

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1 Gambaran Umum Hasil Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik sinyal emisi akustik yang dihasilkan oleh fenomena *corona discharge* menggunakan metode Fast Fourier Transform (FFT) dan *Linear Predictive Coding* (LPC). Penelitian diawali dengan perancangan sistem akuisisi data yang terdiri atas sensor ultrasonik MA40S4R sebagai pendeteksi emisi akustik, rangkaian penguat sinyal (*operational amplifier*), mikrokontroler ESP32-WROOM-32 sebagai perangkat akuisisi data, serta perangkat lunak berbasis Python yang digunakan untuk pengolahan dan analisis sinyal.

Sistem akuisisi data bekerja dengan mendeteksi gelombang ultrasonik yang dipancarkan akibat terjadinya fenomena *corona discharge*. Sinyal analog yang diterima sensor terlebih dahulu diperkuat menggunakan rangkaian penguat, kemudian dikonversi menjadi data digital melalui *Analog to Digital Converter* (ADC) pada mikrokontroler ESP32. Selanjutnya data hasil akuisisi dikirim ke komputer melalui komunikasi serial dan disimpan dalam format CSV untuk memudahkan proses analisis menggunakan perangkat lunak yang telah dikembangkan.

Pengambilan data dilakukan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi menggunakan peralatan pembangkit tegangan tinggi yang dihubungkan dengan objek uji melalui rangkaian pengujian. Sensor ultrasonik ditempatkan pada posisi tertentu di dekat sumber *corona discharge* untuk menangkap emisi akustik yang dihasilkan selama proses pengujian. Selama pengambilan data, posisi sensor, jarak terhadap objek uji, serta konfigurasi rangkaian dijaga tetap agar setiap pengukuran dilakukan pada kondisi yang konsisten. Proses pengambilan data penelitian ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Proses Pengambilan Data Emisi Akustik *Corona discharge* di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi

Data hasil pengukuran kemudian diolah menggunakan perangkat lunak Python melalui beberapa tahapan, yaitu analisis statistik, visualisasi sinyal pada domain waktu, analisis domain frekuensi menggunakan metode FFT, serta analisis karakteristik sinyal menggunakan metode LPC. Tahapan pengolahan tersebut bertujuan untuk mengetahui perubahan karakteristik sinyal emisi akustik yang terjadi akibat fenomena *corona discharge*.

Pada penelitian ini pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu kondisi baseline dan kondisi *corona discharge*. Kondisi baseline merupakan kondisi ketika belum terjadi *corona discharge*, sehingga sinyal yang diperoleh hanya berasal dari noise lingkungan dan karakteristik dasar sistem pengukuran. Sementara itu, kondisi *corona discharge* merupakan kondisi ketika terjadi pelepasan muatan sebagian pada udara di sekitar elektroda akibat pemberian tegangan tinggi sehingga menghasilkan emisi akustik yang dapat dideteksi oleh sensor ultrasonik.

Kedua kondisi tersebut diproses menggunakan tahapan pengolahan sinyal yang sama sehingga hasil analisis dapat dibandingkan secara langsung. Perbandingan dilakukan terhadap karakteristik statistik sinyal, bentuk gelombang pada domain waktu, distribusi spektrum frekuensi hasil FFT, serta kemampuan metode LPC dalam merepresentasikan karakteristik sinyal emisi akustik pada masing-masing kondisi. Hasil analisis tersebut menjadi dasar untuk mengevaluasi perbedaan karakteristik sinyal antara kondisi baseline dan kondisi *corona discharge*, yang selanjutnya dibahas secara rinci pada subbab berikutnya.

4.2 Pre-processing Data

Sebelum dilakukan analisis pada domain waktu, sinyal hasil akuisisi data terlebih dahulu divisualisasikan dalam untuk melihat karakteristik awal sinyal yang diperoleh dari sensor ultrasonik MA40S4R. Visualisasi ini bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai perubahan amplitudo sinyal yang terjadi selama proses pengukuran sehingga karakteristik sinyal dapat diamati secara lebih jelas sebelum dilakukan pengolahan lebih lanjut menggunakan metode statistik, *Fast Fourier Transform* (FFT), dan *Linear Predictive Coding* (LPC).

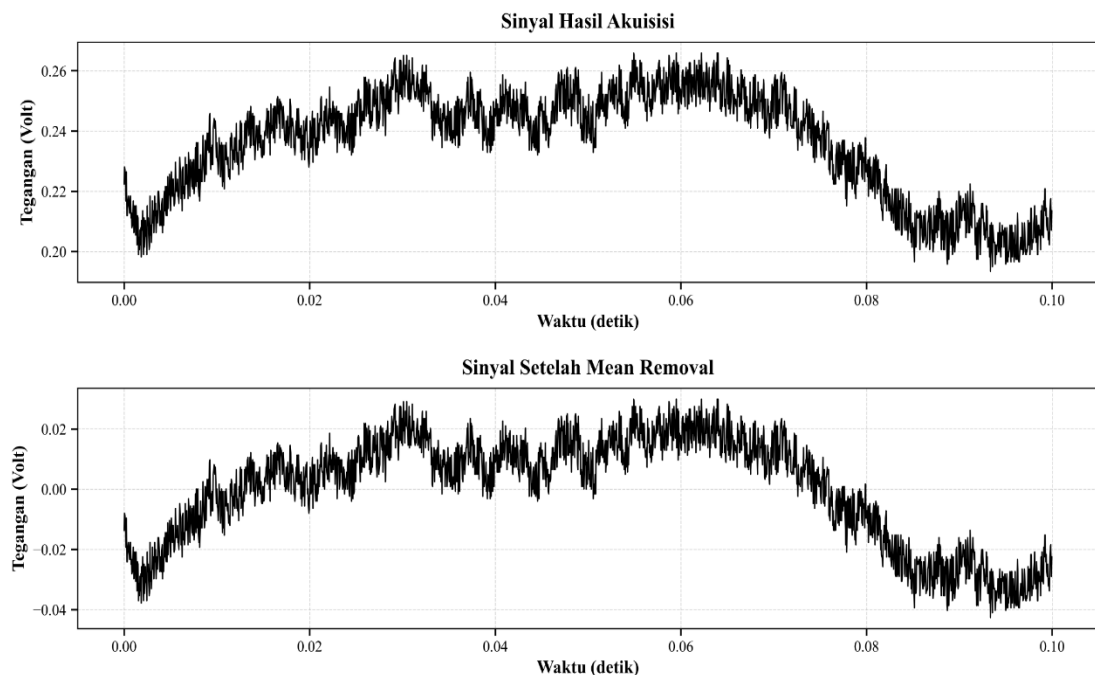
Pada penelitian ini, waveform diperoleh dari data hasil pembacaan ADC mikrokontroler ESP32 yang telah melalui proses normalisasi amplitudo sehingga bentuk sinyal lebih mudah diamati tanpa mengubah karakteristik utama dari data hasil pengukuran. Sumbu horizontal menunjukkan jumlah sampel, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan amplitudo sinyal yang telah dinormalisasi.

4.2.1 Hasil Akuisisi Data Sinyal Baseline

Gambar 4.2 menunjukkan hasil akuisisi sinyal pada kondisi baseline, yaitu kondisi ketika isolator polimer diberikan tegangan uji sebesar 5 kV sehingga belum terbentuk fenomena *corona discharge*. Pengukuran dilakukan menggunakan sensor ultrasonik MA40S4R yang ditempatkan pada jarak sekitar 5 cm dari elektroda tegangan tinggi. Data keluaran sensor kemudian dikondisikan melalui rangkaian

penguat, dikonversi menjadi sinyal digital oleh mikrokontroler ESP32, dan selanjutnya diubah ke dalam satuan tegangan (Volt) untuk keperluan analisis.

Berdasarkan Gambar 4.2, sinyal hasil akuisisi memiliki pola yang relatif halus dengan perubahan amplitudo yang berlangsung secara perlahan. Tegangan sinyal berada pada kisaran sekitar 0,20–0,26 Volt dan tidak menunjukkan adanya lonjakan amplitudo yang signifikan. Pola tersebut mengindikasikan bahwa sinyal yang diterima sensor sebagian besar berasal dari noise lingkungan, noise elektronik pada rangkaian akuisisi, serta karakteristik dasar sensor ultrasonik. Dengan kata lain, pada kondisi ini belum terdapat emisi akustik yang cukup kuat sebagai indikasi terjadinya pelepasan muatan parsial (*partial discharge*).



Gambar 4. 2 Karakteristik Bentuk Gelombang Sinyal Emisi Akustik pada Kondisi Baseline

Selanjutnya dilakukan proses mean removal untuk menghilangkan komponen DC atau nilai rata-rata sinyal sehingga sinyal berosilasi di sekitar titik nol. Hasil proses tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.x(b). Setelah nilai rata-rata dihilangkan, bentuk gelombang tetap mempertahankan karakteristik aslinya, namun memiliki rata-rata mendekati nol sehingga lebih sesuai untuk proses analisis lanjutan, seperti analisis domain waktu, Fast Fourier Transform (FFT), dan ekstraksi ciri menggunakan metode *Linear Predictive Coding* (LPC). Tidak ditemukannya impuls beramplitudo tinggi pada sinyal hasil mean removal semakin menunjukkan bahwa kondisi baseline belum mengalami fenomena *corona discharge*.

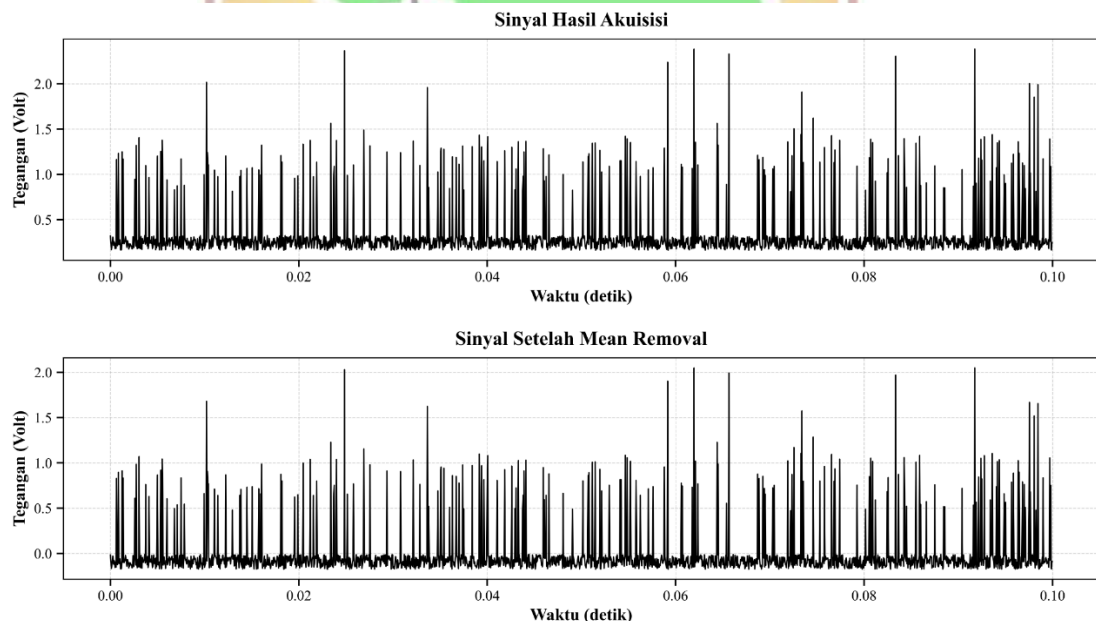
Secara keseluruhan, data baseline digunakan sebagai data referensi untuk membandingkan perubahan karakteristik sinyal pada kondisi ketika *corona*

discharge mulai terjadi. Dengan adanya data acuan ini, setiap perubahan amplitudo, energi sinyal, maupun spektrum frekuensi pada kondisi pengujian berikutnya dapat dianalisis secara lebih objektif.

4.2.2 Hasil Akuisisi Data Sinyal *Corona discharge*

Gambar 4.3 menunjukkan hasil akuisisi sinyal pada kondisi *corona discharge*, yaitu ketika isolator polimer diberikan tegangan uji sebesar 30 kV sehingga medan listrik yang terbentuk telah cukup besar untuk memicu munculnya pelepasan sebagian (partial discharge) pada daerah sekitar elektroda tegangan tinggi. Pada kondisi ini sensor ultrasonik menangkap gelombang akustik yang dihasilkan oleh aktivitas *corona* dan mengubahnya menjadi sinyal listrik yang selanjutnya diproses oleh sistem akuisisi data.

Berdasarkan Gambar 4.3, terlihat adanya lonjakan-lonjakan amplitudo (impuls) yang muncul secara acak sepanjang waktu pengamatan. Amplitudo sinyal sesekali meningkat hingga mendekati 2 Volt, jauh lebih tinggi dibandingkan kondisi baseline yang hanya berada pada kisaran sekitar 0,2 Volt. Kemunculan impuls-impuls tersebut menunjukkan adanya pelepasan energi akibat ionisasi udara di sekitar elektroda bertegangan tinggi. Pola ini merupakan karakteristik khas dari fenomena *corona discharge* yang menghasilkan sinyal emisi akustik berbentuk impuls dengan amplitudo yang berubah-ubah.



Gambar 4. 3 Karakteristik Bentuk Gelombang Sinyal Emisi Akustik pada Kondisi *Corona*

Setelah dilakukan proses mean removal, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.3, komponen DC pada sinyal berhasil dihilangkan sehingga rata-rata sinyal berada di sekitar nol. Walaupun demikian, impuls-impuls dengan amplitudo tinggi masih terlihat jelas. Hal ini menunjukkan bahwa proses mean removal hanya menghilangkan offset sinyal tanpa mengubah informasi utama yang terkandung pada sinyal *corona*. Dengan demikian, sinyal hasil mean removal lebih representatif

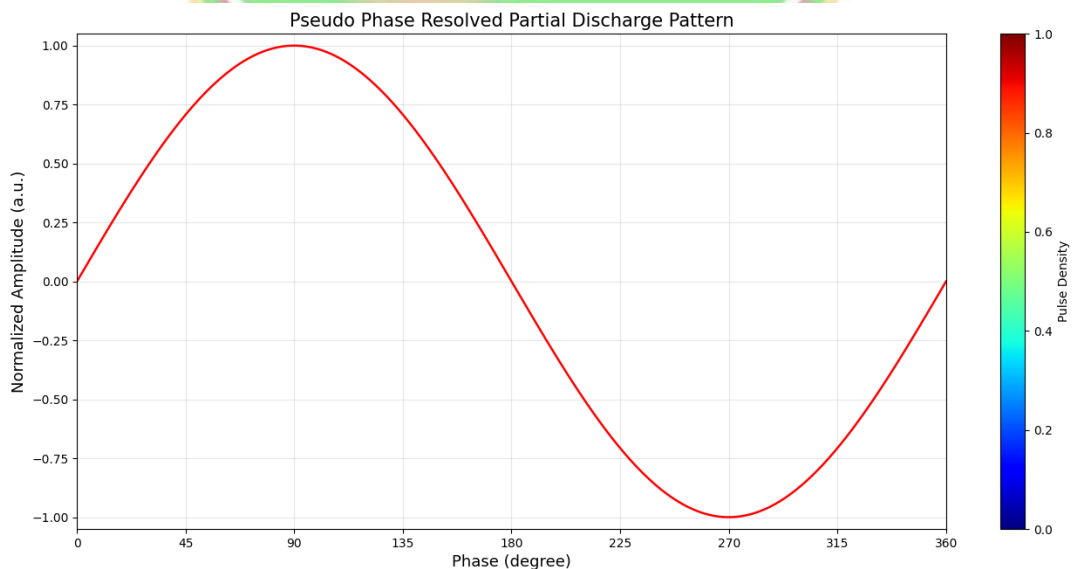
untuk dianalisis pada domain waktu maupun domain frekuensi karena pengaruh komponen DC telah dieliminasi.

Jika dibandingkan dengan kondisi baseline, sinyal *corona* memperlihatkan perbedaan yang sangat jelas. Pada kondisi baseline sinyal didominasi oleh fluktuasi kecil yang relatif stabil, sedangkan pada kondisi *corona* muncul impuls-impuls beramplitudo tinggi dengan frekuensi kemunculan yang lebih banyak. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan tegangan uji menyebabkan bertambahnya intensitas aktivitas ionisasi di sekitar elektroda sehingga energi emisi akustik yang diterima sensor juga meningkat.

Hasil akuisisi data ini menunjukkan bahwa sistem pengukuran yang dikembangkan mampu membedakan kondisi tanpa *corona* dan kondisi dengan *corona* berdasarkan karakteristik sinyal yang diperoleh. Oleh karena itu, data hasil akuisisi selanjutnya digunakan sebagai masukan pada tahap analisis domain waktu, transformasi Fast Fourier Transform (FFT), serta ekstraksi ciri menggunakan metode *Linear Predictive Coding* (LPC) untuk memperoleh parameter-parameter yang dapat digunakan dalam identifikasi karakteristik *corona discharge*.

4.2.3 Visualisasi Pseudo PRPD Kondisi Baseline

Pada kondisi baseline, sistem pengukuran dioperasikan tanpa adanya fenomena *corona discharge* sehingga sinyal yang diterima sensor ultrasonik hanya berasal dari noise lingkungan dan noise elektronik pada rangkaian akuisisi data. Hasil visualisasi Pseudo Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa tidak terdapat titik impuls yang muncul pada seluruh rentang fase 0° – 360° . Grafik hanya menampilkan kurva sinus merah sebagai referensi fase tegangan AC, sedangkan distribusi impuls hasil deteksi tidak terlihat.



Gambar 4. 4 Visualisasi Pseudo Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) Sinyal Emisi Akustik pada Kondisi Baseline

Tidak munculnya impuls pada grafik menunjukkan bahwa amplitudo sinyal yang diperoleh selama pengukuran berada di bawah nilai ambang (*threshold*) yang telah ditetapkan pada proses deteksi. Dengan demikian, algoritma tidak mendeteksi adanya pulsa emisi akustik yang memiliki energi cukup besar untuk diklasifikasikan sebagai aktivitas *corona discharge*.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi baseline memiliki tingkat gangguan yang sangat rendah sehingga hanya mengandung sinyal dasar sistem pengukuran. Hal ini sesuai dengan tujuan pengambilan data baseline, yaitu sebagai data pembanding untuk mengetahui perubahan karakteristik sinyal setelah fenomena *corona discharge* dibangkitkan.

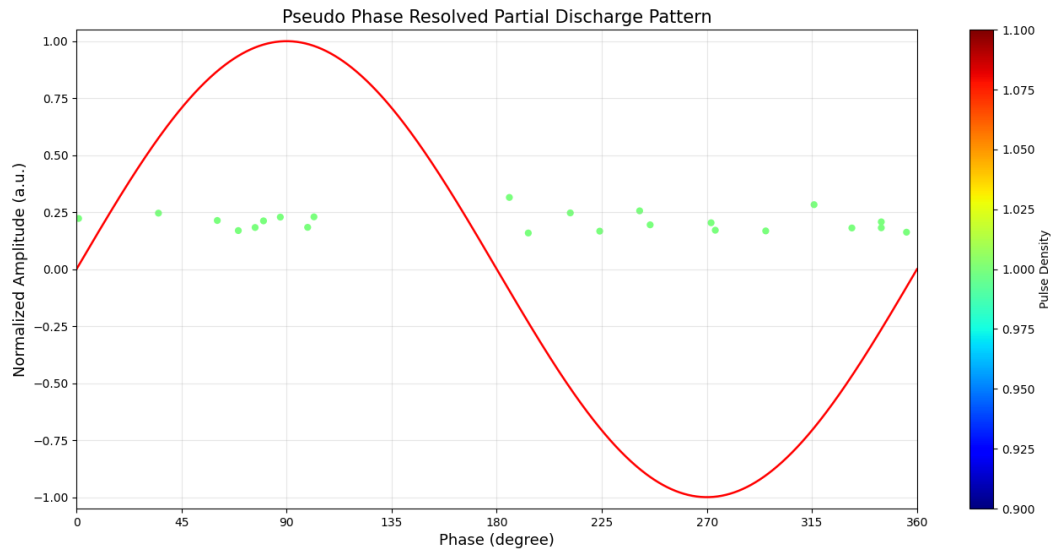
Selain itu, tidak adanya distribusi impuls pada seluruh sudut fase mengindikasikan bahwa sensor ultrasonik dan sistem akuisisi data tidak menghasilkan sinyal palsu (*false detection*) selama proses pengukuran. Dengan demikian, kondisi baseline dapat dijadikan acuan yang baik untuk membedakan karakteristik sinyal sebelum dan sesudah munculnya fenomena *corona discharge*.

Berdasarkan hasil visualisasi tersebut dapat disimpulkan bahwa pada kondisi baseline tidak terdeteksi adanya aktivitas emisi akustik yang berkaitan dengan fenomena *corona discharge*. Oleh karena itu, grafik Pseudo PRPD hanya menampilkan kurva referensi fase tanpa adanya pola distribusi impuls, yang menunjukkan bahwa sistem berada pada kondisi normal dan bebas dari pelepasan muatan sebagian selama proses pengambilan data.

4.2.2 Visualisasi Pseudo PRPD Kondisi *Corona discharge*

Gambar 4.5 menunjukkan hasil visualisasi Pseudo Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) pada kondisi *corona discharge*. Grafik ini menampilkan hubungan antara amplitudo sinyal hasil ekstraksi menggunakan metode *envelope* terhadap sudut fase referensi dalam satu siklus gelombang AC (0° – 360°). Kurva sinus berwarna merah digunakan sebagai referensi fase tegangan, sedangkan titik-titik berwarna hijau menunjukkan impuls sinyal yang berhasil dideteksi dari data hasil akuisisi.

Berdasarkan Gambar 4.5 terlihat bahwa impuls sinyal muncul pada beberapa sudut fase selama satu siklus gelombang AC. Sebagian besar impuls memiliki amplitudo ternormalisasi pada rentang 0,16 hingga 0,32 a.u. dengan amplitudo maksimum sekitar 0,31 a.u. Titik-titik impuls tersebut tidak tersebar secara merata, melainkan membentuk beberapa kelompok pada fase sekitar 60° – 100° , 180° – 250° , dan 300° – 350° . Pola tersebut menunjukkan bahwa aktivitas *corona* menghasilkan impuls ultrasonik yang muncul pada waktu-waktu tertentu selama satu periode tegangan AC.



Gambar 4. 5 Visualisasi Pseudo Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) Sinyal Emisi Akustik pada Kondisi *Corona discharge*

Apabila ditinjau dari distribusi amplitudonya, sebagian besar impuls berada pada rentang amplitudo yang relatif seragam. Hal ini menunjukkan bahwa pelepasan muatan yang terjadi selama pengujian menghasilkan energi akustik yang cukup stabil. Tidak ditemukannya lonjakan amplitudo yang sangat tinggi mengindikasikan bahwa fenomena yang terdeteksi masih berupa *corona discharge* dan belum berkembang menjadi pelepasan muatan yang lebih besar seperti *surface discharge* atau *arc discharge*.

Selain itu, nilai Pulse Density pada sisi kanan grafik menunjukkan tingkat kepadatan kemunculan impuls pada setiap kombinasi fase dan amplitudo. Pada hasil pengujian ini kepadatan impuls masih relatif rendah karena sebagian besar titik hanya muncul satu kali pada setiap posisi fase. Hal tersebut menunjukkan bahwa aktivitas *corona* terjadi secara periodik namun tidak kontinu, sehingga impuls yang dihasilkan masih bersifat terpisah-pisah.

Secara keseluruhan, hasil visualisasi Pseudo PRPD menunjukkan bahwa metode pengolahan sinyal berbasis *envelope* mampu mengidentifikasi posisi kemunculan impuls *corona* terhadap fase referensi. Meskipun visualisasi ini belum menggunakan sinkronisasi langsung terhadap tegangan AC seperti pada sistem PRPD standar, pola yang diperoleh tetap memberikan informasi mengenai distribusi temporal impuls *corona* sehingga dapat digunakan sebagai analisis pendukung dalam mengidentifikasi karakteristik sinyal emisi akustik pada kondisi *corona discharge*.

4.3 Analisis Statistik Sinyal

Analisis statistik dilakukan terhadap seluruh data hasil akuisisi sinyal pada kondisi *baseline* dan *corona*. Tujuan analisis ini adalah untuk mengetahui karakteristik dasar sinyal berdasarkan parameter statistik sebelum dilakukan analisis lebih lanjut menggunakan metode FFT dan LPC.

Parameter statistik yang dihitung meliputi nilai mean, median, *Root Mean Square* (RMS), standar deviasi, variansi, serta peak-to-peak. Seluruh parameter tersebut diperoleh secara otomatis menggunakan perangkat lunak berbasis Python yang dikembangkan dalam penelitian ini.

Hasil perhitungan statistik untuk ketiga kondisi pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Table 4. 1 Statistik Seluruh Data Hasil Akuisisi Sinyal

No	Parameter	Baseline	Corona
1	Mean	0,236	0,334
2	Median	0,24	0,251
3	RMS	0,236	0,451
4	Standar Deviasi	0,017	0,303
5	Variansi	0,000317	0,091998
6	Peak to peak	0,072	2,222

4.3.1 Analisis Nilai Mean

Nilai mean menunjukkan rata-rata amplitudo sinyal yang diperoleh selama proses akuisisi. Berdasarkan Tabel 4.1, sinyal baseline memiliki nilai mean sebesar 0,236 V, sedangkan sinyal *corona discharge* memiliki nilai mean sebesar 0,334 V. Terjadi peningkatan nilai rata-rata sebesar 0,098 V atau sekitar 41,5% dibandingkan kondisi baseline.

Peningkatan nilai mean menunjukkan bahwa keberadaan *corona discharge* menyebabkan level tegangan rata-rata sinyal menjadi lebih tinggi. Hal ini terjadi karena aktivitas pelepasan muatan parsial menghasilkan energi tambahan yang diterima oleh sensor ultrasonik sehingga amplitudo rata-rata sinyal meningkat. Dengan demikian, nilai mean dapat digunakan sebagai salah satu indikator awal adanya aktivitas *corona discharge*.

4.3.2 Analisis Nilai Median

Median merupakan nilai tengah dari seluruh data sinyal sehingga relatif tidak dipengaruhi oleh nilai ekstrem atau spike. Pada kondisi baseline diperoleh median sebesar 0,240 V, sedangkan pada kondisi *corona discharge* meningkat menjadi 0,251 V.

Peningkatan median menunjukkan bahwa sebagian besar sampel sinyal *corona* memiliki amplitudo yang lebih tinggi dibandingkan kondisi normal. Walaupun peningkatannya tidak sebesar nilai mean, hasil ini menunjukkan bahwa perubahan sinyal akibat *corona* tidak hanya disebabkan oleh beberapa lonjakan amplitudo, tetapi juga terjadi pada mayoritas sampel sinyal.

4.3.3 Analisis Nilai RMS

Nilai RMS menggambarkan energi efektif yang terkandung pada suatu sinyal. Berdasarkan hasil analisis diperoleh nilai RMS sebesar 0,236 V pada kondisi baseline dan meningkat menjadi 0,451 V pada kondisi *corona discharge*.

Terjadi peningkatan RMS sebesar 91,1%, yang menunjukkan bahwa energi sinyal *corona* jauh lebih besar dibandingkan sinyal baseline. Hal ini sesuai dengan

karakteristik *corona discharge* yang menghasilkan gelombang akustik akibat ionisasi udara di sekitar konduktor. Energi tambahan tersebut menyebabkan nilai RMS meningkat secara signifikan. Oleh karena itu, parameter RMS merupakan salah satu parameter yang sangat efektif untuk membedakan kondisi normal dan kondisi yang mengalami *corona discharge*.

4.3.4 Analisis Standar Deviasi

Standar deviasi menunjukkan tingkat penyebaran atau fluktuasi data terhadap nilai rata-ratanya. Pada kondisi baseline diperoleh standar deviasi sebesar 0,017 V, sedangkan pada kondisi *corona discharge* meningkat menjadi 0,303 V.

Peningkatan standar deviasi yang sangat besar menunjukkan bahwa amplitudo sinyal *corona* mengalami fluktuasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan kondisi baseline. Pada kondisi normal, sinyal cenderung stabil sehingga penyebaran datanya kecil. Sebaliknya, saat terjadi *corona discharge* muncul impuls-impuls acak yang menyebabkan variasi amplitudo meningkat secara signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa sinyal *corona* memiliki karakteristik yang jauh lebih dinamis dibandingkan sinyal baseline.

4.3.5 Analisis Variansi

Variansi merupakan ukuran statistik yang menggambarkan besarnya penyebaran data dan merupakan kuadrat dari standar deviasi. Berdasarkan hasil analisis diperoleh variansi sebesar 0,000317 V² pada kondisi baseline dan meningkat menjadi 0,091998 V² pada kondisi *corona discharge*.

Nilai variansi pada sinyal *corona* meningkat lebih dari 290 kali lipat dibandingkan baseline. Hal ini menunjukkan bahwa amplitudo sinyal *corona* memiliki tingkat variasi yang jauh lebih besar. Peningkatan variansi ini mengindikasikan adanya impuls-impuls acak yang dihasilkan oleh proses pelepasan muatan listrik pada *corona discharge* sehingga distribusi amplitudo menjadi semakin lebar.

4.3.6 Analisis Peak-to-Peak

Peak-to-Peak merupakan selisih antara nilai amplitudo maksimum dan minimum suatu sinyal. Parameter ini menunjukkan rentang amplitudo keseluruhan dari sinyal yang direkam. Pada kondisi baseline diperoleh nilai Peak-to-Peak sebesar 0,072 V, sedangkan pada kondisi *corona discharge* meningkat drastis menjadi 2,222 V.

Terjadi peningkatan lebih dari 30 kali lipat, yang menunjukkan bahwa sinyal *corona* menghasilkan impuls dengan amplitudo jauh lebih tinggi dibandingkan kondisi normal. Nilai Peak-to-Peak yang besar merupakan

karakteristik utama sinyal *corona discharge* karena adanya pelepasan muatan listrik yang menghasilkan lonjakan energi sesaat (transient pulse). Lonjakan-lonjakan tersebut menyebabkan rentang amplitudo sinyal menjadi jauh lebih lebar dibandingkan sinyal baseline.

4.3.7 Pembahasan Keseluruhan Statistik

Secara keseluruhan, seluruh parameter statistik menunjukkan adanya perbedaan yang sangat jelas antara kondisi baseline dan *corona discharge*. Nilai mean, median, RMS, standar deviasi, variansi, dan Peak-to-Peak semuanya mengalami peningkatan pada kondisi *corona discharge*.

Di antara seluruh parameter tersebut, RMS, variansi, dan Peak-to-Peak menunjukkan perubahan paling signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa *corona discharge* tidak hanya meningkatkan amplitudo rata-rata sinyal, tetapi juga meningkatkan energi sinyal, memperbesar fluktuasi amplitudo, serta menghasilkan impuls-impuls berenergi tinggi. Oleh karena itu, parameter-parameter statistik tersebut dapat digunakan sebagai indikator yang efektif dalam membedakan kondisi normal dengan kondisi yang mengalami *corona discharge*.

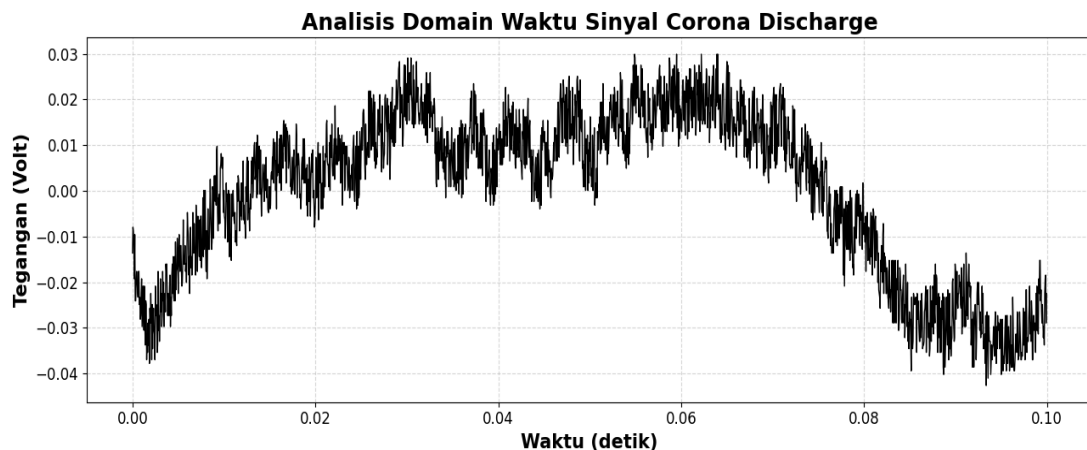
Hasil analisis statistik ini juga konsisten dengan analisis domain waktu, FFT, dan LPC yang telah dilakukan sebelumnya, di mana sinyal *corona* menunjukkan amplitudo yang lebih besar, kandungan frekuensi yang lebih dominan, serta karakteristik sinyal yang lebih kompleks dibandingkan sinyal baseline. Dengan demikian, penggunaan analisis statistik mampu memperkuat proses identifikasi dan karakterisasi sinyal *corona discharge* secara kuantitatif.

4.4 Analisis Domain Waktu

Analisis domain waktu dilakukan untuk mengamati karakteristik sinyal hasil akuisisi secara langsung terhadap perubahan waktu pengukuran. Pada penelitian ini, analisis dilakukan terhadap dua kondisi pengujian, yaitu kondisi baseline pada tegangan uji 5 kV dan kondisi *corona discharge* pada tegangan uji 30 kV. Kedua sinyal telah melalui tahapan pre-processing berupa proses mean removal sehingga komponen DC telah dihilangkan dan sinyal berosilasi di sekitar nilai nol. Tahapan ini bertujuan agar karakteristik sinyal lebih mudah dianalisis pada proses berikutnya, yaitu FFT, ekstraksi ciri, dan *Linear Predictive Coding* (LPC).

4.4.1 Analisis Domain Waktu Kondisi Baseline

Berdasarkan Gambar 4.6, sinyal baseline menunjukkan bentuk gelombang yang relatif halus dengan perubahan amplitudo yang kecil terhadap waktu. Selama interval pengamatan sekitar 0–0,1 detik, sinyal hanya mengalami fluktuasi akibat noise sistem dan gangguan lingkungan yang masih berada dalam batas normal. Nilai amplitudo berkisar antara -0,04 Volt hingga 0,03 Volt, tanpa adanya lonjakan tegangan yang signifikan.



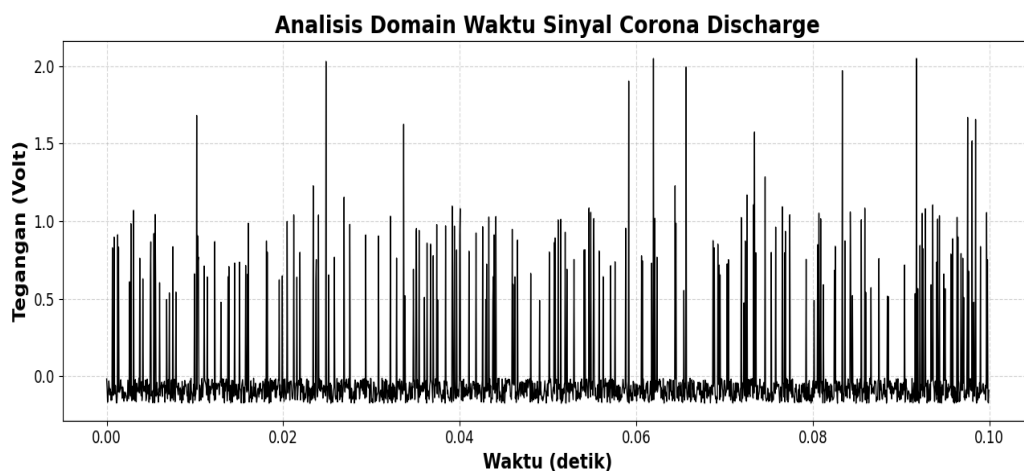
Gambar 4. 6 Domain Waktu Kondisi Baseline

Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa pada tegangan uji 5 kV belum terjadi aktivitas *corona discharge* pada permukaan isolator polimer. Energi sinyal masih didominasi oleh noise elektronik, noise sensor ultrasonik, dan interferensi lingkungan. Oleh karena itu, bentuk sinyal cenderung kontinu dan tidak memperlihatkan impuls-impuls tajam yang merupakan ciri khas pelepasan muatan parsial (partial discharge).

Secara keseluruhan, sinyal baseline dapat dijadikan sebagai referensi (baseline reference) dalam penelitian ini untuk membandingkan perubahan karakteristik sinyal setelah tegangan dinaikkan hingga mencapai kondisi terjadinya *corona discharge*.

4.4. 2 Analisis Domain Waktu Kondisi Corona

Berdasarkan Gambar 4.7, terlihat adanya perubahan karakteristik sinyal yang sangat signifikan setelah tegangan uji dinaikkan menjadi 30 kV. Berbeda dengan sinyal baseline, sinyal *corona* memperlihatkan banyak impuls tajam (spike) yang muncul secara acak sepanjang interval pengukuran.



Gambar 4. 7 Domain Waktu Kondisi Corona

Amplitudo impuls yang terukur mencapai lebih dari 2 Volt, sedangkan level dasar sinyal tetap berada di sekitar nol akibat proses mean removal. Munculnya impuls beramplitudo tinggi menunjukkan adanya pelepasan energi secara tiba-tiba yang berasal dari proses ionisasi udara di sekitar elektroda tegangan tinggi. Fenomena ini merupakan karakteristik utama dari *corona discharge*, dimana ionisasi terjadi ketika kuat medan listrik telah melampaui kekuatan dielektrik udara di sekitar ujung elektroda.

Selain memiliki amplitudo yang jauh lebih besar dibandingkan sinyal baseline, jumlah impuls yang muncul juga jauh lebih banyak. Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas *corona* berlangsung secara berulang selama proses pengukuran. Setiap impuls merepresentasikan satu kejadian pelepasan muatan parsial yang menghasilkan gelombang ultrasonik yang kemudian dideteksi oleh sensor ultrasonik dan diubah menjadi sinyal listrik.

Perbedaan bentuk sinyal antara kondisi baseline dan *corona* menunjukkan bahwa kenaikan tegangan uji menyebabkan peningkatan intensitas pelepasan muatan parsial. Semakin tinggi tegangan yang diberikan, semakin besar medan listrik yang terbentuk sehingga probabilitas terjadinya ionisasi udara dan pelepasan muatan parsial juga meningkat.

4.4.3 Perbandingan Domain Waktu Baseline dan Corona

Apabila dibandingkan secara langsung, kedua sinyal menunjukkan karakteristik yang sangat berbeda. Pada kondisi baseline, sinyal hanya terdiri atas fluktuasi kecil yang berasal dari noise sistem sehingga bentuk gelombangnya relatif stabil. Sebaliknya, pada kondisi *corona discharge* muncul impuls-impuls beramplitudo tinggi yang tersebar sepanjang waktu pengukuran sebagai akibat proses ionisasi udara di sekitar elektroda tegangan tinggi.

Perbedaan karakteristik tersebut membuktikan bahwa parameter domain waktu telah mampu membedakan kondisi normal dan kondisi terjadinya *corona discharge*. Dengan demikian, hasil analisis domain waktu menjadi dasar untuk melakukan analisis lebih lanjut menggunakan Fast Fourier Transform (FFT) pada domain frekuensi serta *Linear Predictive Coding* (LPC) untuk memperoleh karakteristik sinyal *corona* secara lebih komprehensif.

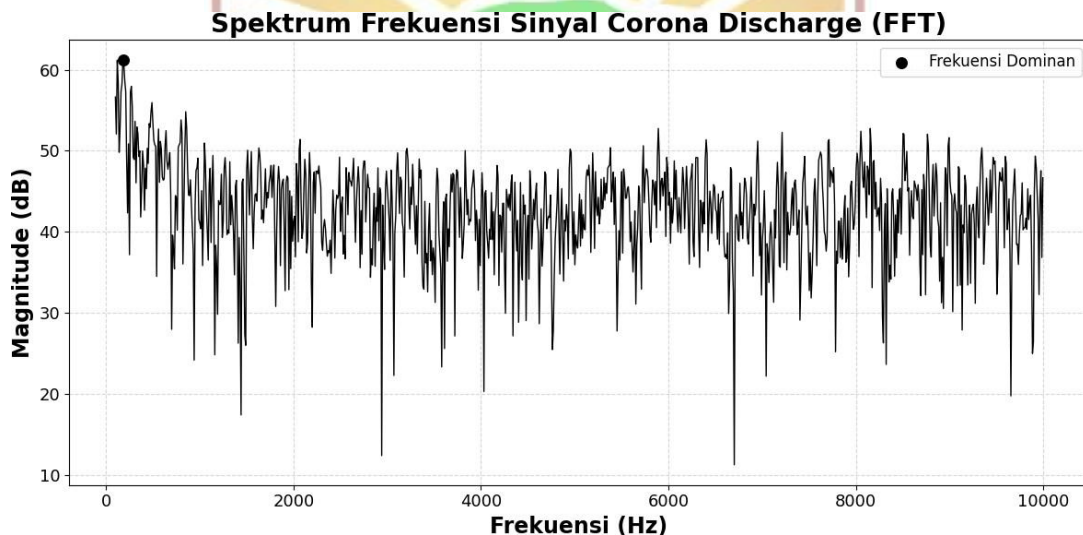
Berdasarkan hasil analisis domain waktu, dapat disimpulkan bahwa sinyal *corona discharge* memiliki karakteristik berupa munculnya impuls-impuls beramplitudo tinggi yang tidak ditemukan pada kondisi baseline. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa sensor ultrasonik berhasil mendeteksi aktivitas pelepasan muatan parsial pada permukaan isolator polimer ketika diberikan tegangan uji sebesar 30 kV. Hasil analisis ini selanjutnya menjadi dasar dalam analisis domain frekuensi menggunakan FFT dan ekstraksi karakteristik sinyal menggunakan metode *Linear Predictive Coding* (LPC).

4.5 Analisis Fast Fourier Transform (FFT)

Analisis domain frekuensi dilakukan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mengubah sinyal dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Tujuan analisis ini adalah untuk mengetahui distribusi energi sinyal terhadap frekuensi sehingga karakteristik sinyal kondisi normal (baseline) dan kondisi *corona discharge* dapat dibandingkan secara kuantitatif.

4.5.1 Analisis FFT Kondisi Baseline

Berdasarkan Gambar 4.8, spektrum frekuensi sinyal baseline memperlihatkan bahwa energi terbesar berada pada frekuensi 180,09 Hz dengan magnitudo sebesar 61,19 dB. Jika diperhatikan lebih rinci, kurva FFT memiliki puncak yang relatif tinggi pada daerah frekuensi rendah, kemudian mengalami penurunan secara bertahap hingga sekitar 1 kHz. Setelah itu kurva cenderung mendatar dengan fluktuasi amplitudo yang kecil sampai batas frekuensi analisis sebesar 10 kHz.



Gambar 4. 8 Domain Frekuensi Pada Kondisi Baseline

Fenomena tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar energi sinyal baseline berada pada frekuensi rendah, sedangkan pada frekuensi menengah hingga tinggi hanya terdapat noise dengan amplitudo yang relatif kecil. Pola ini merupakan karakteristik umum dari sistem akuisisi elektronik ketika belum terdapat sumber emisi akustik akibat *corona discharge*.

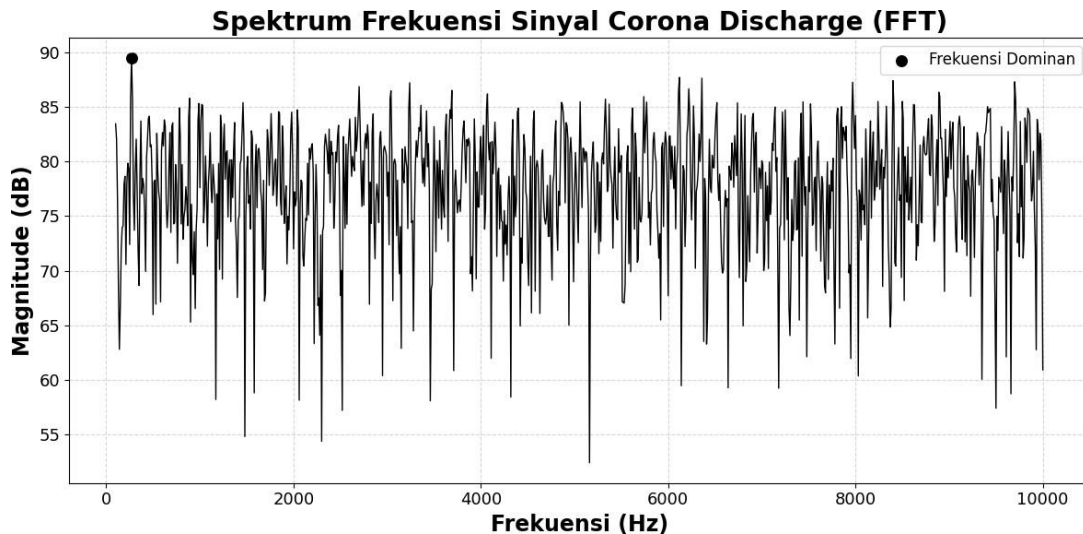
Karena tidak terdapat aktivitas pelepasan muatan listrik, maka energi spektrum masih relatif rendah. Hal ini dibuktikan oleh magnitudo maksimum yang hanya mencapai 61,19 dB. Selain itu, distribusi spektrum pada kondisi baseline terlihat cukup

homogen tanpa adanya beberapa puncak frekuensi yang menonjol. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sinyal yang diterima sensor lebih didominasi oleh background noise dibandingkan sinyal yang memiliki pola tertentu.

Dengan demikian, grafik FFT pada kondisi baseline menggambarkan bahwa sistem akuisisi bekerja dalam kondisi normal dan belum menerima energi akustik yang signifikan dari fenomena *corona discharge*.

4.5.2 Analisis FFT Kondisi Corona

Gambar 4.9 memperlihatkan hasil FFT pada kondisi *corona discharge*. Berbeda dengan kondisi baseline, grafik menunjukkan adanya peningkatan energi spektrum yang cukup signifikan. Frekuensi dominan yang diperoleh sebesar 270,00 Hz dengan magnitudo maksimum mencapai 89,49 dB.



Gambar 4.9 Domain Frekuensi Pada Kondisi Corona

Jika dibandingkan dengan kondisi baseline, terjadi kenaikan frekuensi dominan sebesar:

$$270,00 - 180,09 = 89,91 \text{ Hz}$$

Sedangkan peningkatan magnitudo spektrum mencapai:

$$89,49 - 61,19 = 28,30 \text{ dB}$$

Kenaikan magnitudo sebesar 28,30 dB merupakan perubahan yang cukup besar dan menunjukkan bahwa selama terjadi *corona discharge* sensor menerima energi akustik yang jauh lebih tinggi dibandingkan kondisi normal. Dari bentuk grafik juga terlihat bahwa hampir seluruh spektrum frekuensi mengalami kenaikan level magnitudo. Tidak hanya puncak dominan yang meningkat, tetapi amplitudo rata-rata pada rentang frekuensi 100 Hz hingga 10 kHz juga lebih tinggi dibandingkan kondisi baseline.

Fenomena ini menunjukkan bahwa aktivitas *corona* tidak hanya menghasilkan satu komponen frekuensi tertentu, tetapi menghasilkan spektrum frekuensi yang lebih luas (*broadband spectrum*). Hal tersebut sesuai dengan karakteristik *corona discharge*, dimana proses ionisasi udara menghasilkan impuls-impuls acak yang menyebabkan energi sinyal tersebar pada berbagai

frekuensi. Selain itu, fluktuasi amplitudo pada grafik *corona* terlihat lebih rapat dan lebih besar dibandingkan grafik baseline. Hal ini menunjukkan bahwa sinyal *corona* memiliki kandungan harmonisa dan komponen frekuensi yang lebih kompleks.

Dengan kata lain, keberadaan *corona discharge* menyebabkan peningkatan intensitas energi pada hampir seluruh rentang frekuensi pengamatan..

4.5.3 Perbandingan Spektrum Frekuensi Baseline dan *Corona*

Berdasarkan hasil analisis FFT yang disajikan pada Tabel 4.2, terlihat adanya perbedaan karakteristik spektrum frekuensi antara sinyal baseline dan sinyal *corona discharge*. Pada kondisi baseline diperoleh frekuensi dominan sebesar 180,09 Hz dengan magnitudo spektrum sebesar 61,19 dB, sedangkan pada kondisi *corona discharge* frekuensi dominan bergeser menjadi 270,00 Hz dengan magnitudo meningkat menjadi 89,49 dB. Hasil tersebut menunjukkan bahwa munculnya *corona discharge* menyebabkan perubahan karakteristik spektrum frekuensi yang dapat dideteksi menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT).

Table 4. 2 Perbandingan Spektrum Frekuensi Baseline dan *Corona*

No	Parameter	Baseline	<i>Corona</i>
1	Peak Frequency (Hz)	180,09	270,00
2	Peak Magnitude (dB)	61,19	89,49

Jika diamati dari bentuk grafik FFT sinyal baseline, terlihat bahwa puncak spektrum berada pada daerah frekuensi rendah dan kemudian mengalami penurunan secara bertahap seiring bertambahnya frekuensi hingga mencapai 10 kHz. Setelah melewati beberapa ratus Hertz, kurva spektrum cenderung stabil dengan fluktuasi amplitudo yang relatif kecil. Karakteristik ini menunjukkan bahwa sebagian besar energi sinyal pada kondisi baseline terkonsentrasi pada frekuensi rendah, sedangkan pada frekuensi menengah hingga tinggi hanya terdapat komponen noise dengan amplitudo yang relatif kecil. Kondisi tersebut merupakan karakteristik umum dari sistem akuisisi ketika belum terdapat aktivitas pelepasan muatan listrik.

Frekuensi dominan sebesar 180,09 Hz pada kondisi baseline menunjukkan bahwa sensor masih menangkap komponen frekuensi dari lingkungan sekitar maupun noise internal sistem. Komponen tersebut dapat berasal dari gangguan elektronik pada rangkaian ESP32, ADC, sensor ultrasonik, maupun interferensi elektromagnetik dari peralatan listrik di sekitar lokasi pengujian. Oleh karena itu, meskipun tidak terjadi *corona discharge*, sinyal tetap memiliki komponen frekuensi tertentu sebagai noise dasar (*background noise*). Nilai magnitudo sebesar 61,19 dB mengindikasikan bahwa energi sinyal pada kondisi normal masih relatif rendah sehingga belum menunjukkan adanya aktivitas pelepasan muatan listrik.

Berbeda dengan kondisi baseline, grafik FFT pada kondisi *corona discharge* menunjukkan peningkatan magnitudo spektrum yang cukup signifikan. Frekuensi dominan bergeser menjadi 270,00 Hz, sedangkan magnitudo meningkat hingga 89,49 dB. Pergeseran frekuensi dominan sebesar sekitar 89,91 Hz menunjukkan bahwa proses *corona discharge* menghasilkan komponen frekuensi baru yang sebelumnya tidak dominan pada kondisi normal. Selain itu, kenaikan magnitudo sebesar sekitar 28,30 dB menunjukkan bahwa energi sinyal meningkat secara signifikan akibat adanya proses ionisasi udara di sekitar konduktor.

Apabila kedua grafik dibandingkan secara langsung, terlihat bahwa spektrum sinyal *corona* memiliki amplitudo yang lebih tinggi hampir pada seluruh rentang frekuensi dibandingkan sinyal baseline. Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas *corona* tidak hanya meningkatkan energi pada satu frekuensi tertentu, tetapi juga menghasilkan distribusi energi yang lebih luas pada domain frekuensi. Fenomena tersebut sesuai dengan karakteristik *corona discharge* yang menghasilkan impuls-impuls listrik secara acak (*random impulsive discharge*), sehingga spektrum frekuensinya bersifat lebih lebar (*broadband spectrum*). Akibatnya, kurva FFT pada kondisi *corona* tampak lebih padat dan memiliki fluktuasi amplitudo yang lebih besar dibandingkan kondisi baseline.

Rentang frekuensi analisis pada kedua grafik berada pada 0–10.000 Hz. Rentang ini diperoleh karena sistem akuisisi menggunakan frekuensi sampling sebesar 20 kHz. Berdasarkan Teorema Nyquist, frekuensi maksimum yang dapat dianalisis adalah setengah dari frekuensi sampling, sehingga batas frekuensi analisis menjadi 10 kHz. Oleh karena itu, seluruh komponen spektrum yang ditampilkan pada grafik masih berada dalam rentang frekuensi yang valid dan dapat digunakan untuk proses identifikasi karakteristik sinyal.

Secara keseluruhan, hasil analisis FFT menunjukkan bahwa keberadaan *corona discharge* menyebabkan perubahan karakteristik spektrum frekuensi yang cukup jelas. Perubahan tersebut ditandai dengan bergesernya frekuensi dominan dari 180,09 Hz menjadi 270,00 Hz, serta meningkatnya magnitudo spektrum dari 61,19 dB menjadi 89,49 dB. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa energi sinyal pada kondisi *corona discharge* lebih besar dibandingkan kondisi baseline. Dengan demikian, metode *Fast Fourier Transform* (FFT) mampu membedakan kondisi normal dan kondisi terjadinya *corona discharge* berdasarkan perubahan distribusi spektrum, frekuensi dominan, serta besarnya magnitudo sinyal, sehingga metode ini layak digunakan sebagai tahap awal analisis karakteristik sinyal sebelum dilakukan pemodelan menggunakan metode *Linear Predictive Coding* (LPC).

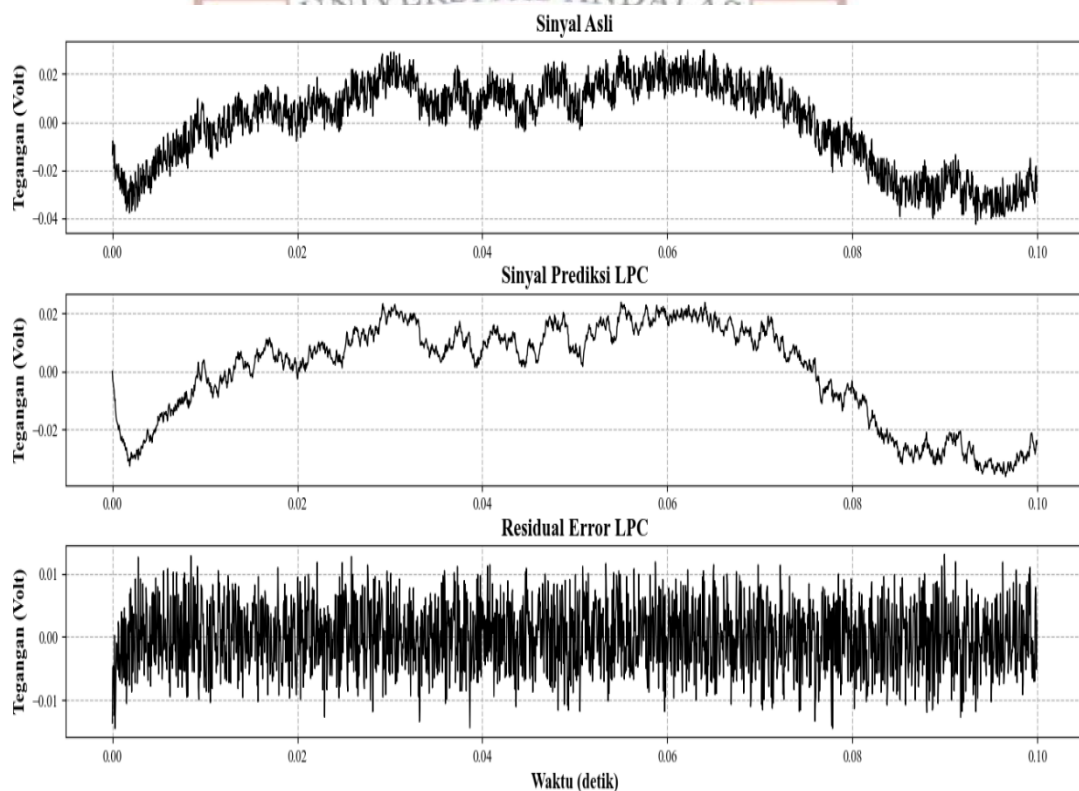
4.6 Analisis Linear Predictive Coding (LPC)

Metode *Linear Predictive Coding* (LPC) digunakan untuk memodelkan karakteristik sinyal berdasarkan hubungan antar sampel sebelumnya. Pada penelitian ini, LPC diterapkan pada sinyal hasil preprocessing sehingga diperoleh

tiga keluaran utama, yaitu sinyal asli, sinyal hasil prediksi, dan residual error. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan LPC dalam merepresentasikan karakteristik sinyal pada kondisi baseline maupun saat terjadi *corona discharge*.

4.6.1 Analisis LPC Kondisi Baseline

Gambar 4.10 menunjukkan hasil analisis *Linear Predictive Coding* (LPC) dilakukan untuk mengetahui kemampuan model prediksi linier dalam merepresentasikan karakteristik sinyal baseline yang diperoleh dari proses akuisisi data. Pada penelitian ini digunakan orde LPC sebesar 12, sehingga model prediksi dibentuk menggunakan dua belas koefisien prediksi. Hasil analisis menghasilkan nilai *Prediction Error* sebesar 0,0616 dan *Mean Square Error* (MSE) sebesar $3,01 \times 10^{-5}$.



Gambar 4. 10 LPC Kondisi Baseline

4.6.1.1 Analisis Sinyal Asli

Grafik pertama menunjukkan sinyal baseline hasil akuisisi setelah dilakukan proses preprocessing berupa mean removal. Terlihat bahwa bentuk sinyal relatif halus dengan perubahan amplitudo yang berlangsung secara bertahap. Tidak ditemukan lonjakan amplitudo yang besar maupun impuls tajam sebagaimana karakteristik sinyal *corona discharge*.

Amplitudo sinyal berada pada kisaran sekitar $-0,04$ V hingga $0,03$ V, sehingga menunjukkan bahwa kondisi baseline memiliki tingkat kestabilan yang cukup baik. Fluktuasi yang muncul lebih banyak dipengaruhi oleh noise lingkungan

dan noise elektronik dari sistem akuisisi dibandingkan aktivitas pelepasan muatan listrik. Kondisi ini menunjukkan bahwa sensor belum mendeteksi adanya fenomena *corona discharge* sehingga sinyal yang diperoleh masih didominasi oleh komponen dasar.

4.6.1.2 Analisis Sinyal Prediksi LPC

Grafik kedua memperlihatkan hasil prediksi sinyal menggunakan metode LPC orde 12. Secara visual terlihat bahwa bentuk sinyal prediksi memiliki pola yang hampir sama dengan sinyal asli. Kurva prediksi mampu mengikuti perubahan amplitudo utama, baik ketika amplitudo meningkat maupun ketika amplitudo menurun.

Kemiripan antara sinyal asli dan sinyal hasil prediksi menunjukkan bahwa metode LPC mampu memodelkan karakteristik statistik sinyal baseline dengan baik. Hal ini disebabkan sinyal baseline memiliki pola yang relatif stabil sehingga hubungan antar sampel masih dapat diprediksi menggunakan model autoregressive.

Walaupun demikian, terdapat sedikit perbedaan amplitudo pada beberapa bagian sinyal. Perbedaan tersebut merupakan konsekuensi dari proses pemodelan LPC yang hanya memanfaatkan informasi dari sejumlah sampel sebelumnya sehingga komponen noise acak tidak seluruhnya dapat direkonstruksi.

4.6.1.3 Analisis Residual Error

Grafik ketiga menunjukkan residual error, yaitu selisih antara sinyal asli dan sinyal hasil prediksi LPC. Residual error terlihat memiliki amplitudo yang relatif kecil dan berosilasi di sekitar nilai nol. Sebagian besar residual berada pada rentang sekitar $\pm 0,01$ V, tanpa adanya lonjakan amplitudo yang signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar informasi pada sinyal asli telah berhasil dimodelkan oleh LPC.

Residual error yang kecil mengindikasikan bahwa model prediksi memiliki tingkat akurasi yang baik. Selain itu, pola residual yang menyerupai noise acak menunjukkan bahwa komponen utama sinyal telah berhasil direpresentasikan oleh model LPC, sedangkan informasi yang tersisa hanya berupa komponen noise yang tidak dapat diprediksi..

Hasil perhitungan menghasilkan nilai *Prediction Error* sebesar 0,0616. Nilai *Prediction Error* menggambarkan besarnya kesalahan total antara sinyal asli dengan sinyal hasil prediksi. Nilai yang relatif kecil menunjukkan bahwa metode LPC mampu menghasilkan model yang cukup akurat untuk merepresentasikan karakteristik sinyal baseline. Pada kondisi baseline, sinyal cenderung stabil dan tidak mengandung impuls berenergi tinggi sehingga proses prediksi menjadi lebih mudah dilakukan. Oleh karena itu nilai *Prediction Error* yang diperoleh masih berada pada tingkat yang rendah.

Nilai *Mean Square Error* (MSE) sebesar $3,01 \times 10^{-5}$ menunjukkan bahwa rata-rata kuadrat kesalahan antara sinyal asli dan sinyal hasil prediksi sangat kecil. Nilai MSE yang mendekati nol merupakan indikator bahwa hasil prediksi

LPC memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap sinyal asli. Dengan kata lain, model LPC mampu merepresentasikan karakteristik sinyal baseline secara efektif.

Semakin kecil nilai MSE maka semakin baik kualitas model prediksi yang dihasilkan. Pada penelitian ini nilai MSE yang sangat kecil memperlihatkan bahwa sinyal baseline memiliki karakteristik yang mudah dimodelkan karena didominasi oleh perubahan amplitudo yang berlangsung secara perlahan dan tidak mengandung banyak komponen impulsif.

Koefisien LPC yang diperoleh terdiri dari dua belas parameter prediksi, yaitu:

Table 4. 3 Analisis Koefisien LPC Baseline

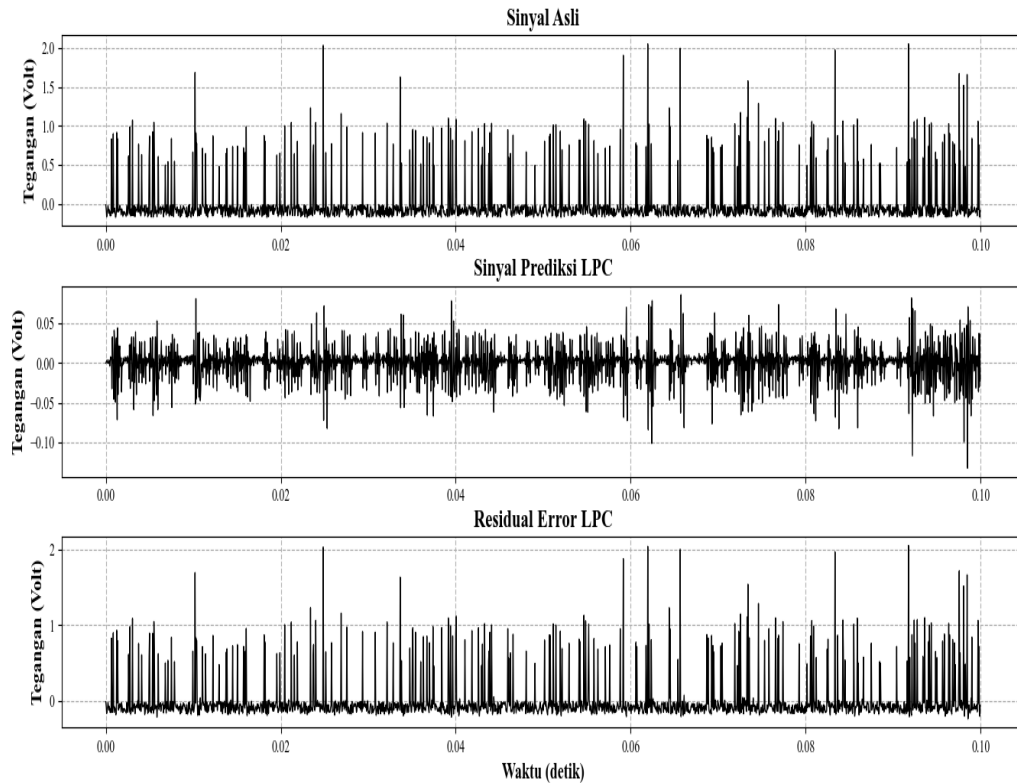
Koefisien	Nilai
a0	1,000000
a1	-0,228581
a2	-0,173321
a3	-0,154422
a4	-0,096765
a5	-0,090669
a6	-0,045850
a7	-0,077151
a8	0,007401
a9	-0,025670
a10	-0,061993
a11	-0,020225
a12	-0,019620

Koefisien LPC menunjukkan hubungan antara sampel saat ini dengan dua belas sampel sebelumnya. Sebagian besar koefisien bernilai negatif dengan magnitudo yang relatif kecil, yang menunjukkan bahwa karakteristik sinyal baseline memiliki perubahan amplitudo yang berlangsung secara bertahap tanpa adanya perubahan mendadak.

Selain itu, tidak terdapat koefisien yang memiliki nilai sangat besar, sehingga dapat disimpulkan bahwa sinyal baseline memiliki struktur spektral yang sederhana dan mudah dimodelkan menggunakan LPC orde 12

4.6.2 Analisis LPC Kondisi *Corona*

Gambar 4.11 menunjukkan hasil analisis *Linear Predictive Coding* (LPC) terhadap sinyal *corona discharge* dengan orde LPC sebesar 12. Hasil analisis terdiri dari tiga bagian, yaitu sinyal asli, sinyal hasil prediksi LPC, dan residual error. Selain itu diperoleh nilai *Prediction Error* sebesar 183,03, *mean square error* (MSE) sebesar 0,0915, serta koefisien LPC sebanyak 12 buah.



Gambar 4. 11 LPC Kondisi Corona

4.6.2.1 Analisis Sinyal Asli

Hasil pemodelan menggunakan metode *Linear Predictive Coding* (LPC) terhadap sinyal emisi akustik *corona discharge* ditunjukkan pada Gambar 4.11 yang terdiri atas tiga bagian, yaitu sinyal asli (*original signal*), sinyal hasil prediksi LPC (*predicted signal*), dan residual error. Pada sinyal asli terlihat karakteristik utama berupa impuls-impuls tajam dengan amplitudo yang bervariasi antara kondisi normal dan puncak pelepasan (*discharge*). Impuls tersebut muncul secara acak (*random*) sepanjang interval pengamatan 0,1 detik, yang menunjukkan bahwa fenomena *corona discharge* merupakan sinyal transien dengan perubahan amplitudo yang sangat cepat.

4.6.2.2 Analisis Sinyal Prediksi LPC

Pada grafik sinyal prediksi LPC terlihat bahwa bentuk sinyal hasil prediksi berbeda dibandingkan sinyal asli. Model LPC hanya mampu mengikuti komponen sinyal yang memiliki korelasi antar sampel dan perubahan amplitudo yang relatif lambat, sedangkan impuls-impuls beramplitudo tinggi tidak dapat direpresentasikan secara penuh. Hal ini terjadi karena metode LPC merupakan model autoregressive (AR) yang memprediksi nilai sampel saat ini berdasarkan kombinasi linear sejumlah sampel sebelumnya. Ketika sinyal mengandung impuls yang muncul secara tiba-tiba, model linear tidak mampu memperkirakan perubahan tersebut secara akurat sehingga amplitudo hasil prediksi menjadi jauh lebih kecil dibandingkan amplitudo sinyal asli.

4.6.2.3 Analisis Residual Error

Pada grafik residual error terlihat bahwa bentuk residual masih memiliki pola yang sangat mirip dengan sinyal asli, khususnya pada bagian-bagian yang mengandung impuls *corona discharge*. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar energi impuls tidak berhasil diprediksi oleh model LPC sehingga tetap muncul pada sinyal residual. Dengan kata lain, residual error masih membawa informasi utama mengenai karakteristik *corona discharge*. Fenomena tersebut bukan merupakan kesalahan implementasi algoritma, melainkan merupakan konsekuensi dari karakteristik sinyal *corona discharge* yang bersifat impulsif, acak (*random*), dan non-stasioner sehingga kurang sesuai untuk dimodelkan secara sempurna menggunakan prediksi linear.

Analisis Prediction Error

Hasil perhitungan menunjukkan nilai:

- $Prediction Error = 183,0303$
- $Mean Square Error (MSE) = 0,0915$

Nilai *Prediction Error* yang relatif besar menunjukkan bahwa model LPC orde 12 belum mampu merepresentasikan seluruh karakteristik sinyal *corona discharge*. Besarnya error terutama disebabkan oleh adanya impuls-impuls tajam yang muncul secara tiba-tiba sehingga tidak dapat diprediksi menggunakan kombinasi linier sampel-sampel sebelumnya.

Nilai MSE sebesar 0,0915 juga memperlihatkan bahwa selisih rata-rata kuadrat antara sinyal asli dan sinyal hasil prediksi masih cukup tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa kompleksitas sinyal *corona* jauh lebih besar dibandingkan sinyal baseline.

Jika dibandingkan dengan hasil LPC pada data baseline yang memiliki:

- $Prediction Error = 0,0616$
- $MSE = 3,01 \times 10^{-5}$

Maka terlihat bahwa *Prediction Error* sinyal *corona* meningkat sangat signifikan. Peningkatan ini menunjukkan bahwa keberadaan *corona* menghasilkan pola sinyal yang jauh lebih sulit diprediksi oleh model LPC. Dengan demikian, nilai *Prediction Error* dapat dijadikan salah satu parameter untuk membedakan kondisi baseline dan kondisi *corona discharge*.

Metode *Linear Predictive Coding* pada Tabel 4.4 penelitian ini digunakan sebagai metode ekstraksi ciri (*feature extraction*) untuk memperoleh parameter numerik yang merepresentasikan karakteristik sinyal emisi akustik *corona discharge*. Berbeda dengan penerapan LPC pada pengolahan suara yang berorientasi pada rekonstruksi sinyal, penelitian ini memanfaatkan koefisien LPC sebagai representasi matematis dari pola sinyal hasil pengukuran sensor ultrasonik MA40S4R.

Table 4. 4 Analisis Koefisien LPC *Corona discharge*

Koefisien	Nilai
a0	1,000000
a1	0,035198
a2	-0,030995
a3	0,005844
a4	-0,003616
a5	0,017685
a6	-0,006552
a7	-0,030567
a8	0,005986
a9	0,039370
a10	-0,005472
a11	0,005867
a12	0,009060

Koefisien a_0 bernilai 1 merupakan koefisien normalisasi yang secara konvensional selalu digunakan dalam model LPC. Sementara itu, koefisien a_1 hingga a_{12} diperoleh secara otomatis melalui algoritma Levinson-Durbin berdasarkan fungsi autokorelasi sinyal. Nilai koefisien tersebut menunjukkan kontribusi sampel-sampel sebelumnya terhadap proses prediksi sinyal saat ini.

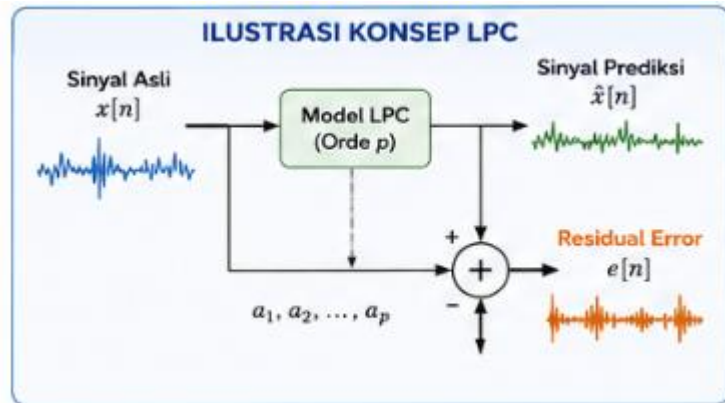
Terlihat bahwa seluruh koefisien LPC memiliki nilai yang relatif kecil dan berada pada rentang sekitar $-0,031$ hingga $0,039$. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik sinyal *corona discharge* tidak didominasi oleh satu komponen tertentu, melainkan dipengaruhi oleh kombinasi beberapa sampel sebelumnya. Variasi nilai positif dan negatif pada koefisien juga mengindikasikan adanya hubungan korelasi yang kompleks akibat sifat impulsif sinyal *corona discharge*.

Pada Gambar 4.11 terlihat bahwa sinyal prediksi LPC tidak menyerupai bentuk sinyal asli secara visual, sedangkan residual error masih memiliki pola yang mirip dengan sinyal asli. Kondisi ini tidak menunjukkan kegagalan metode LPC, melainkan merupakan karakteristik umum ketika LPC diterapkan pada sinyal non-audio yang bersifat impulsif seperti *corona discharge*. Energi utama sinyal berasal dari lonjakan-lonjakan (*spike*) yang muncul secara acak sehingga model linier orde 12 belum mampu memprediksi seluruh perubahan amplitudo tersebut secara sempurna.

Dalam penelitian ini, tujuan utama penerapan LPC bukan untuk merekonstruksi sinyal, melainkan menghasilkan parameter numerik berupa koefisien LPC yang mampu merepresentasikan karakteristik sinyal *corona discharge*. Oleh karena itu, keberhasilan metode LPC dievaluasi dari kemampuannya mengekstraksi informasi karakteristik sinyal menjadi sekumpulan koefisien yang dapat digunakan sebagai fitur analisis maupun dasar pengembangan

sistem klasifikasi pada penelitian selanjutnya.

Gambar 4.12 menunjukkan konsep dasar proses *Linear Predictive Coding* (LPC) yang diterapkan pada penelitian ini untuk menganalisis sinyal emisi akustik *corona discharge*. Proses dimulai dari sinyal asli $x[n]$, yaitu sinyal hasil pengukuran yang diperoleh dari sistem akuisisi data. Sinyal tersebut kemudian menjadi masukan bagi model LPC dengan orde prediksi p . Model LPC bekerja dengan memanfaatkan beberapa sampel sebelumnya untuk memprediksi nilai sampel berikutnya sehingga diperoleh sinyal prediksi $\hat{x}[n]$.



Gambar 4. 12 Konsep LPC

Selama proses pemodelan, LPC menghasilkan sekumpulan koefisien prediksi ($a_1, a_2, \dots, a_p$) yang menggambarkan hubungan antar-sampel pada sinyal. Koefisien-koefisien tersebut merupakan keluaran utama metode LPC dan digunakan sebagai parameter ekstraksi ciri yang merepresentasikan karakteristik spektral sinyal *corona discharge*. Oleh karena itu, pada penelitian ini koefisien LPC digunakan sebagai dasar analisis karakteristik sinyal, bukan bentuk sinyal hasil prediksi.

Setelah sinyal prediksi diperoleh, dilakukan proses pengurangan antara sinyal asli dengan sinyal prediksi sehingga dihasilkan residual error $e[n]$. Residual error merupakan bagian sinyal yang tidak dapat diprediksi oleh model linear LPC. Pada sinyal *corona discharge*, residual error umumnya masih mengandung impuls-impuls pelepasan muatan (*discharge pulse*) karena fenomena *corona* bersifat acak dan tidak sepenuhnya memenuhi asumsi linear maupun stasioner yang digunakan oleh LPC.

Berdasarkan hasil penelitian, bentuk sinyal prediksi tidak menunjukkan kemiripan yang tinggi dengan sinyal hasil pengukuran. Kondisi ini merupakan karakteristik yang normal karena tujuan utama LPC bukan untuk merekonstruksi bentuk gelombang secara identik, melainkan memodelkan struktur spektral sinyal. Sebaliknya, residual error masih memperlihatkan pola yang menyerupai sinyal asli karena komponen impuls *corona* yang tidak dapat diprediksi tetap berada pada sinyal residual.

Dengan demikian, ilustrasi pada gambar menunjukkan bahwa informasi

penting dari metode LPC terletak pada koefisien prediksi yang dihasilkan oleh model. Koefisien tersebut mampu merepresentasikan karakteristik sinyal *corona discharge* secara lebih ringkas sehingga dapat dimanfaatkan sebagai parameter analisis maupun identifikasi kondisi *corona discharge*. Oleh sebab itu, keberhasilan penerapan LPC pada penelitian ini tidak diukur dari tingkat kemiripan antara sinyal asli dan sinyal prediksi, melainkan dari kemampuan koefisien LPC dalam merepresentasikan karakteristik sinyal yang dianalisis.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian [6] yang menggunakan LPC sebagai metode ekstraksi ciri untuk identifikasi *corona discharge*, dimana koefisien LPC dimanfaatkan sebagai parameter analisis, bukan sebagai indikator kemiripan bentuk sinyal. Selain itu, penelitian [8] juga menjelaskan bahwa pada sinyal partial discharge, informasi penting lebih banyak direpresentasikan oleh parameter model dan ciri statistik dibandingkan bentuk rekonstruksi sinyal. Dengan demikian, koefisien LPC yang diperoleh pada penelitian ini telah mampu merepresentasikan karakteristik sinyal *corona discharge* meskipun bentuk sinyal prediksi tidak identik dengan sinyal hasil pengukuran.

4.7 Pemodelan Matematis *Corona discharge* pada Isolator Polimer

Pemodelan matematis pada penelitian ini dilakukan untuk menjelaskan hubungan antara tegangan uji yang diberikan pada isolator polimer dengan medan listrik yang terbentuk serta pengaruhnya terhadap karakteristik sinyal emisi akustik akibat fenomena *corona discharge*. Pendekatan matematis ini digunakan sebagai dasar teoritis untuk mendukung hasil analisis sinyal yang telah diperoleh melalui domain waktu, *Fast Fourier Transform* (FFT), dan *Linear Predictive Coding* (LPC).

Pengujian dilakukan menggunakan isolator polimer dengan tinggi 23,1 cm sebagai jarak antara terminal tegangan tinggi dan terminal ground. Tegangan uji divariasikan sebesar 5 kV sebagai kondisi baseline dan 30 kV sebagai kondisi *corona*. Sensor ultrasonik MA40S4R ditempatkan pada jarak sekitar 5 cm dari elektroda tegangan tinggi dengan posisi yang tetap selama seluruh proses pengambilan data sehingga hasil pengukuran dapat dibandingkan secara konsisten. Secara teoritis, besar medan listrik rata-rata pada sistem pengujian dapat dihitung menggunakan Persamaan .

$$E = \frac{V}{d} \quad [4.1]$$

dengan:

- E = Medan listrik rata-rata (kV/cm)
- V = Tegangan uji (kV)
- d = Jarak antara elektroda tegangan tinggi dan ground (cm)

Perhitungan Kondisi Baseline (5 kV)

Diketahui

$$V = 5 \text{ kV}$$

$$d = 23,1 \text{ cm}$$

maka,

$$E = \frac{5}{23,1}$$

$$E = 0,216 \text{ kV/cm}$$

Perhitungan Kondisi *Corona* (30 kV)
Diketahui

$$V = 30 \text{ kV}$$

$$d = 23,1 \text{ cm}$$

maka,

$$E = \frac{30}{23,1}$$

$$E = 1,299 \text{ kV/cm}$$

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan tegangan uji dari 5 kV menjadi 30 kV menyebabkan medan listrik rata-rata meningkat dari 0,216 kV/cm menjadi 1,299 kV/cm atau sekitar enam kali lebih besar dibandingkan kondisi baseline.

4.7.1 Pemodelan Empiris Hubungan Medan Listrik terhadap Nilai RMS

Selain menggunakan persamaan teoritis medan listrik, pada penelitian ini juga dilakukan pemodelan empiris berdasarkan hasil pengukuran yang diperoleh selama pengujian. Pemodelan empiris bertujuan untuk mengetahui hubungan antara besar medan listrik rata-rata yang terbentuk pada isolator polimer dengan karakteristik sinyal emisi akustik yang diterima oleh sensor ultrasonik MA40S4R. Data hasil pengujian yang digunakan dalam pemodelan ditunjukkan pada Tabel 4.5

Table 4. 5 Hubungan Medan Listrik terhadap Nilai RMS

Kondisi Pengujian	Tegangan(kV)	Medan Listrik (kV/cm)	Nilai RMS (ADC)
Baseline	5	0,216	0,236
<i>Corona</i>	30	1,299	0,451

Berdasarkan data pada Tabel 4.5 diperoleh hubungan linier antara medan listrik rata-rata dan nilai RMS sinyal. Persamaan garis diperoleh menggunakan metode regresi linier sederhana sehingga menghasilkan model matematis sebagai berikut.

$$RMS = 0,199E + 0,193 \quad [4.2]$$

dengan:

- RMS = Nilai Root Mean Square sinyal (Volt)
- E = Medan listrik rata-rata (V/cm)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai RMS meningkat seiring bertambahnya medan listrik yang diberikan pada objek pengujian. Nilai koefisien kemiringan (*slope*) sebesar 0,199 menunjukkan bahwa setiap kenaikan medan listrik sebesar 1 V/cm akan meningkatkan nilai RMS sekitar 0,199 V. Sementara itu, konstanta sebesar 0,193 V menggambarkan nilai RMS dasar ketika medan listrik mendekati nol, yang dipengaruhi oleh karakteristik sensor, sistem akuisisi data, dan *noise* lingkungan. Hasil ini menunjukkan adanya hubungan linier positif antara medan listrik dan energi sinyal emisi akustik yang diterima sensor.

Perhitungan Verifikasi Model

Kondisi Baseline

Diketahui:

$$E = 0,216 \text{ V/cm}$$

Substitusi ke Persamaan (4.2):

$$\text{RMS} = 0,199(0,216) + 0,193$$

$$\text{RMS} = 0,043 + 0,193$$

$$\text{RMS} = 0,236 \text{ V}$$

Nilai hasil perhitungan sesuai dengan nilai RMS hasil pengukuran.

Kondisi *Corona*

Diketahui:

$$E = 1,299 \text{ V/cm}$$

Substitusi:

$$\text{RMS} = 0,199(1,299) + 0,193$$

$$\text{RMS} = 0,258 + 0,193$$

$$\text{RMS} = 0,451 \text{ V}$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai RMS sebesar 0,451 V, yang sama dengan hasil pengukuran. Hal ini menunjukkan bahwa model regresi linier mampu merepresentasikan hubungan antara medan listrik dan nilai RMS sinyal emisi akustik pada penelitian ini dengan sangat baik.

4.8 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu

Berdasarkan Tabel 4.6 dapat diketahui bahwa hasil penelitian yang dilakukan memiliki kesesuaian dengan penelitian-penelitian terdahulu. Sensor ultrasonik MA40S4R mampu mendeteksi sinyal emisi akustik akibat *corona discharge* sebagaimana dilaporkan [3]. Analisis menggunakan metode FFT juga

menunjukkan adanya peningkatan energi spektrum pada kondisi *corona* dibandingkan baseline, sejalan dengan penelitian [29].

Selain itu, penerapan metode *Linear Predictive Coding* (LPC) menghasilkan model prediksi sinyal yang mampu mengikuti pola sinyal hasil pengukuran. Pengujian beberapa orde LPC menunjukkan bahwa orde 72 memberikan nilai RMSE terkecil sehingga dipilih sebagai model terbaik dalam penelitian ini. Hasil tersebut memperkuat penelitian [22] yang menyatakan bahwa LPC dapat digunakan untuk memodelkan karakteristik sinyal *corona discharge*.

Perbedaan utama penelitian ini dibandingkan penelitian terdahulu terletak pada penggunaan kombinasi analisis statistik, FFT, dan LPC pada data hasil akuisisi menggunakan ESP32 dan sensor ultrasonik MA40S4R. Pendekatan tersebut tidak hanya mampu mendeteksi keberadaan *corona discharge*, tetapi juga memberikan informasi mengenai karakteristik statistik, distribusi frekuensi, dan kemampuan pemodelan sinyal secara lebih komprehensif.

Table 4. 6 Penelitian Terdahulu

Penelitian	Metode	Hasil Penelitian	Hasil Penelitian Ini
Akash. (2018)	Metode Akustik	Sensor akustik mampu mendeteksi aktivitas partial discharge secara non-invasif dengan tingkat keandalan yang baik.	Sensor ultrasonik MA40S4R berhasil mendeteksi sinyal <i>corona discharge</i> . Kondisi <i>corona</i> menghasilkan amplitudo sinyal yang lebih tinggi dibandingkan kondisi baseline sehingga aktivitas <i>corona</i> dapat dibedakan dengan jelas.
Markalous (2008)	Akustik dan Elektrik	Kombinasi metode akustik dan elektrik meningkatkan akurasi deteksi serta lokasi partial discharge.	Penelitian ini hanya menggunakan metode akustik, namun analisis statistik, FFT, dan LPC sudah mampu membedakan karakteristik sinyal baseline dan <i>corona discharge</i> tanpa elektrik.
Fikri (2020)	<i>Linear Predictive Coding</i> (LPC)	LPC mampu memodelkan karakteristik sinyal <i>corona discharge</i> berdasarkan koefisien prediksi sehingga dapat digunakan sebagai identifikasi kondisi sinyal.	LPC berhasil memprediksi bentuk sinyal hasil pengukuran. Berdasarkan pengujian beberapa orde diperoleh orde terbaik 72 dengan nilai RMSE paling kecil sehingga menghasilkan prediksi yang paling mendekati sinyal asli.
Shafiq (2015)	Fast Fourier Transform (FFT)	FFT mampu mengidentifikasi pola frekuensi sinyal partial discharge untuk pemantauan kondisi	Hasil FFT menunjukkan magnitudo spektrum sinyal <i>corona</i> lebih besar dibandingkan baseline. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan energi akibat aktivitas

peralatan tinggi.	tegangan	<i>corona discharge</i> sehingga FFT efektif digunakan sebagai metode identifikasi.
----------------------	----------	---

