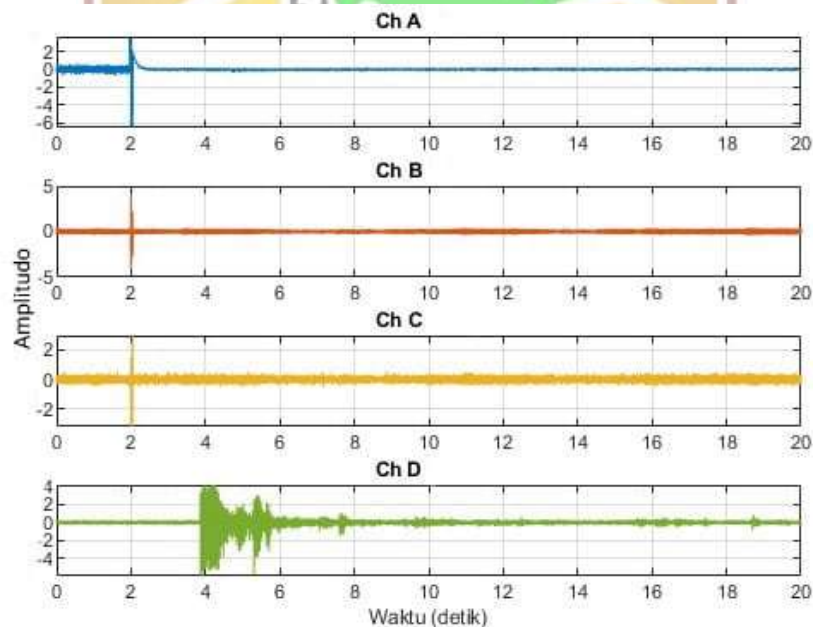


BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab ini membahas hasil pengolahan data penelitian mengenai karakteristik *acoustic shock wave* petir dan korelasinya terhadap radiasi medan listrik pada fase *return stroke* petir. Analisis dilakukan dengan mengintegrasikan data dari sensor antenna *slow* (medan listrik) dan mikrofon khusus (akustik) yang diolah menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk menentukan nilai frekuensi dominan pada sinyal akustik petir dan kombinasi *Spectrogram* dengan *Short-Time Fourier Transform* (STFT) untuk mendapatkan karakteristik spektral akustik dalam domain waktu-frekuensi, serta menggunakan metode *Cross-Correlation* untuk melihat korelasi sinyal akustik petir dengan sinyal medan listrik.

4.1 Identifikasi Data dan Analisis Karakteristik Bentuk Gelombang Sinyal Petir dalam Domain Waktu

Berdasarkan hasil data kejadian petir yang diperoleh menggunakan PicoScope, diperoleh rekaman bentuk gelombang sinyal petir utuh sepanjang 20 detik yang terlihat pada Gambar 4. 1.



Gambar 4. 1 Gelombang Sinyal Petir Hasil Rekaman pada Tanggal 10 Maret 2026

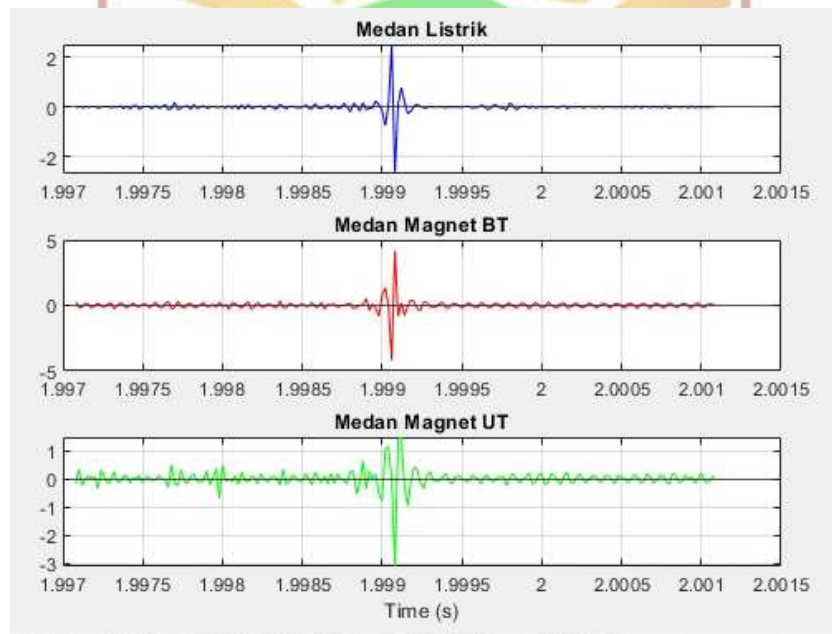
Dengan menggunakan MATLAB dan menerapkan *High Pass Filter* (HPF) pada channel B&C sebesar 10 kHz, grafik tampilan sinyal penuh menunjukkan adanya aktivitas pelepasan muatan petir yang terekam secara presisi pada detik ke-2 pada tiga saluran elektromagnetik, yaitu Ch A (Raw) sebagai representasi medan listrik, Ch B (HPF) dan Ch C (HPF) sebagai medan magnet, sementara komponen

akustik pada Ch D (Raw) baru menunjukkan respons lonjakan amplitudo mekanis yang masif dimulai pada area detik ke-4 hingga detik ke-6.

Fenomena jeda waktu (*time delay*) yang visual dan kontras antara kemunculan transien elektromagnetik pada detik ke-2 dengan fluktuasi gelombang akustik pada detik ke-4 ini secara empiris membuktikan adanya perbedaan kecepatan rambat yang sangat jauh antara gelombang elektromagnetik yang bergerak secepat cahaya (3×10^8 m/s) dengan gelombang akustik guntur yang merambat lambat sesuai kecepatan suara di udara (≈ 343 m/s).

4.1.1 Analisis Karakteristik Bentuk Gelombang Elektromagnetik Petir

Untuk mengamati mekanisme pemicuan awal (*triggering*) dari aktivitas sambaran petir khususnya pada fase *Return Stroke*, dilakukan proses pemotongan sinyal menggunakan jendela waktu yang sangat sempit dengan *Window* 2ms di sekitar pusat kejadian di titik waktu 1.999 detik, dapat dilihat pada Gambar 4. 2.

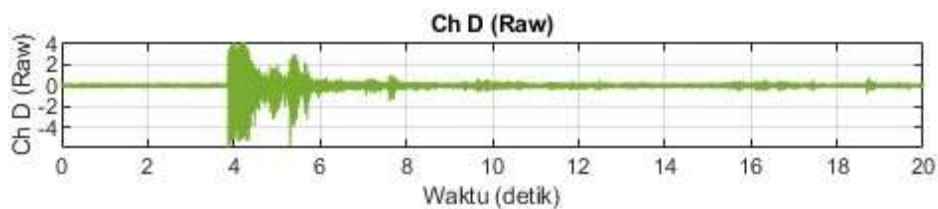


Gambar 4. 2 Gelombang Sinyal Elektromagnetik Petir dengan Window 2 ms

Melalui visualisasi berskala mikrodetik ini, terlihat bahwa komponen Medan Listrik (warna biru), Medan Magnet BT (warna merah), dan Medan Magnet UT (warna hijau) mengalami lonjakan pulsa transien yang sangat tajam, curam, dan saling berhimpit secara temporal tepat pada fraksi waktu yang sama tanpa ada pergeseran fase yang berarti. Kemunculan impuls tajam yang simultan pada ketiga parameter elektromagnetik ini menegaskan bahwa osilasi cepat tersebut bersumber dari satu titik pelepasan muatan fisis yang sama di saluran petir, di mana orientasi serta perbandingan amplitudo antara komponen medan magnet Barat-Timur (BT) dan Utara-Selatan (UT) nantinya dapat merepresentasikan arah datangnya sambaran petir terhadap posisi koordinat stasiun pengukuran.

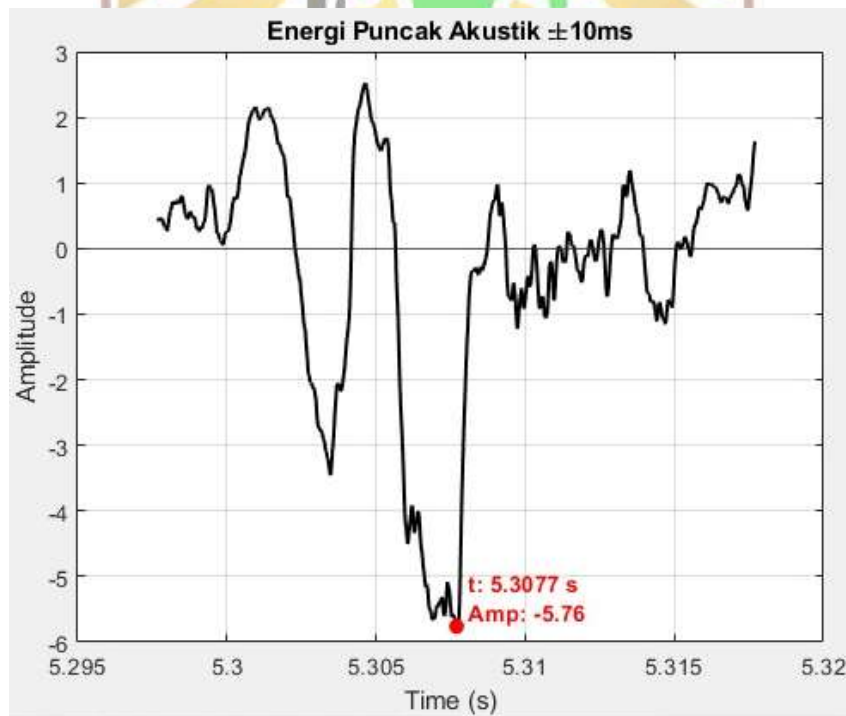
4.1.2 Analisis Karakteristik Bentuk Gelombang Akustik Petir

Secara sinkron, mikrofon menangkap *acoustic shock wave* setelah jeda waktu tertentu yang merepresentasikan jarak sambaran dari lokasi sensor. Pada pengamatan karakteristik sinyal akustik dalam Gambar 4. 3 dengan rentang pengamatan 0-20 detik, terlihat jelas bahwa hantaman tekanan udara terbesar terkonsentrasi pada interval 4-6 detik dengan amplitudo tegangan yang sangat fluktuatif sebelum akhirnya mengalami redaman secara eksponensial menuju level desibel latar belakang (*background noise*).



Gambar 4. 3 Gelombang Akustik Petir

Untuk meneliti struktur mekanis gelombang suara ini pada fase awalnya secara lebih detail, digunakan pengamatan energi puncak akustik *window* 10 ms. Berdasarkan Gambar 4. 4 yang menampilkan jendela waktu sempit tersebut, terlihat bahwa sinyal guntur pada tahap awal memiliki fase tekanan yang sangat curam (*sharp rising edge*).



Gambar 4. 4 Energi Puncak Gelombang Sinyal Akustik

Melalui pengamatan mikroskopis pada Gambar 4. 4, gelombang sinyal akustik menunjukkan osilasi tekanan yang sangat tidak beraturan dengan amplitude

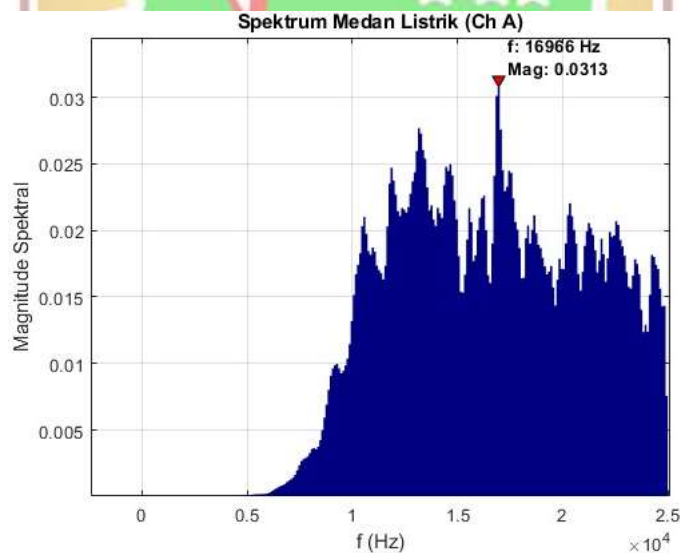
mencapai -5,76 dengan waktu puncak $t = 5,3077$ s. Hal ini menandakan bahwa pada jarak petir ke sensor, gelombang suara masih membawa karakteristik *shock wave* (gelombang kejut) yang belum sepenuhnya meluruh menjadi gelombang akustik linier.

Struktur *shock wave* akustik ini menunjukkan durasi yang cukup panjang, yang mengindikasikan bahwa sensor tidak hanya menangkap satu titik ledakan, melainkan integrasi dari seluruh kolom udara yang terionisasi di sepanjang kanal petir. Keberhasilan sensor dalam menangkap fase awal gelombang kejut ini sangat krusial untuk memastikan akurasi korelasi silang, karena bagian awal gelombang inilah yang paling berkaitan langsung dengan waktu *return stroke* elektromagnetik.

4.2 Analisis Karakteristik Sinyal Petir dalam Domain Frekuensi

4.2.1 Analisis Karakteristik Spektral Sinyal Elektromagnetik

Transformasi data dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) pada MATLAB diterapkan untuk memetakan distribusi energi transien dari komponen elektromagnetik petir fase *Return Stroke*.

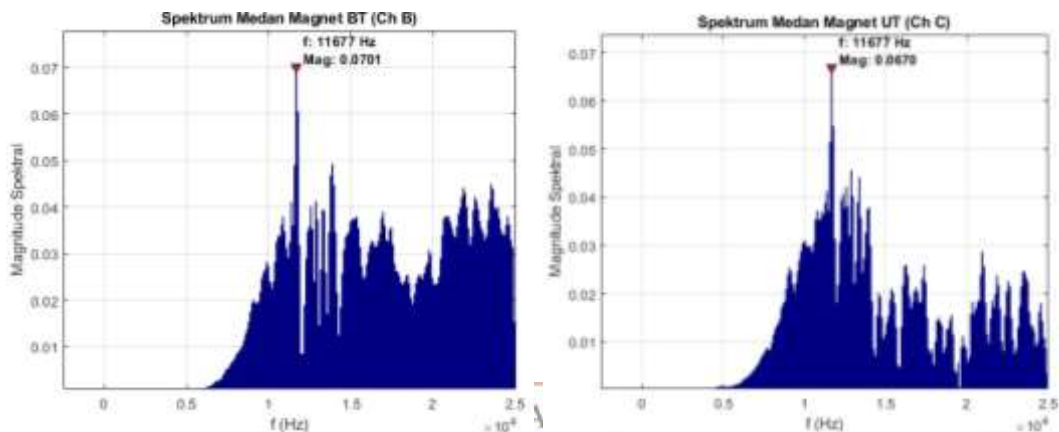


Gambar 4.5 Transformasi Gelombang Sinyal Medan Listrik Petir dari Domain Waktu ke Domain Frekuensi dengan Metode *Fast Fourier Transform*

Berdasarkan grafik spektrum FFT pada Gambar 4.5, kurva FFT Medan Listrik menunjukkan profil magnitudo amplitudo spektral yang cenderung landai, konstan, dan berada pada level yang sangat rendah di sepanjang area frekuensi rendah dari 0 Hz hingga kisaran 5.000 Hz. Ketika memasuki rentang frekuensi di atas 7.000 Hz, grafik spektral medan listrik tersebut mulai mengalami kenaikan magnitudo yang signifikan disertai dengan fluktuasi osilasi acak yang rapat.

Aktivitas energi spektral ini terus bertahan tinggi dan dinamis di sepanjang area frekuensi tinggi, dengan puncak amplitudo tertinggi (dominan) berada pada

16.966 Hz, serta puncak-puncak lainnya yang tersebar luas dari rentang 10.000 Hz hingga mencapai batas atas sebaran data di angka $2,5 \times 10^4$ Hz (25.000 Hz).



Gambar 4. 6 Transformasi Gelombang Sinyal Medan Magnet Petir (Ch B & Ch C) dari Domain Waktu ke Domain Frekuensi dengan Metode *Fast Fourier Transform*

Berdasarkan hasil transformasi fourier pada Gambar 4. 6, karakteristik spektral dari komponen spektrum FFT Medan Magnet BT (Ch B) dan Medan Magnet UT (Ch C) menunjukkan pola distribusi energi transien yang sangat identik satu sama lain. Pada area frekuensi rendah, yaitu mulai dari 0 kHz hingga mendekati 6 kHz, kurva amplitudo kedua komponen medan magnet berada pada level yang sangat rendah dan cenderung landai. Peningkatan magnitudo yang signifikan mulai terlihat ketika memasuki frekuensi di atas 6 kHz, yang ditandai dengan munculnya fluktuasi osilasi acak yang rapat dan dinamis hingga batas atas pengamatan di 25 kHz.

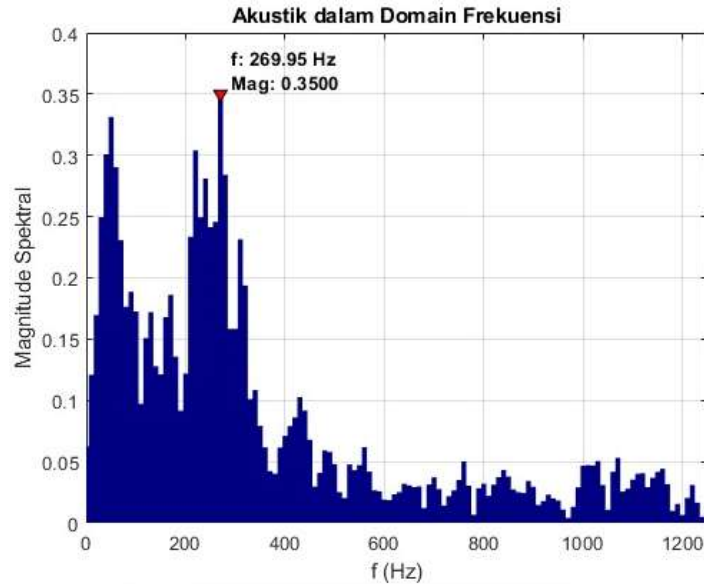
Menariknya, kedua komponen medan magnet ini menghasilkan puncak amplitudo pada titik frekuensi yang sama persis, yaitu pada 11,677 kHz. Perbedaan mendasar hanya terletak pada nilai magnitudo puncak absolutnya. Komponen Medan Magnet BT (Ch B) mencapai magnitudo puncak sebesar 0,0701, sedikit lebih tinggi dibandingkan komponen Medan Magnet UT (Ch C) yang memiliki magnitudo puncak sebesar 0,0670. Setelah melewati puncak dominan tersebut, kedua grafik mengalami fluktuasi penurunan (peluruhan) energi, namun tetap mempertahankan aktivitas spektral yang cukup tinggi pada rentang 12 kHz hingga 25 kHz.

4.2.2 Analisis Karakteristik Spektral *Acoustic Shock Wave* Petir

Data akustik yang terekam dianalisis menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mengidentifikasi komponen frekuensi dominan. Kombinasi *Spectrogram* berbasis *Short-Time Fourier Transform* (STFT) dan estimasi *Instantaneous Frequency* (IF) untuk mengamati perubahan frekuensi sesaat terhadap waktu. Berdasarkan hasil olah data, ditemukan karakteristik unik dari *acoustic shock wave* sebagai berikut:

A. Analisis Frekuensi Dominan *Acoustic Shock Wave* Petir

Berdasarkan hasil transformasi sinyal menggunakan FFT, terlihat bahwa energi akustik guntur didominasi oleh spektrum frekuensi rendah. ditunjukkan oleh hasil transformasi domain frekuensi pada Gambar 4. 7, di mana konsentrasi densitas energi terbesar justru menumpuk secara mutlak pada area frekuensi yang rendah.



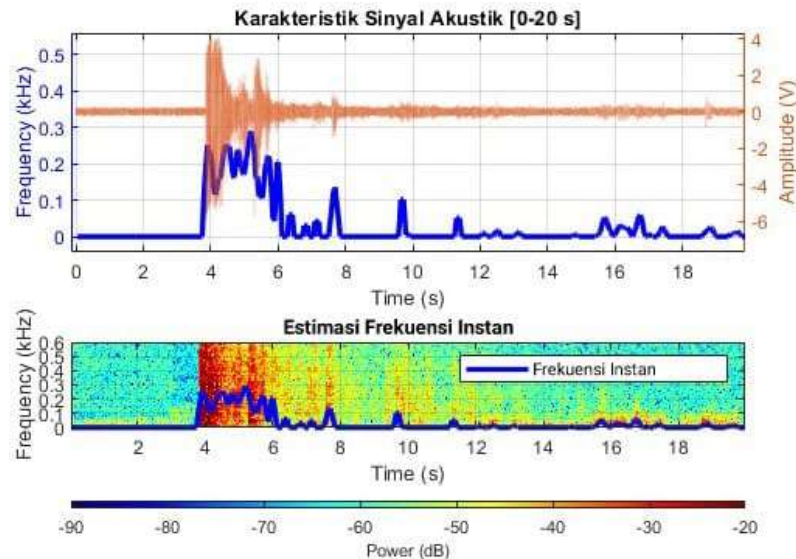
Gambar 4. 7 Transformasi Sinyal Akustik dari Domain Waktu ke Domain Frekuensi Dengan Metode *Fast Fourier Transform*

Berdasarkan visualisasi grafik diatas, memetakan parameter frekuensi terhadap parameter magnitudo spektral, spektrum gelombang guntur ini menyebar dalam rentang frekuensi rendah dan mengalami peluruhan amplitudo yang sangat tajam seiring bertambahnya frekuensi menuju area audio menengah. Amplitudo spektral puncak atau frekuensi dominan (f_p) dari komponen *acoustic* ini secara spesifik terkonsentrasi kuat pada area frekuensi infrasound hingga audio rendah, dimana puncaknya yang paling absolut pada frekuensi 269,95 Hz. Konsentrasi energi mekanis yang mutlak pada spektrum frekuensi rendah ini membuktikan secara ilmiah bahwa ekspansi termal hidrodinamik udara secara supersonik pada kanal petir menghasilkan gelombang kejut murni bertekanan tinggi yang memiliki panjang gelombang besar, sehingga mampu merambat dalam jarak spasial yang jauh di atmosfer tanpa mengalami pelemahan yang signifikan dibandingkan komponen suara frekuensi tinggi.

B. Analisis Perubahan Frekuensi Terhadap Waktu pada *Acoustic Shock Wave* Petir

Untuk menganalisis perubahan frekuensi gelombang suara akustik guntur yang terjadi seiring waktu, digunakan kombinasi *Spectrogram* berbasis *Short-Time Fourier Transform* (STFT) dan *Instantaneous Frequency* (IF). Berdasarkan visualisasi grafik *Spectrogram* dengan rentang pengamatan 0-20 s pada Gambar 4.

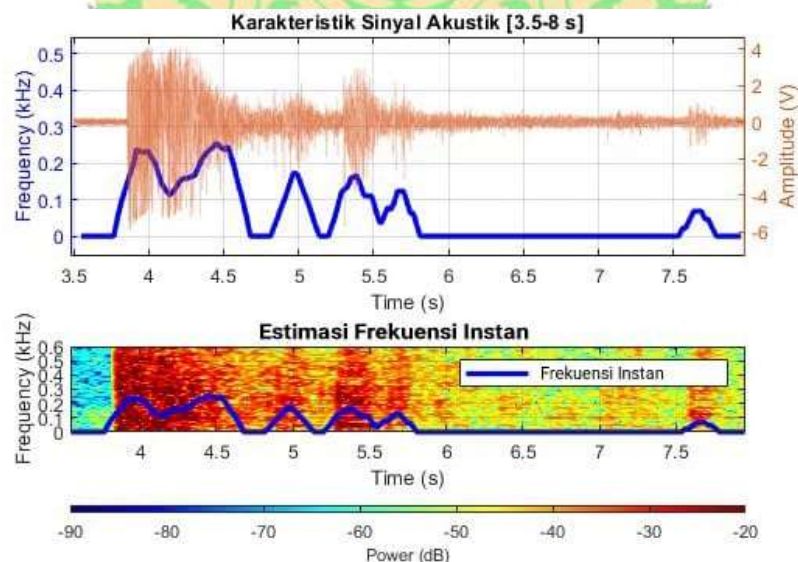
8, terlihat jelas bahwa akumulasi terbesar dari gelombang kejut akustik petir terkonsentrasi sangat padat pada interval 4-6 detik.



Gambar 4. 8 Distribusi Energi dan Perubahan Frekuensi Terhadap Waktu pada *Acoustic Shock Wave* Petir

Pada jendela waktu tersebut, intensitas energi puncak ditandai dengan perubahan gradasi warna yang sangat pekat dan menyala pada plot spektrogram. Pola sebaran energi ini meluruh secara perlahan dan eksponensial seiring bertambahnya waktu pengamatan menuju detik ke-20. Hal ini menunjukkan bahwa pasca-ledakan supersonik *return stroke* terjadi, kolom udara yang terionisasi mengalami pelepasan energi kinetik secara besar di atmosfer sebelum akhirnya meluruh sepenuhnya ke dalam noise lingkungan.

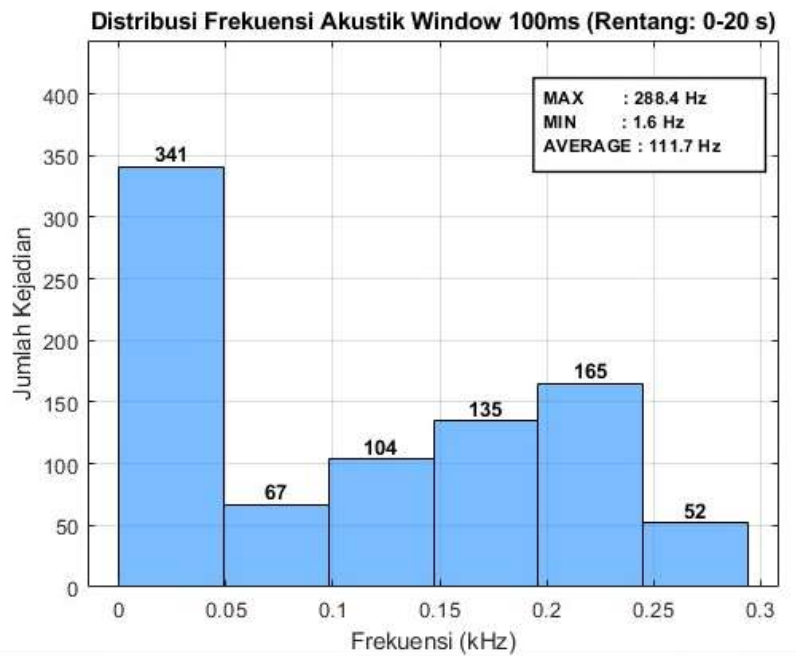
Untuk meneliti dinamika perubahan frekuensi terhadap waktu secara lebih spesifik, analisis dipersempit menggunakan grafik resolusi tinggi pada rentang 3,5-8s pada Gambar 4. 9.



Gambar 4. 9 Distribusi Energi dan Frekuensi Instan Akustik Rentang 3,5-8s

Melalui kurva *Instantaneous Frequency*, terkonfirmasi bahwa sebelum kedatangan gelombang kejut akustik menyentuh membran sensor mikrofon (yaitu pada interval 0 hingga 3.7 detik), nilai frekuensi sesaat berada konisten disekitar nol yang menandakan belum adanya penetrasi energi mekanis guntur yang signifikan dalam sistem. Namun, tepat pada saat transisi kedatangan gelombang di sekitar detik ke-3.8, nilai frekuensi sesaat langsung melonjak sangat drastis dan membentuk fluktuasi multi-puncak (*multi-peak*) yang bergerak sangat dinamis pada rentang frekuensi antara 0.1 kHz hingga 0.3 kHz (100-300 Hz).

Rentetan pulsa frekuensi sesaat yang beresilasi rapat ini berjalan selaras dengan visualisasi plot spektrogram di bawahnya yang menunjukkan pelebaran pita frekuensi sesaat pada fase awal gelombang kejut, yang mengindikasikan tingginya densitas beban tekanan mekanis yang diterima oleh membran sensor mikrofon di dalam *enclosure* akibat rambatan integrasi seluruh kolom udara yang meledak di sepanjang kanal petir. Setelah melewati fase hantaman energi utama tersebut (di atas detik ke-5) kurva frekuensi sesaat perlahan-lahan turun kembali seiring dengan habisnya fase *acoustic shock wave* murni dan beralihnya karakteristik sinyal menjadi gelombang akustik linier biasa yang memiliki sebaran energi lebih rendah.



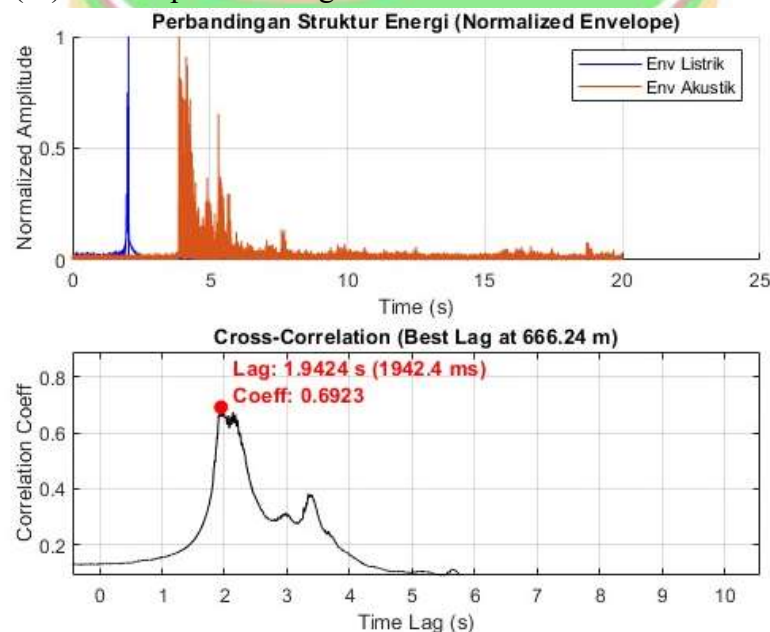
Gambar 4. 10 Histogram Distribusi Gelombang Akustik Petir yang menerapkan metode STFT dengan *Window Size* 100ms

Pada Gambar 4. 10, menampilkan Histogram Distribusi Gelombang Akustik yang diekstrak dari parameter STFT (*Short-Time Fourier Transform*) menggunakan konfigurasi *Window Size* 100 ms untuk rentang pengamatan penuh 0–20 detik. Histogram tersebut memetakan jumlah kejadian dari nilai Frekuensi Instan (*Instantaneous Frequency*) yang berhasil lolos dari ambang batas amplitudo (*thresholding*).

Hasil statistik data menunjukkan nilai frekuensi instan tertinggi yang terekam mencapai 288,4 Hz. Secara fisis, nilai batas atas ini mempresentasikan frekuensi dari komponen fase *clap* atau *crack* (dentuman tajam) yang terjadi tepat saat ujung depan gelombang guntur pertama kali menyentuh sensor akustik pada detik ke-3,8. Nilai frekuensi instan terendah menyentuh 1,6 Hz, yang mengonfirmasi adanya kandungan energi infrasound yang kuat di dalam fenomena guntur. Gelombang infrasound berfrekuensi sangat rendah ini dihasilkan oleh ekspansi termal skala besar dari jalur utama petir. Nilai rata-rata frekuensi instan sepanjang kejadian akustik berada pada 111,7 Hz, yang menandakan sinyal secara umum berada pada rentang audio frekuensi rendah.

4.3 Analisis Korelasi *Acoustic Shock Wave* dan Medan Listrik Petir

Analisis korelasi silang (*Cross-Correlation*) digunakan untuk mengidentifikasi keterkaitan fisis serta menghitung parameter jeda waktu spasial (*time lag*) antara aktivitas *return stroke* (medan listrik) dan kedatangan *acoustic shock wave* (gelombang akustik guntur). Sinyal medan listrik yang merambat secepat Cahaya (3×10^8 m/s) langsung terdeteksi sebagai parameter waktu referensi nol (t_0) pada detik ke-1.999, sementara gelombang akustik merambat lambat menembus atmosfer dan terdeteksi menyentuh sensor pada detik ke-3,8, memperlihatkan adanya jeda waktu yang signifikan antara kedua domain sinyal tersebut. Melalui visualisasi algoritma kurva struktur energi antara struktur energi listrik dan struktur energi akustik pada Gambar 4. 11, pola kenaikan curam medan listrik terbukti berbanding lurus dengan pembentukan tekanan tinggi awal gelombang akustik guntur yang memicu lonjakan dinamis *Instantaneous Frequency* (IF) akustik pada rentang frekuensi rendah.



Gambar 4. 11 Perbandingan Struktur Energi serta Korelasi Gelombang Medan Listrik dan Akustik Data Rekaman Tanggal 10 Maret 2026

Berdasarkan hasil komputasi dan simulasi MATLAB data rekaman tanggal 10 Maret 2026 pada Gambar 4. 11, penggunaan metode *Cross-Correlation* menghasilkan nilai *delay* atau *best lag* sebesar 1942,4 ms dengan estimasi jarak lokasi sambaran petir sejauh 666,24 meter dan nilai koefisien korelasi (R) yang didapatkan mencapai nilai puncak sebesar 0,6923 pada titik kecocokan mutlak (*peak correlation*) yang ditandai dengan titik merah. Korelasi yang linier ini secara empiris membuktikan bahwa besarnya energi listrik yang dilepaskan (dE/dt) mengontrol penuh intensitas suara guntur yang dihasilkan, di mana energi mekanis terbesar dari *acoustic shock wave* tersebut dominan (f_p) pada frekuensi rendah

Dengan cara pengolahan dan analisis data yang sama pada table 4.1, dimana dari 10 kejadian petir yang telah direkam dapat dilihat nilai dari masing masing nilai maximum, minimum, dan rata-rata frekuensi sinyal akustik dari petir.

Tabel 4. 1 Hasil Pengolahan Gelombang Sinyal Akustik dari 10 Kejadian Petir dengan Sample Rate 50 kHz/ms

Waktu Perekaman Data	Metode FFT (f_p)	Metode STFT Window size 100 ms			Time Delay	Jarak (d)	Koefisien Korelasi (R)
		Min	Max	Mean			
10-03-2026 (300)	269,95 Hz	1,6 Hz	288,4 Hz	111,7 Hz	1,942 s	666,24 m	0,6923
16-03-2026 (426)	119,98 Hz	4,8 Hz	322,8 Hz	81,5 Hz	5,159 s	1769,70 m	0,6525
14-02-2026 (333)	39,99 Hz	16,7 Hz	230,2 Hz	78,5 Hz	9,406 s	3226,29 m	0,5989
14-02-2026 (332)	139,97 Hz	3 Hz	293,2 Hz	105,4 Hz	10,70 s	3670,33 m	0,5724
08-02-2026 (316)	49,99 Hz	7,7 Hz	200,2 Hz	106,5 Hz	4,364 s	1496,76 m	0,5768
08-02-2026 (315)	199,96 Hz	3 Hz	265,5 Hz	79,5 Hz	11,309 s	3879,26 m	0,5723
08-02-2026 (314)	49,99 Hz	3,1 Hz	153,3 Hz	67,7 Hz	9,072 s	3111,81 m	0,5472
01-02-2026 (299)	139,97 Hz	2,5 Hz	187,3 Hz	56,9 Hz	5,353 s	1836,22 m	0,5167
31-01-2026 (297)	309,92 Hz	3,8 Hz	352,6 Hz	95,7 Hz	2,852 s	978,25 m	0,6987
31-01-2026 (295)	199,98 Hz	1,7 Hz	305,4 Hz	81,4 Hz	5,0072 s	1717,48 m	0,6482

Perbedaan nilai frekuensi antara FFT dan STFT pada sinyal akustik petir terjadi karena perbedaan cara kedua metode mengolah dimensi waktu pada sinyal

non-stasioner. Guntur memiliki karakteristik frekuensi yang berubah terhadap waktu, diawali oleh hentakan tajam frekuensi tinggi (*clap*) lalu diikuti gemuruh panjang frekuensi rendah (*rumble*). Penggunaan metode FFT pada penelitian ini bekerja secara lokal dengan mengisolasi energi sinyal pada window pendek (100 ms) tepat pada saat waktu puncak kejadian petir, menghasilkan satu spektrum statis yang merepresentasikan karakteristik frekuensi murni dari fase pelepasan energi tersebut

Sebaliknya, STFT pada sinyal akustik dianalisis menggunakan window berukuran 100 ms dengan tingkat overlap sebesar 95%. Hal ini membuat jendela waktu bergeser secara lokal setiap 5 ms sekali di sepanjang segmen pengamatan (visualisasi global 0–20 detik) untuk menghasilkan resolusi temporal Frekuensi Instan (IF) yang tinggi.

