeda [3, 4]. Aktivitas elektrofisiologis dapat diperoleh dari hasil rekaman *electroencephalography (EEG)*, yang mengukur perubahan potensial post-sinaptik rata-rata dari populasi neuron, sehingga memberikan gambaran langsung tentang fungsional syaraf. Sedangkan perubahan kadar (de)oksigenisasi diukur menggunakan *functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)* dan kontras BOLD (*blood-oxygen level dependent*) berdasarkan kebutuhan metabolisme, sehingga tidak dapat memberikan gambaran langsung tentang fungsional syaraf. fMRI memiliki resolusi spasial tinggi (1 – 10 mm), sedangkan EEG memiliki resolusi spasial yang terbatas (1 – 10 cm). Sebaliknya fMRI memiliki keterbatasan resolusi temporal (~ 1 detik), karena keterbatasan respons hemodinamik. Sementara EEG memiliki resolusi temporal yang tinggi (< 1 milidetik). Oleh karena teknik pengukuran konektivitas fungsional sangat bergantung pada perhitungan korespondensi sinyal otak sebagai fungsi waktu, maka EEG merupakan perangkat yang paling optimal untuk mengkaji konektivitas otak [5].

Metode untuk menguantifikasi konektivitas otak secara efisien dan akurat terus berkembang, dan masih menjadi tantangan sampai saat ini. Ada beberapa metode yang dikembangkan untuk mengukur konektivitas fungsional otak, diantaranya metode linier dan metode non linier. Metode non linier lebih cocok diterapkan untuk mengkaji dinamika sinyal EEG yang bersifat chaos dan memiliki karakteristik non linier. Pada awal tahun 1980, dikenalkan konsep sinkronisasi untuk mengukur konektivitas neuronal. Dalam studi *neuroscience*, sinkronisasi direpresentasikan dengan konsep fase sinkronisasi. Fase sinkronisasi adalah mekanisme biologis dari komunikasi antara area-area otak yang berbeda [6]. Hasil studi menyatakan bahwa fase sinkronisasi jangkauan panjang dan pendek sebagai manifestasi kunci dari proses integrasi informasi di dalam otak. Oleh karena itu, penelitian tentang karakterisasi kuantitatif dari konektivitas fungsional otak yang didasarkan pada besaran fase sinkronisasi sangat menarik untuk dikaji.

Beberapa penelitian menyatakan bahwa autisme disebabkan karena adanya defisit dalam pengintegrasian informasi di level neuronal [7,8]. Berdasarkan studi fMRI diperoleh hasil bahwa pada anak penderita ASD mengalami penurunan konektivitas fungsional otak dibandingkan dengan anak normal [9]. Persepsi sensorik pada anak ASD juga mengalami penurunan konektivitas [10]. Ada beberapa besaran fisika yang dapat digunakan untuk menggambarkan ukuran konektivitas fungsional otak, misalnya korelasi linier/nonlinier, fungsi koherensi, *phase synchronization*, dan lain-lain. *Phase synchronization* merupakan estimator dari sinkronisasi antara dua atau lebih data *time series* dari aktivitas otak. Estimator ini lebih unggul dibandingkan dengan besaran yang lain. Oleh karena itu dalam penelitian ini akan dikaji tentang konektivitas fungsional otak pada penderita ASD berbasis estimator *phase synchronization*. Besaran *phase synchronization* yang digunakan adalah *Phase Lag Index (PLI)* dan *weighted Phase Lag Index (wPLI)*. Pengukuran konektivitas otak dengan PLI didasarkan pada ukuran asimetri dalam distribusi perbedaan fase yang dihitung dari fase sesaat dua data *time series* yaitu data yang diperoleh dari pengukuran sinyal sepasang elektroda [11]. Sedangkan wPLI merupakan pengembangan dari metode PLI dengan memberikan pembobotan.

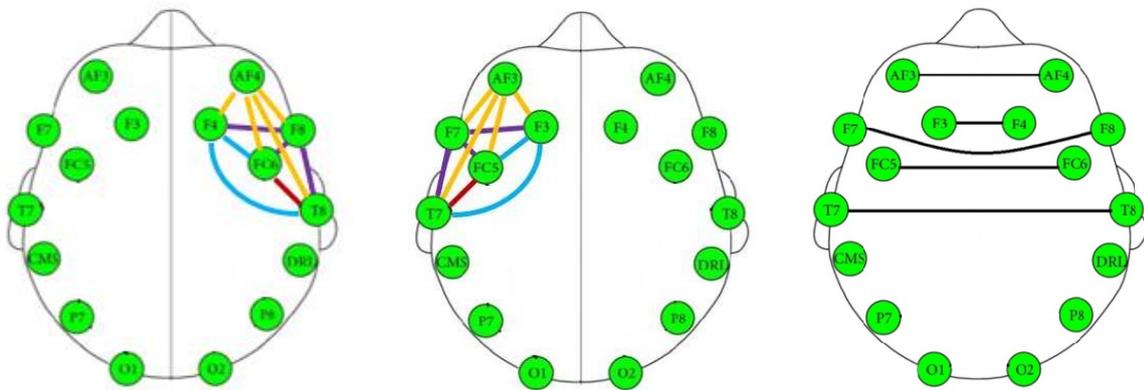
2. Metode

2.1 Perekaman Data EEG

Perekaman data EEG dilakukan dengan menggunakan perangkat Emotiv EPOC-14 elektroda dan 2 elektroda referensi dengan frekuensi sampling sebesar 128 Hz. Subjek uji terdiri dari lima penderita ASD dan lima subjek normal sebagai kontrol, dengan rentang usia antara 10 – 15 tahun. Perekaman sinyal otak dilakukan pada kondisi rileks dengan menutup mata selama 10 menit.

2.2 Pre-processing dan Pengolahan Data EEG

Tahapan pre-processing bertujuan untuk memastikan data yang akan diolah memiliki kualitas yang baik. Data sinyal otak diekstrak sedemikian hingga datanya bebas dari noise dan artifak. Setelah pre-processing data kemudian data diolah lebih lanjut. Dalam penelitian ini data *time series* yang diolah diambil dalam durasi waktu 90 detik (sebanyak 11520 data). Data yang digunakan pada penelitian ini difokuskan pada area lobus frontal (AF3, F7, F3, FC5, AF4, F8, F4, FC6) dan lobus temporal otak (T7 dan T8). Analisis konektivitas fungsional otak dibagi menjadi tiga kelompok yaitu intra-hemisphere kanan, intra-hemisphere kiri dan inter-hemisphere seperti terlihat pada gambar 1 .



Gambar 1. Pasangan elektroda (a) intra-hemisphere kanan, (b) intra-hemisphere kiri, dan (c) inter-hemisphere

Tahapan berikutnya adalah menghitung nilai PLI dan wPLI. PLI adalah indeks asimetri distribusi perbedaan fase yang dihitung dari fase sesaat dari dua data *time series*. PLI mengukur asimetri distribusi perbedaan fase sesaat yang ditentukan menggunakan transformasi Hilbert. Asimetri distribusi perbedaan fase berarti bahwa kemungkinan perbedaan fase $\Delta\varphi$ akan berada dalam interval $-\pi < \Delta\varphi < 0$ atau kemungkinan akan terjadi dalam interval $0 < \Delta\varphi < \pi$. Asimetri ini menyiratkan adanya perbedaan fase bukan nol yang konsisten ('lag') antara dua data *time series*. Indeks asimetri distribusi perbedaan fase dapat diperoleh dari data *time series* perbedaan fase $\Delta\varphi(t_k)$, $k = 1 \dots N$ dengan persamaan yang dikenalkan oleh Stam, dkk (2007) yang dituliskan sebagai berikut [12]:

$$PLI = |\langle \text{sign}[\sin(\Delta\varphi(tk))] \rangle| \tag{1}$$

Rentang PLI antara 0 dan 1: $0 \leq PLI \leq 1$. PLI bernilai 0 menunjukkan konektivitas lemah atau konektivitas terpengaruh dengan adanya konduksi volume. Sedangkan jika PLI bernilai 1 maka akan menunjukkan konektivitas kuat dengan penguncian fase yang sempurna.

wPLI adalah pengembangan dari PLI. wPLI adalah ukuran sinkronisasi fase yang dapat menjelaskan interaksi linear dan juga diharapkan peka terhadap kopling non linier. Persamaan wPLI yang dikenalkan oleh Vinck, dkk (2011) dituliskan sebagai berikut [13]:

$$\varphi = \frac{|E\{\Im\{Z\}\}|}{E\{|\Im\{Z\}|\}} = \frac{|E\{|\Im\{Z\}|\text{sgn}(\Im\{Z\})\}|}{E\{|\Im\{Z\}|\}} \tag{2}$$

Pertidaksamaan $0 \leq \varphi \leq 1$ berlaku, karena wPLI mengambil nilai maksimumnya jika $Pr\{\text{sgn}(\Im\{X\}) = 1\} = 1$ atau $Pr\{\text{sgn}(\Im\{X\}) = -1\} = 1$, dimana $Pr\{\cdot\}$ menunjukkan probabilitas, dalam hal ini $|E\{|\Im\{X\}|\text{sgn}(\Im\{X\})\}|$.

2.3 Uji Statistik

Hasil perhitungan PLI dan wPLI yang telah diperoleh akan diperbandingkan untuk dua kelompok uji yaitu kelompok anak penderita ASD dan anak normal. Untuk melihat apakah ada perbedaan yang signifikan pada nilai PLI dan wPLI pada dua kelompok tersebut, maka dilakukan uji statistik parametrik dengan *Independent sample t-test* dengan tingkat signifikansi 95% ($p\text{-value} < 0.05$)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil perhitungan nilai PLI dan wPLI

Perhitungan konektivitas fungsional otak berdasarkan besaran PLI dan wPLI dibagi menjadi tiga kelompok data yaitu pasangan elektroda pada area intra-hemisphere kanan, intra-hemisphere kiri dan inter-hemisphere. Masing-masing kelompok data pasangan elektroda dikaji pada lima rentang frekuensi yaitu delta, theta, alpha, beta dan gamma. Hasil perhitungan nilai rata-rata PLI dari setiap kelompok subjek uji disajikan dalam tabel 1 sampai dengan tabel 6.

Tabel 1. Hasil perhitungan nilai rata-rata PLI pada anak ASD dan anak normal untuk pasangan elektroda intra-hemisphere kanan

Pasangan Elektroda	Anak ASD					Anak Normal				
	Delta	Theta	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Theta	Alpha	Beta	Gamma
AF4-F8	0.179	0.093	0.109	0.058	0.075	0.218	0.136	0.089	0.056	0.039
AF4-F4	0.139	0.207	0.035	0.061	0.052	0.153	0.092	0.135	0.046	0.038
AF4-T8	0.171	0.198	0.118	0.081	0.032	0.195	0.237	0.188	0.062	0.055
F8-F4	0.263	0.172	0.144	0.034	0.059	0.166	0.094	0.093	0.038	0.044
F8-FC6	0.179	0.093	0.109	0.058	0.075	0.218	0.136	0.089	0.056	0.039
F8-T8	0.240	0.269	0.091	0.084	0.043	0.134	0.130	0.105	0.035	0.074
F4-FC6	0.139	0.207	0.035	0.061	0.052	0.153	0.092	0.135	0.046	0.038
F4-T8	0.186	0.106	0.087	0.084	0.062	0.292	0.088	0.155	0.056	0.074
FC6-T8	0.171	0.198	0.118	0.081	0.032	0.195	0.237	0.188	0.062	0.055

Tabel 2. Hasil perhitungan nilai rata-rata PLI pada anak ASD dan anak normal untuk pasangan elektroda intra-hemisphere kiri

Pasangan Elektroda	Anak ASD					Anak Normal				
	Delta	Theta	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Theta	Alpha	Beta	Gamma
AF3-F7	0.207	0.232	0.126	0.100	0.124	0.188	0.174	0.131	0.056	0.079
AF3-F3	0.185	0.233	0.102	0.063	0.065	0.262	0.109	0.080	0.106	0.035
AF3-T7	0.147	0.121	0.125	0.065	0.054	0.134	0.221	0.072	0.084	0.051
F7-F3	0.328	0.211	0.116	0.047	0.085	0.062	0.078	0.118	0.072	0.071
F7-FC5	0.207	0.232	0.126	0.100	0.124	0.188	0.174	0.131	0.056	0.079
F7-T7	0.145	0.148	0.082	0.049	0.055	0.170	0.132	0.126	0.055	0.056
F3-FC5	0.185	0.233	0.102	0.063	0.065	0.262	0.109	0.080	0.106	0.035
F3-T7	0.222	0.124	0.164	0.085	0.061	0.081	0.137	0.070	0.088	0.035
FC5-T7	0.147	0.121	0.125	0.065	0.054	0.134	0.221	0.072	0.084	0.051

Tabel 3. Hasil perhitungan nilai rata-rata PLI pada anak ASD dan anak normal untuk pasangan elektroda inter-hemisphere

Pasangan Elektroda	Anak ASD					Anak Normal				
	Delta	Theta	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Theta	Alpha	Beta	Gamma
AF3-AF4	0.139	0.112	0.080	0.042	0.045	0.192	0.094	0.057	0.065	0.046
F3-F4	0.184	0.104	0.110	0.065	0.113	0.177	0.123	0.051	0.068	0.051
F7-F8	0.270	0.092	0.072	0.063	0.061	0.213	0.155	0.116	0.062	0.068
FC5-FC6	0.139	0.112	0.080	0.042	0.045	0.192	0.094	0.057	0.065	0.046
T7-T8	0.214	0.195	0.097	0.047	0.049	0.027	0.100	0.055	0.053	0.077

Berdasarkan data pada tabel 1 tampak bahwa nilai rata-rata PLI intra-hemisphere kanan pada anak ASD lebih rendah dibandingkan anak normal pada beberapa pasangan elektroda dari kelima rentang pita

frekuensi. Hal ini menyatakan adanya penurunan konektivitas fungsional otak pada anak ASD untuk area otak hemisphere kanan. Pasangan elektroda yang mengalami penurunan nilai PLI terbanyak terjadi pada pita frekuensi delta dan alpha, masing-masing tujuh dan enam pasang elektroda. Pada area intra-hemisphere kiri (tabel 2), pasangan elektroda terbanyak yang mengalami penurunan nilai PLI yaitu pada pita frekuensi beta. Sedangkan pada pasangan elektroda inter-hemisphere, penurunan nilai PLI terbanyak pada pita frekuensi beta dan gamma (tabel 3).

Tabel 4. Hasil perhitungan nilai rata-rata *wPLI* pada anak ASD dan anak normal untuk pasangan elektroda intra-hemisphere kanan

Pasangan Elektroda	Anak ASD					Anak Normal				
	Delta	Theta	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Theta	Alpha	Beta	Gamma
AF4-F8	0.227	0.150	0.127	0.061	0.074	0.187	0.201	0.098	0.058	0.072
AF4-F4	0.142	0.174	0.055	0.072	0.097	0.149	0.098	0.100	0.056	0.059
AF4-T8	0.241	0.180	0.098	0.080	0.048	0.227	0.259	0.205	0.080	0.070
F8-F4	0.282	0.183	0.159	0.039	0.047	0.181	0.095	0.097	0.028	0.050
F8-FC6	0.281	0.150	0.127	0.061	0.074	0.187	0.201	0.098	0.058	0.072
F8-T8	0.195	0.310	0.082	0.101	0.041	0.122	0.138	0.140	0.062	0.068
F4-FC6	0.172	0.174	0.055	0.072	0.097	0.149	0.098	0.100	0.056	0.059
F4-T8	0.212	0.165	0.083	0.115	0.048	0.265	0.114	0.193	0.079	0.077
FC6-T8	0.295	0.180	0.098	0.080	0.048	0.227	0.259	0.205	0.080	0.070

Tabel 5. Hasil perhitungan nilai rata-rata *wPLI* pada anak ASD dan anak normal untuk pasangan elektroda intra-hemisphere kiri

Pasangan Elektroda	Anak ASD					Anak Normal				
	Delta	Theta	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Theta	Alpha	Beta	Gamma
AF3-F7	0.271	0.271	0.126	0.093	0.103	0.213	0.148	0.171	0.062	0.086
AF3-F3	0.211	0.229	0.131	0.075	0.067	0.337	0.091	0.070	0.122	0.034
AF3-T7	0.158	0.129	0.155	0.078	0.082	0.152	0.200	0.101	0.123	0.071
F7-F3	0.287	0.224	0.182	0.061	0.058	0.114	0.069	0.121	0.086	0.071
F7-FC5	0.180	0.271	0.126	0.093	0.103	0.213	0.148	0.171	0.062	0.086
F7-T7	0.158	0.115	0.088	0.052	0.053	0.191	0.151	0.111	0.040	0.099
F3-FC5	0.122	0.229	0.131	0.075	0.067	0.337	0.091	0.070	0.122	0.034
F3-T7	0.243	0.147	0.124	0.095	0.069	0.115	0.121	0.066	0.104	0.039
FC5-T7	0.148	0.129	0.155	0.078	0.082	0.152	0.200	0.101	0.123	0.071

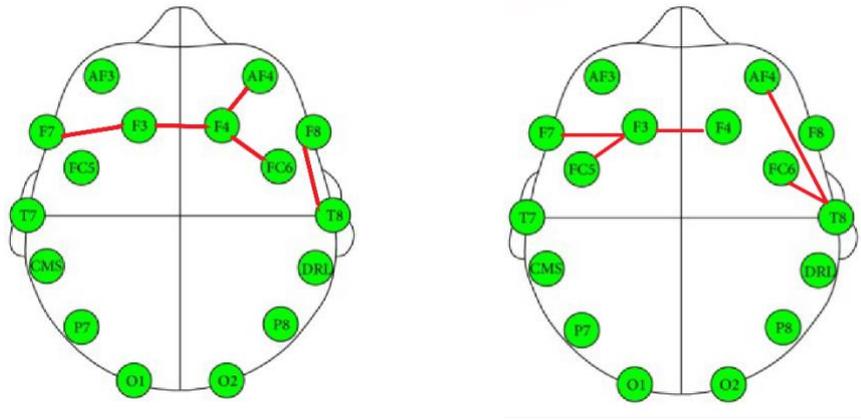
Tabel 6. Hasil perhitungan nilai rata-rata *wPLI* pada anak ASD dan anak normal untuk pasangan elektroda inter-hemisphere

Pasangan Elektroda	Anak ASD					Anak Normal				
	Delta	Theta	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Theta	Alpha	Beta	Gamma
AF3-AF4	0.153	0.136	0.118	0.061	0.066	0.183	0.141	0.106	0.066	0.078
F3-F4	0.199	0.126	0.113	0.088	0.116	0.224	0.197	0.082	0.083	0.056
F7-F8	0.252	0.173	0.065	0.049	0.077	0.185	0.129	0.123	0.075	0.071
FC5-FC6	0.172	0.136	0.118	0.061	0.066	0.183	0.141	0.106	0.066	0.078
T7-T8	0.264	0.207	0.083	0.078	0.056	0.090	0.117	0.058	0.063	0.068

Berdasarkan data pada tabel 4, 5 dan 6 tampak bahwa nilai rata-rata *wPLI* pada beberapa pasangan elektroda pada anak ASD lebih rendah dibandingkan anak normal untuk kelima rentang pita frekuensi (delta, theta, alpha, beta dan gamma). Pada area intra-hemisphere kanan, pasangan elektroda yang mengalami penurunan nilai *wPLI* terbanyak terjadi pada pita frekuensi alpha (AF4-F4, AF4-T8, F8-T8, F4-FC6, F4-T8, FC6-T8). Pada area intra-hemisphere kiri, pasangan elektroda terbanyak yang mengalami penurunan nilai *wPLI* yaitu pada pita frekuensi beta (AF3-F3, AF3-T7, F7-F3, F3-FC5, F3-T7, FC5-T7). Sedangkan pada pasangan elektroda inter-hemisphere, penurunan nilai *wPLI* terbanyak pada pita frekuensi gamma. Hal ini mengindikasikan bahwa pada penderita ASD mengalami penurunan konektivitas fungsional otak pada frekuensi tinggi. Aktivitas pada pita frekuensi gamma ini dikaitkan dengan fungsi perseptual dan kognitif yang terganggu pada pada penderita ASD.

3.2 Hasil Uji Statistik

Berdasarkan hasil uji statistik *independent t-test* dengan tingkat signifikansi 95% ($p\text{-value}<0.05$) diperoleh perbedaan yang signifikan antara nilai PLI pada anak ASD dan anak normal terjadi pada pasangan elektroda AF4-F4, F4-FC6 (alpha), F8-T8 (theta), F7-F3 (delta) dan F3-F4 (gamma). Sedangkan untuk perhitungan dengan w PLI diperoleh perbedaan yang signifikan terjadi pada pasangan elektroda AF4-T8, FC6-T8 (alpha), FC3-FC5 (delta), F7-F3 (theta) dan F3-F4 (gamma). Hasil ini menunjukkan bahwa pada anak ASD mengalami penurunan konektivitas fungsional otak pada area tertentu pada setiap pita frekuensinya. Secara grafis pasangan elektroda yang mengalami penurunan nilai PLI secara signifikan ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Pasangan elektroda dengan perbedaan yang signifikan untuk nilai PLI (kiri) dan w PLI (kanan) antara anak ASD dan anak normal

ASD merupakan gangguan pada perkembangan otak dan saraf yang dimulai sejak awal masa kanak-kanak dan berlangsung sepanjang hidup seseorang. Gangguan perkembangan saraf pada ASD ditandai dengan penurunan dalam bahasa dan komunikasi, interaksi sosial dan bermain serta imajinasi, dengan terbatasnya perhatian akan minat dan perilaku yang berulang-ulang. Gangguan pada penderita ASD ini berkaitan dengan perubahan fungsional pada bagian lobus frontal dan lobus temporal. Hasil analisis QEEG secara umum menunjukkan adanya peningkatan aktivitas delta-theta di area frontal otak yang berhubungan dengan kemampuan kognitif yang buruk. Hasil pengukuran *brain rate* pada Cz juga menunjukkan aktivitas otak yang lambat pada anak ASD [14].

Perubahan fungsional otak pada anak ASD dapat dikaji salah satunya dengan menganalisis konektivitas fungsional sinyal antara bagian-bagian otak yang berbeda berdasarkan hasil rekaman EEG. Besaran yang dipilih untuk menilai konektivitas dalam penelitian ini yaitu PLI dan w PLI. Jika dibandingkan antara kedua metode tersebut, w PLI memiliki kelebihan dibanding dengan PLI. Pada perhitungan w PLI tidak terlalu terpengaruh dengan sumber *noise* dan lebih kuat untuk mendeteksi fase sinkronisasi serta perubahan fase sinkronisasi [11]. Dalam penelitian ini hasil penurunan konektivitas fungsional otak menggunakan w PLI terdeteksi lebih besar jika dibandingkan dengan PLI. Menurut Stam (2007) PLI adalah metode yang paling baik untuk mendeteksi perubahan pada sinkronisasi pada data model osilator maupun data hasil perekaman pada manusia jika dibandingkan dengan *Phase Coherence* (PC) serta *Imaginary Component of Coherency* (IC). Selain itu, PLI juga tidak mudah terpengaruh oleh artifak sumber listrik serta elektroda referensi yang aktif [12].

Hasil penelitian ini relevan dengan hasil penelitian sebelumnya yang lebih banyak menerapkan metode linier. Penelitian yang dilakukan Coben, dkk (2008) menunjukkan adanya penurunan konektivitas fungsional otak anak penderita ASD berdasarkan besaran koherensi pada intra-hemisphere dan inter-hemisphere pada pita delta dan theta [15]. Handayani, dkk (2017) melaporkan adanya penurunan konektivitas fungsional otak pada area frontal di semua pita frekuensi [16]. Penelitian Zhou (2020) juga menunjukkan adanya penurunan konektivitas fungsional otak yang signifikan pada *homotopic* inter-hemisphere dan *heterotopic* inter-hemisphere [17]. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Khan (2013) menunjukkan konektivitas fungsional otak penderita ASD yang diukur

dengan koherensi mengalami penurunan pada pita alpha [18]. Hasil penelitian yang bervariasi terkait dengan berkurangnya konektivitas fungsional otak pada penderita ASD disebabkan karena ASD sendiri memiliki spektrum yang luas. Pada setiap spektrum memiliki karakteristik yang berbeda. Contoh dari spektrum ASD yang terkait dengan penurunan fungsional lobus temporal adalah *anxiety* dan *auditory processing*. Pada penderita ASD dengan *anxiety* memiliki gangguan yang terkait dengan masalah sensorik seperti reaksi terhadap suara keras dan mengalami kecemasan yang berlebih. Sedangkan pada penderita ASD dengan *auditory processing* memiliki gangguan dengan pemrosesan pendengaran.

4. Simpulan

Berdasarkan pemaparan hasil penelitian ini, maka dapat disimpulkan bahwa pada anak ASD mengalami penurunan konektivitas fungsional otak pada semua rentang pita frekuensi untuk pasangan elektroda yang berbeda-beda. Penurunan konektivitas fungsional otak pada anak ASD dominan terjadi pada lobus frontal yang berperan dalam fungsi intelektual, seperti proses berpikir, penalaran, pemecahan masalah, pengambilan keputusan, dan perencanaan. Penggunaan besaran PLI dan w PLI dalam menilai perubahan konektivitas fungsional otak pada anak ASD lebih *robust* jika dibandingkan dengan metode linier seperti koherensi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh subjek uji yang telah berpartisipasi dalam penelitian ini serta Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan pendanaan.

Daftar Pustaka

- [1] American Psychiatric Association 2013 *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*, 5th Edn. (Washington, DC American Psychiatric Association)
- [2] Christensen D and Zubler J 2020 CE: From the CDC: Understanding Autism Spectrum Disorder *The American journal of nursing* **120**(10) p 30–37
- [3] Babaeehazvini P, Rueda-Delgado L M, Gooijers J, Swinnen S P and Daffertshofer A 2021 Brain Structural and Functional Connectivity: A Review of Combined Works of Diffusion Magnetic Resonance Imaging and Electro-Encephalography *Front. Hum. Neurosci* **15** Article 721206
- [4] Fingelkurts A A, Fingelkurts A A and Kähkönen S 2005 Functional connectivity in the brain-is it an elusive concept? *Neuroscience and biobehavioral reviews* **28**(8) p 827–836
- [5] Sakkalis V 2011 Review of advanced techniques for the estimation of brain connectivity measured with EEG/MEG *Computers in biology and medicine* **41**(12) p 1110–1117
- [6] Engel A K, Fries P and Singer W 2001 Dynamic predictions: oscillations and synchrony in top-down processing *Nature Reviews Neuroscience* **2**(10) p 704-716
- [7] Rippon G, Brock J, Brown C and Boucher J 2007 Disordered connectivity in the autistic brain: challenges for the ‘new psychophysiology’ *International Journal of Psychophysiology* **63**(2) p 164-172
- [8] Just M A, Cherkassky V L, Keller T A and Minshew N J 2004 Cortical activation and synchronization during sentence comprehension in high-functioning autism: evidence of underconnectivity *Brain* **127**(8) p 1811-1821
- [9] Just M A, Cherkassky V L, Keller T A, Kana R K and Minshew N J 2007 Functional and anatomical cortical underconnectivity in autism: evidence from an fMRI study of an executive function task and corpus callosum morphometry *Cerebral Cortex* **17**(4) p 951-961
- [10] Tommerdahl M, Tannan V, Holden J K and Baranek G T 2008 Absence of stimulus-driven synchronization effects on sensory perception in autism: evidence for local underconnectivity *Behavioral and Brain Functions* **4**(19) p 1-9
- [11] Hardmeier M, Hatz F, Bousleiman H, Schindler C and Stam C J 2014 Reproducibility of Functional Connectivity and Graph Measures Based on the Phase Lag Index (PLI) and Weighted Phase Lag Index (wPLI) Derived from High Resolution EEG *PLoS ONE* **9**(10): e108648
- [12] Stam C J, Nolte G, Daffertshofer A 2007 Phase lag index: assessment of functional connectivity from multi channel eeg and meg with diminished bias from common sources *Hum. Brain Mapp.* **28** p 1178–1193
- [13] Vinck M, Oostenveld R, Van Wingerden M, Battaglia F and Pennartz C 2011 An improved index of phase-synchronization for electrophysiological data in the presence of volume-conduction, noise and sample-size bias *NeuroImage* **55**(4) p 1548–65
- [14] Pop-Jordanova N, Zorcec T, Demerdzieva A, and Gucev Z 2010 QEEG Characteristics and Spectrum Weighted Frequency for Children Diagnosed as Autistic Spectrum Disorder *NonlinearBiomed.Phys.* **4**(4)
- [15] Coben R, Clarke A R, Hudspeth W and Barry R J 2008 EEG power and coherence in autistic spectrum disorder *Clinical neurophysiology* **119**(5) 1002–1009
- [16] Handayani N, Pratama S H, Khotimah S N, Arif I, Haryanto F 2017 Analisis Spektral Daya dan Koherensi EEG Pada Anak Penderita Autism Spectrum Disorder *Wahana Fisika* **2**(2) p 42 – 53
- [17] Zhou T, Kang J, Cong F, Li X 2020 Early Childhood Developmental Functional Connectivity Of Autistic Brains With Non-Negative Matrix Factorization *NeuroImage: Clinical* **26** p 102251
- [18] Khan S, Gramfort A, Shetty N R, Kitzbichler M G, Ganesan S, Moran J M, Lee S M, Gabrieli J D, Tager-Flusberg H B, Joseph R M, Herbert M R, Hämäläinen M S, Kenet T 2013 Local And Long-Range Functional Connectivity Is Reduced In Concert In Autism Spectrum

Disorders *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*
110(8)