

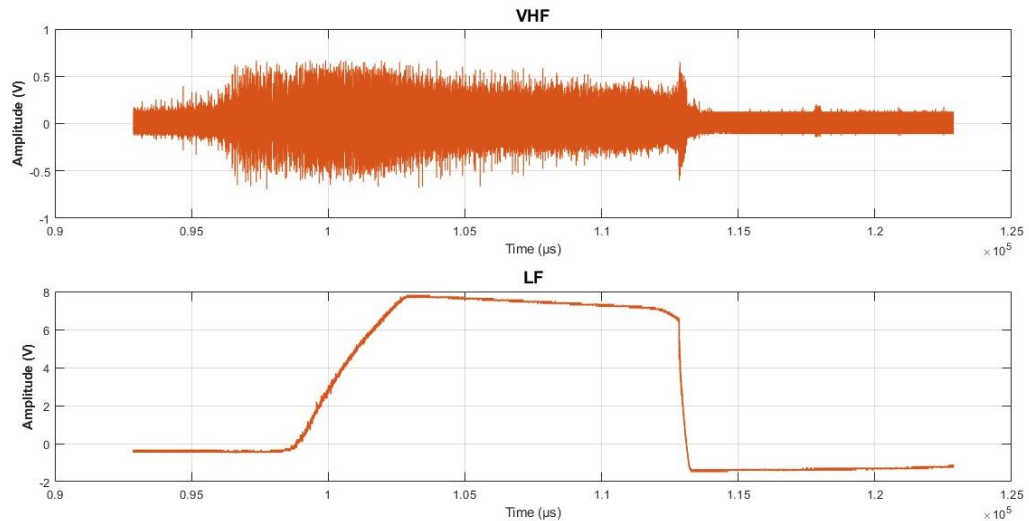
BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab ini membahas hasil pengolahan data sinyal medan listrik pada rentang frekuensi *Very High Frequency* (VHF) yang diperoleh dari beberapa kejadian pelepasan muatan petir. Analisis dilakukan menggunakan metode *Continuous Wavelet Transform* (CWT) dengan *Wavelet Morlet* untuk mengamati karakteristik sinyal dalam domain waktu-frekuensi. Melalui pendekatan ini, distribusi energi sinyal, variasi frekuensi dominan, serta perubahan karakteristik frekuensi terhadap waktu dapat diamati secara lebih rinci. Analisis CWT dipilih karena sinyal petir merupakan sinyal non-stasioner yang memiliki karakteristik frekuensi yang berubah secara cepat dalam waktu yang sangat singkat. Oleh karena itu, representasi waktu-frekuensi yang dihasilkan oleh CWT Morlet memungkinkan identifikasi pola energi dan aktivitas frekuensi yang tidak dapat diamati secara optimal hanya melalui analisis domain waktu. Hasil analisis kemudian ditampilkan dalam bentuk scalogram wavelet yang menggambarkan distribusi energi sinyal terhadap waktu dan frekuensi.

Selain itu, untuk memperjelas perkembangan karakteristik frekuensi yang muncul selama proses pelepasan muatan petir, dilakukan pula analisis frekuensi instan (*Instantaneous Frequency*) sebagai parameter pendukung dalam interpretasi hasil transformasi *wavelet*. Kombinasi antara *scalogram wavelet* dan karakteristik frekuensi instan digunakan untuk mengidentifikasi pola umum yang muncul pada setiap kejadian petir yang diamati, sehingga dapat diperoleh gambaran mengenai karakteristik sinyal VHF berdasarkan distribusinya pada domain waktu-frekuensi.

4.1 Karakteristik Sinyal Medan Listrik Pada Rentang VHF

Tahap awal penelitian ini difokuskan pada pengamatan karakteristik sinyal petir dalam domain waktu sebagai langkah identifikasi awal sebelum dilakukan analisis spektral yang lebih mendalam menggunakan metode *Continuous Wavelet Transform* (CWT). Data yang digunakan merupakan rekaman aktivitas pelepasan muatan listrik yang terdiri dari dua jenis sinyal utama, yakni sinyal *Low Frequency* (LF) dan sinyal *Very High Frequency* (VHF). Meskipun kedua sinyal tersebut merepresentasikan kejadian pelepasan muatan yang sama, keduanya memiliki profil bentuk gelombang yang berbeda sesuai dengan rentang frekuensi pengamatannya masing-masing. Representasi penampakan kejadian dari sinyal yang terekam pada salah satu kejadian pelepasan muatan disajikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Karakteristik sinyal LF dan VHF hasil pengamatan pada petir Negatif *Cloud to Ground* 8 Mei 2025.

Berdasarkan Gambar 4.1, sinyal medan listrik frekuensi rendah (LF) yang ditampilkan pada bagian bawah menunjukkan perubahan amplitudo yang berlangsung secara lebih lambat dan membentuk pola yang relatif halus. Sinyal LF memperlihatkan adanya kenaikan amplitudo secara bertahap hingga mencapai nilai maksimum, kemudian mengalami penurunan yang cukup tajam sebelum kembali menuju kondisi yang lebih stabil. Karakteristik tersebut menggambarkan perkembangan keseluruhan proses pelepasan muatan listrik yang terjadi selama peristiwa petir, sehingga sinyal LF dapat digunakan untuk mengamati fenomena petir dalam skala yang lebih luas. Sebaliknya, sinyal *Very High Frequency* (VHF) pada bagian atas menampilkan fluktuasi amplitudo yang jauh lebih rapat, cepat, dan kompleks. Aktivitas VHF mulai meningkat pada sekitar waktu $0,98 \times 10^5 \mu s$ dan mencapai kepadatan impuls yang tinggi hingga mendekati $1,13 \times 10^5 \mu s$. Banyaknya impuls beramplitudo tinggi yang muncul pada rentang waktu tersebut menunjukkan adanya aktivitas pelepasan muatan dan proses ionisasi yang berlangsung secara intensif di dalam kanal petir. Setelah periode aktivitas utama berakhir, amplitudo sinyal VHF mengalami penurunan yang signifikan dan kembali mendekati kondisi semula.

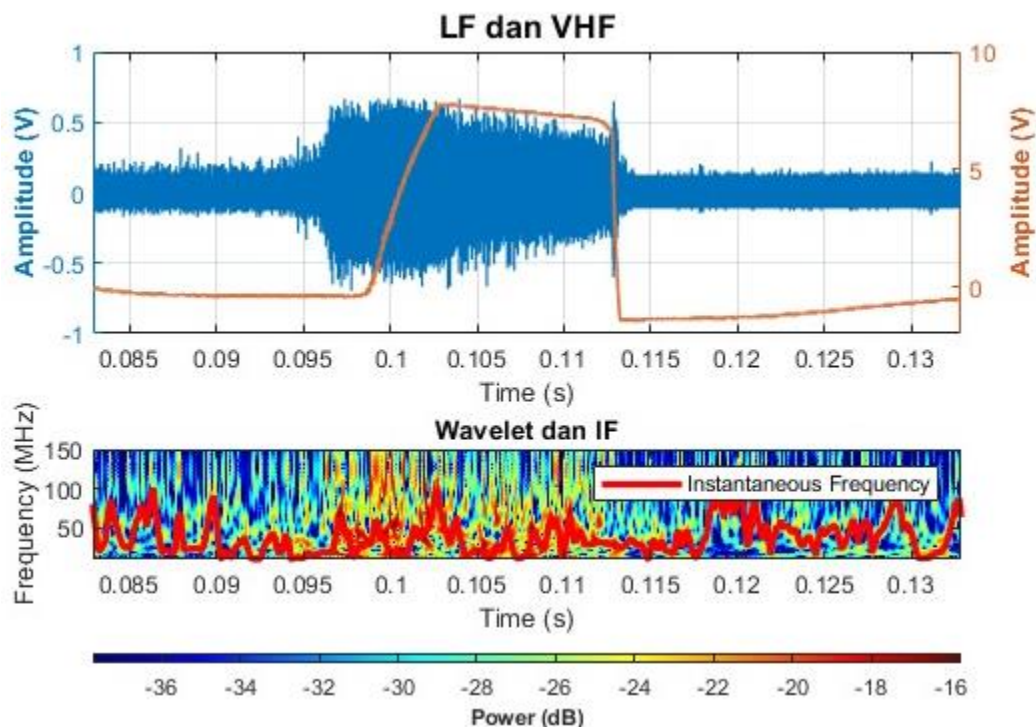
Perbedaan karakteristik antara kedua sinyal tersebut menunjukkan bahwa sinyal LF lebih efektif untuk menggambarkan perkembangan proses pelepasan muatan secara keseluruhan, sedangkan sinyal VHF mampu merekam detail aktivitas pelepasan muatan yang terjadi dalam skala waktu yang sangat singkat. Oleh karena itu, sinyal VHF dipilih sebagai fokus utama dalam penelitian ini karena memberikan informasi yang lebih rinci mengenai dinamika pelepasan muatan listrik serta karakteristik waktu-frekuensi yang terjadi selama peristiwa petir.

1.1.1 Analisis Karakteristik Sinyal Medan Listrik Pada Rentang VHF

Dalam penelitian ini, analisis dilakukan terhadap sinyal medan listrik petir yang diperoleh dari pengamatan pada rentang frekuensi *Very High Frequency*

(VHF). Data yang digunakan terdiri dari 10 kejadian petir yang telah dipilih dan diolah untuk mengamati karakteristik sinyal pada domain waktu-frekuensi. Fokus utama penelitian diarahkan pada sinyal VHF karena sinyal ini mampu merepresentasikan aktivitas pelepasan muatan petir dengan resolusi temporal yang tinggi serta mengandung informasi frekuensi yang lebih rinci dibandingkan sinyal pada rentang frekuensi yang lebih rendah.

Untuk menganalisis karakteristik frekuensi sinyal VHF yang berubah terhadap waktu, digunakan metode *Continuous Wavelet Transform* (CWT). Metode ini dipilih karena sinyal VHF petir bersifat *non-stasioner* sehingga kandungan frekuensinya berubah secara dinamis selama proses pelepasan muatan berlangsung. Melalui representasi waktu-frekuensi dalam bentuk *scalogram*, CWT mampu menunjukkan distribusi energi sinyal pada berbagai rentang frekuensi secara lebih jelas. Selain itu, analisis *Instantaneous Frequency* (IF) digunakan sebagai parameter pendukung untuk menggambarkan perubahan frekuensi dominan terhadap waktu dan membantu interpretasi hasil transformasi *wavelet*. Gambar 4.2 menampilkan hasil analisis sinyal VHF berupa bentuk gelombang pada domain waktu, *scalogram* hasil transformasi *wavelet*, serta grafik *Instantaneous Frequency* yang diperoleh dari data pengamatan.



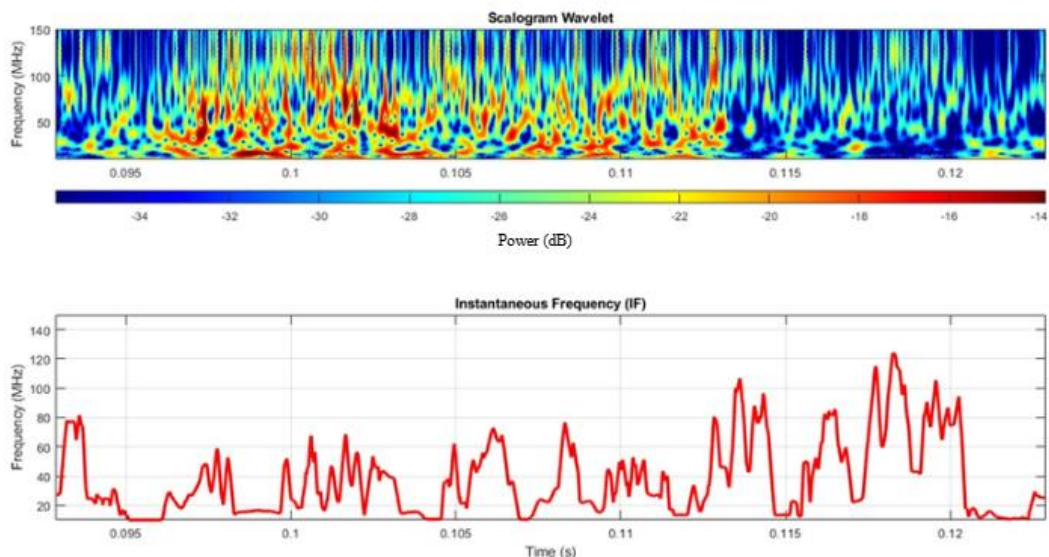
Gambar 4.2 *Scalogram* dan Bentuk Sinyal Medan Listrik Petir VHF yang terlihat dalam *window* 50ms

Pada penelitian ini, analisis dilakukan menggunakan jendela pengamatan *window* sebesar 50ms. Pemilihan *window* 50ms bertujuan untuk memperoleh resolusi waktu yang cukup tinggi sehingga perubahan karakteristik sinyal petir yang berlangsung sangat cepat dapat diamati dengan lebih jelas. *Window* yang sama juga

diterapkan pada seluruh data petir negatif agar proses analisis dan perbandingan antar data dilakukan secara konsisten. Dengan penggunaan *window* 50ms, distribusi energi sinyal pada domain waktu-frekuensi dapat diamati secara lebih rinci tanpa mengurangi keterwakilan karakteristik utama dari sinyal petir yang dianalisis.

1.1.2 Analisis Scalogram dan Instantaneous Frequency Terhadap Waktu Pada VHF

Berdasarkan hasil data kejadian petir yang sudah di olah menggunakan MATLAB, diperoleh hasil bentuk *scalogram* sinyal petir yang terlihat pada Gambar 4.3.



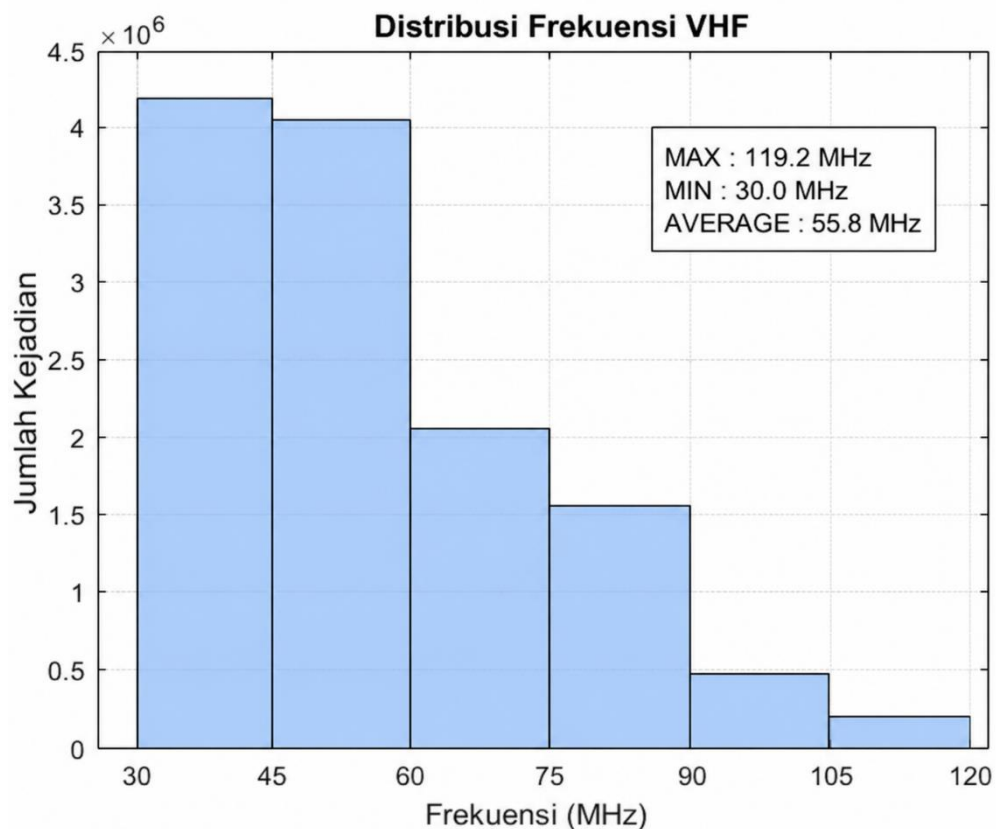
Gambar 4.3 Scalogram dan IF dari data kejadian -CG tanggal 8 Mei 2025 dengan *window* 50ms

Pada gambar 4.3 merupakan hasil analisis menggunakan *Continuous Wavelet Transform* (CWT) menunjukkan bahwa distribusi energi sinyal VHF tidak tersebar secara merata sepanjang waktu pengamatan. Pada *scalogram* terlihat bahwa konsentrasi energi, yang direpresentasikan oleh skala warna (*colorbar*) dalam satuan desibel (dB), terlihat lebih dominan pada rentang frekuensi sekitar 20–100 MHz, ditandai oleh warna kuning hingga merah yang menunjukkan nilai magnitudo dB yang lebih tinggi, dengan beberapa komponen mencapai frekuensi sekitar 120 MHz. Aktivitas energi yang paling intens terlihat pada interval waktu sekitar 0,098 s hingga 0,112 s, kemudian mengalami penurunan sebelum kembali muncul dengan intensitas yang lebih rendah pada interval waktu berikutnya. Pola ini menunjukkan bahwa proses pelepasan muatan berlangsung secara dinamis dan tidak terjadi secara kontinu selama kejadian petir.

Grafik *Instantaneous Frequency* (IF) pada bagian bawah memperlihatkan bahwa frekuensi dominan berubah terhadap waktu dengan kisaran sekitar 20 MHz hingga 125 MHz. Fluktuasi frekuensi tersebut mengikuti perubahan distribusi energi pada *scalogram*, di mana peningkatan frekuensi dominan umumnya

bertepatan dengan munculnya konsentrasi energi yang lebih tinggi. Sebaliknya, ketika energi pada *scalogram* menurun, nilai frekuensi instan juga cenderung berada pada rentang frekuensi yang lebih rendah.

Kesesuaian antara pola distribusi energi pada *scalogram* dan perubahan frekuensi dominan pada grafik IF menunjukkan bahwa metode *Continuous Wavelet Transform* (CWT) berbasis *Morlet Wavelet* mampu merepresentasikan karakteristik waktu-frekuensi sinyal VHF secara rinci. Hasil ini memperlihatkan bahwa sinyal VHF memiliki sifat *non-stasioner*, sehingga kandungan frekuensinya berubah mengikuti dinamika proses pelepasan muatan selama kejadian petir. Dengan demikian, penggunaan *Wavelet Morlet* memberikan representasi yang baik dalam mengidentifikasi variasi energi dan perubahan frekuensi dominan pada sinyal VHF.



Gambar 4.4 Histogram Distribusi Frekuensi VHF kejadian -CG tanggal 8 Mei 2025

Gambar 4.4 menunjukkan histogram distribusi *Instantaneous Frequency* (IF) dari sinyal VHF pada data negatif *cloud to ground* kejadian petir yang dianalisis. Berdasarkan histogram tersebut, terlihat bahwa distribusi frekuensi tidak merata dan didominasi oleh frekuensi pada rentang 30–60 MHz, dengan jumlah kejadian tertinggi berada pada interval tersebut. Seiring meningkatnya frekuensi, jumlah kejadian cenderung mengalami penurunan, sehingga hanya sebagian kecil sinyal yang memiliki frekuensi di atas 90 MHz.

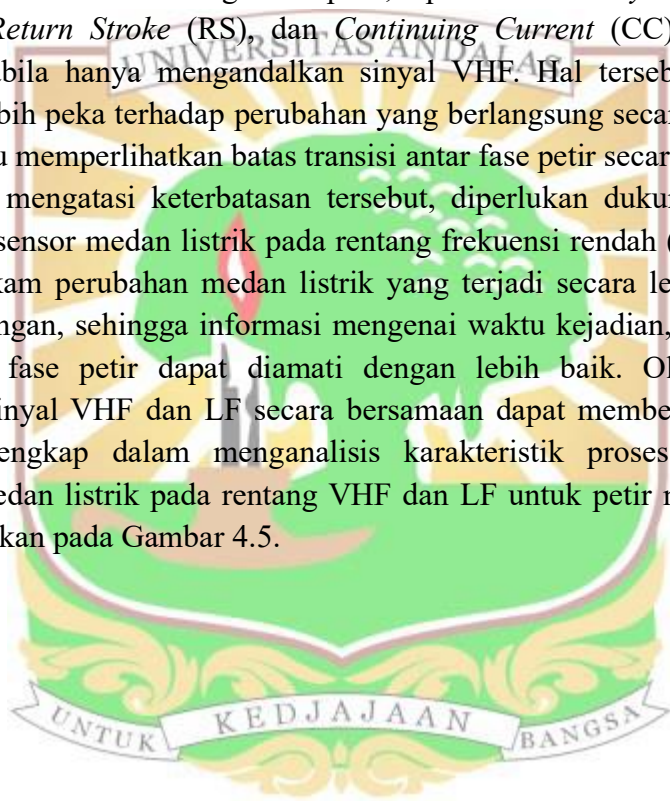
Secara statistik, hasil analisis menunjukkan bahwa frekuensi minimum yang diperoleh sebesar 30,0 MHz, frekuensi maksimum mencapai 119,2 MHz, dan frekuensi rata-rata sebesar 55,8 MHz. Pola distribusi ini menunjukkan bahwa

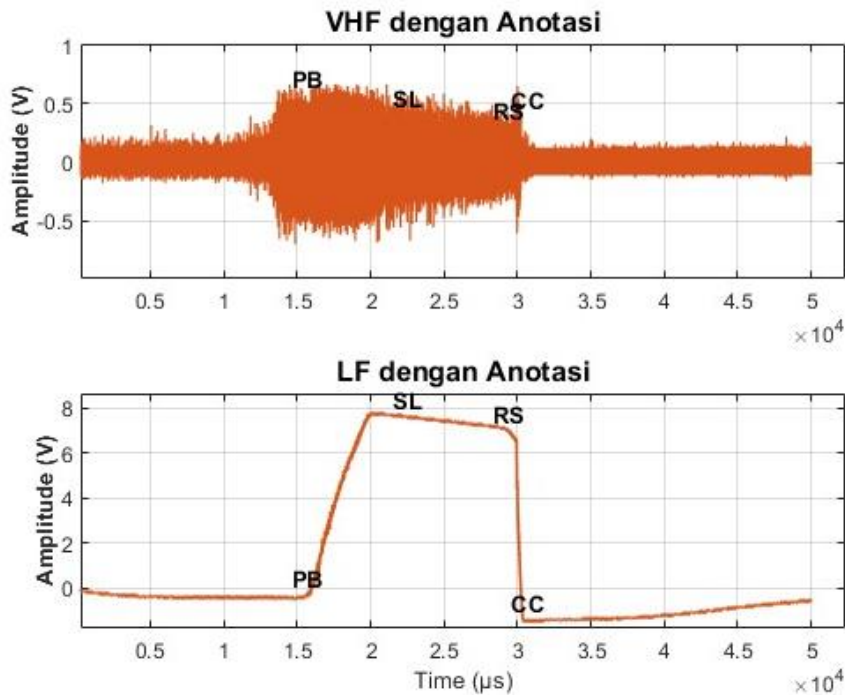
sebagian besar emisi VHF yang dihasilkan selama proses pelepasan muatan petir terkonsentrasi pada rentang 30–60 MHz, sedangkan emisi pada frekuensi yang lebih tinggi terjadi dengan intensitas yang lebih rendah. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa karakteristik radiasi elektromagnetik petir pada penelitian ini lebih dominan berada pada spektrum VHF bagian bawah hingga menengah, sementara komponen frekuensi tinggi hanya muncul pada sebagian kecil proses pelepasan muatan.

4.2 Analisa Identifikasi Fase Petir pada VHF

Sinyal medan listrik petir pada rentang frekuensi *Very High Frequency* (VHF) umumnya memiliki karakteristik yang sangat cepat dan kompleks. Kondisi ini menyebabkan identifikasi berbagai fase petir, seperti *Preliminary Breakdown* (PB), *Leader* (L), *Return Stroke* (RS), dan *Continuing Current* (CC), menjadi sulit dilakukan apabila hanya mengandalkan sinyal VHF. Hal tersebut dikarenakan sinyal VHF lebih peka terhadap perubahan yang berlangsung secara cepat, namun kurang mampu memperlihatkan batas transisi antar fase petir secara jelas.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, diperlukan dukungan dari *Slow Antenna* atau sensor medan listrik pada rentang frekuensi rendah (LF). Sinyal LF mampu merekam perubahan medan listrik yang terjadi secara lebih lambat dan berkesinambungan, sehingga informasi mengenai waktu kejadian, polaritas, serta durasi setiap fase petir dapat diamati dengan lebih baik. Oleh karena itu, penggunaan sinyal VHF dan LF secara bersamaan dapat memberikan informasi yang lebih lengkap dalam menganalisis karakteristik proses petir. Bentuk gelombang medan listrik pada rentang VHF dan LF untuk petir negatif awan ke tanah ditunjukkan pada Gambar 4.5.





Gambar 4.5 Pembagian Waktu pada berbagai Fase Pelepasan Petir

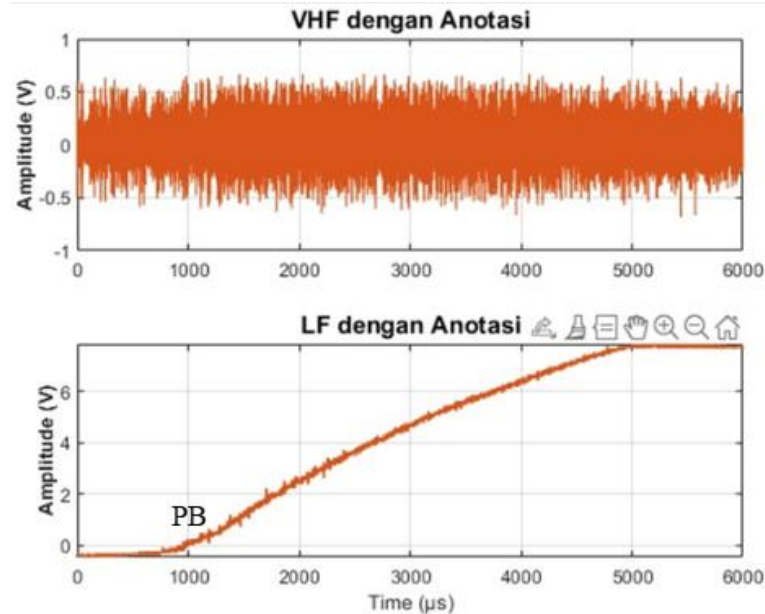
4.2.1 Preliminary Breakdown

Pada petir negatif awan ke tanah (-CG), fase *Preliminary Breakdown* (PB) merupakan tahap awal yang menandai dimulainya proses pelepasan muatan di dalam awan sebelum terbentuknya saluran petir utama. Fase ini ditandai dengan munculnya aktivitas elektromagnetik yang dapat diamati pada sinyal LF maupun VHF. Dalam penelitian ini, identifikasi fase PB dilakukan melalui pengamatan perubahan amplitudo pada kedua sinyal tersebut dalam rentang waktu pengamatan yang telah ditentukan.

Berdasarkan Gambar 4.5, sinyal LF menunjukkan adanya peningkatan amplitudo secara bertahap mulai sekitar 1000 μs hingga mencapai nilai maksimum mendekati 8V pada sekitar 5000 μs . Peningkatan ini mengindikasikan terjadinya akumulasi dan perpindahan muatan listrik yang semakin intens di dalam awan. Sementara itu, sinyal VHF memperlihatkan kemunculan pulsa-pulsa berfrekuensi tinggi yang semakin rapat seiring dengan meningkatnya amplitudo sinyal LF.

Aktivitas VHF tersebut menunjukkan adanya proses ionisasi dan pembentukan jalur pelepasan muatan yang berlangsung secara aktif pada fase awal perkembangan petir. Karakteristik yang terlihat pada kedua sinyal menunjukkan bahwa fase *Preliminary Breakdown* tidak hanya ditandai oleh perubahan medan listrik pada sinyal LF, tetapi juga disertai oleh peningkatan aktivitas radiasi elektromagnetik pada rentang frekuensi VHF. Kemunculan pulsa-pulsa VHF yang semakin padat mengindikasikan bahwa proses pelepasan muatan berlangsung secara bertahap dan melibatkan banyak kejadian *breakdown* dalam skala waktu yang sangat singkat. Oleh karena itu, sinyal VHF memberikan informasi yang lebih rinci mengenai dinamika pelepasan muatan pada fase *Preliminary Breakdown*.

dibandingkan sinyal LF yang hanya menunjukkan perubahan medan listrik secara keseluruhan.

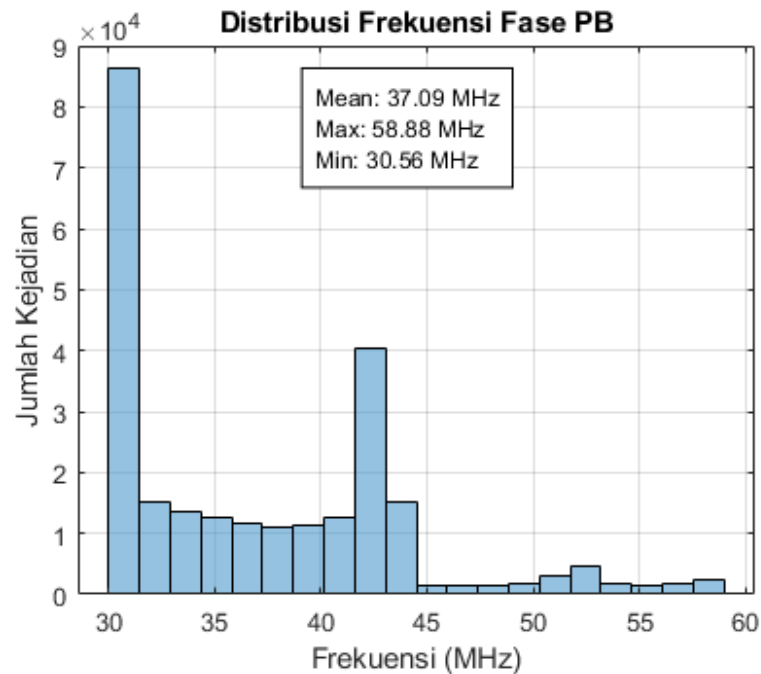


Gambar 4.6 Pulsa *Preliminary Breakdown* dengan resolusi waktu lebih rinci menggunakan (*Window 5ms*)

Adapun terlihat pada gambar 4.6 dan juga pada gambar 4.5, aktivitas pada sinyal VHF teramati lebih awal dibandingkan perubahan yang terlihat pada sinyal LF. Pulsa-pulsa VHF mulai muncul sebelum adanya peningkatan amplitudo yang signifikan pada sinyal LF. Kondisi ini tidak menunjukkan bahwa proses *Preliminary Breakdown* pada VHF terjadi lebih dahulu dibandingkan pada LF, melainkan disebabkan oleh perbedaan karakteristik dan kemampuan respons dari masing-masing sensor yang digunakan.

Antena LF yang digunakan dalam penelitian ini memiliki keterbatasan *bandwidth* sehingga lebih sensitif terhadap komponen frekuensi rendah dan perubahan medan listrik yang berlangsung relatif lambat. Akibatnya, aktivitas *breakdown* awal yang menghasilkan radiasi pada frekuensi tinggi belum dapat direkam secara optimal oleh sensor LF. Sebaliknya, antena VHF memiliki rentang frekuensi kerja yang jauh lebih tinggi sehingga mampu mendeteksi radiasi elektromagnetik yang dihasilkan oleh proses ionisasi dan pembentukan kanal pelepasan muatan sejak tahap awal perkembangan petir.

Hasil pengamatan pada fase *Preliminary Breakdown* menunjukkan bahwa sinyal LF dan VHF memberikan informasi yang saling melengkapi dalam mengidentifikasi aktivitas pelepasan muatan yang terjadi pada tahap awal pembentukan petir. Sinyal LF menggambarkan perubahan medan listrik secara keseluruhan, sedangkan sinyal VHF mampu menunjukkan aktivitas pelepasan muatan dalam skala waktu yang lebih singkat. Karakteristik yang diperoleh dari kedua sinyal tersebut menjadi dasar dalam memahami perkembangan aktivitas elektromagnetik yang terjadi selama fase *Preliminary Breakdown*.



Gambar 4.7 Histogram distribusi frekuensi IF pada fase PB

Gambar 4.7 menunjukkan histogram distribusi *Instantaneous Frequency* (IF) pada fase *Preliminary Breakdown* (PB). Berdasarkan hasil analisis, distribusi frekuensi didominasi oleh rentang 30–32 MHz, yang ditunjukkan oleh tingginya jumlah kejadian pada interval frekuensi tersebut. Selain itu, terlihat adanya konsentrasi data lain pada kisaran 41–43 MHz, sedangkan frekuensi di atas 45 MHz memiliki jumlah kejadian yang relatif sedikit. Hasil analisis menunjukkan bahwa fase PB memiliki nilai frekuensi minimum sebesar 30,56 MHz, frekuensi maksimum sebesar 58,88 MHz, dan frekuensi rata-rata sebesar 37,09 MHz. Pola distribusi ini menunjukkan bahwa aktivitas pelepasan muatan pada fase *Preliminary Breakdown* cenderung didominasi oleh emisi frekuensi yang lebih rendah, sementara kemunculan frekuensi yang lebih tinggi hanya terjadi pada sebagian kecil kejadian selama proses *breakdown* berlangsung.

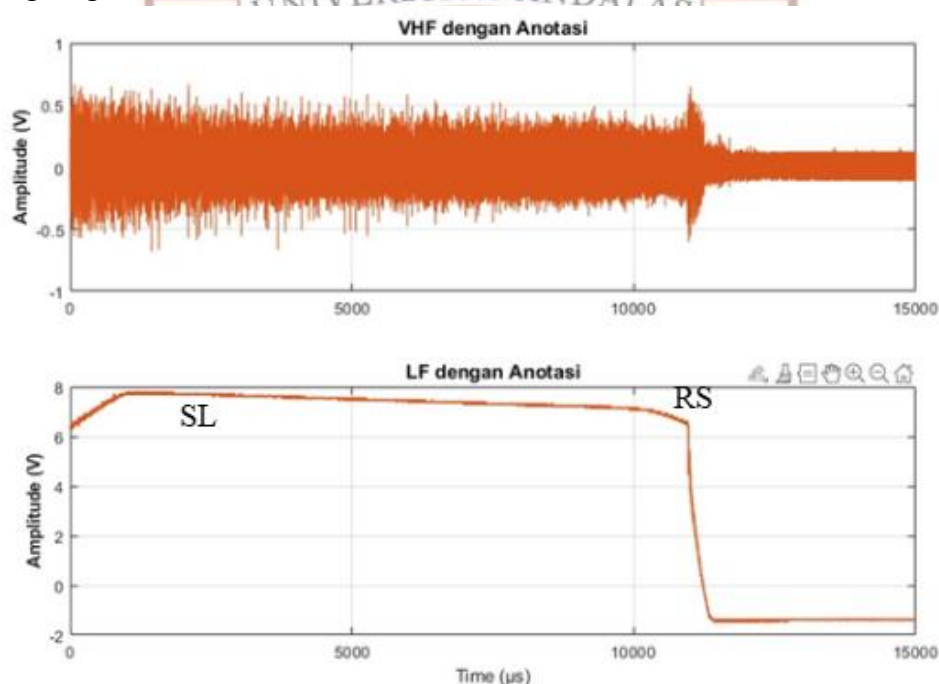
4.2.2 *Stepped Leader ke Return Stroke*

Pada petir negatif awan ke tanah (-CG), fase *Stepped Leader* (SL) merupakan tahap propagasi muatan negatif dari awan menuju permukaan bumi melalui pembentukan kanal ionisasi secara bertahap. Aktivitas ini menghasilkan emisi elektromagnetik yang dapat diamati baik pada sinyal LF maupun VHF. Fase *Stepped Leader* ditunjukkan oleh sinyal LF yang mempertahankan amplitudo relatif tinggi dan cenderung stabil pada rentang waktu sekitar $1,0 \times 10^3 \mu\text{s}$ (1000 μs) hingga $1,05 \times 10^4 \mu\text{s}$ (10500 μs). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa proses propagasi muatan masih berlangsung sebelum terjadinya pelepasan muatan utama.

Pada saat yang sama, sinyal VHF memperlihatkan aktivitas yang cukup intens sepanjang fase *Stepped Leader*. Kepadatan pulsa-pulsa VHF yang muncul selama interval $1,0 \times 10^3 \mu\text{s}$ (1000 μs) hingga $1,05 \times 10^4 \mu\text{s}$ (10500 μs)

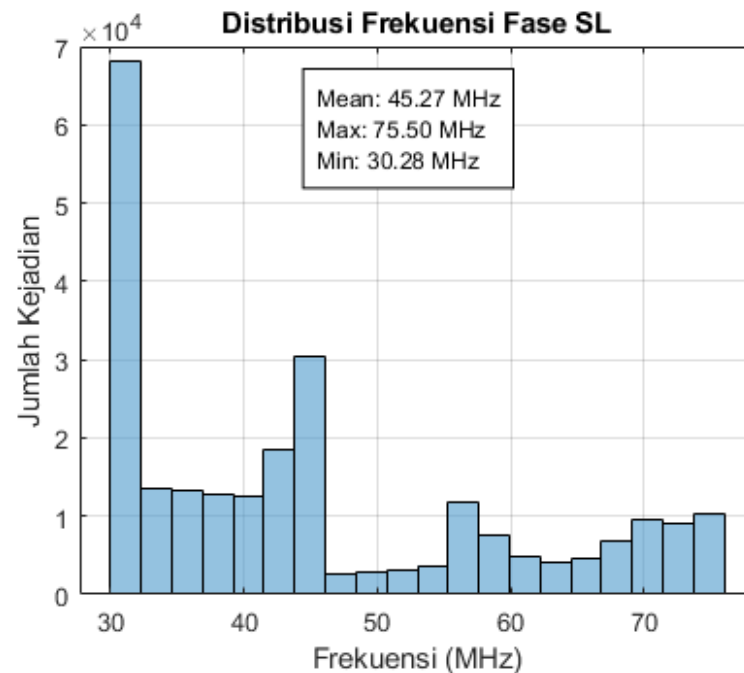
mengindikasikan adanya proses ionisasi dan perkembangan kanal pelepasan muatan yang berlangsung secara aktif. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa sinyal VHF memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap dinamika propagasi muatan yang terjadi sebelum terbentuknya kanal utama petir.

Menjelang akhir fase *Stepped Leader*, sinyal LF mengalami perubahan amplitudo yang sangat cepat dan signifikan pada rentang waktu sekitar $1,05 \times 10^4 \mu\text{s}$ ($10500 \mu\text{s}$) hingga $1,10 \times 10^4 \mu\text{s}$. Perubahan ini menandai terjadinya fase *Return Stroke* (RS), yaitu proses pelepasan muatan utama melalui kanal yang telah terbentuk sebelumnya. Pada fase ini amplitudo sinyal LF berubah secara drastis akibat aliran arus yang besar di dalam kanal petir. Sementara itu, sinyal VHF masih menunjukkan aktivitas frekuensi tinggi di sekitar waktu terjadinya *Return Stroke*, meskipun intensitasnya mulai berkurang setelah pelepasan muatan utama berlangsung.



Gambar 4.8 Fase *Stepped Leader* ke *Return Stroke* pada window 5ms pada Data Petir yang terekam tanggal 8 Mei 2025

Hasil pengamatan ini menunjukkan bahwa kombinasi sinyal LF dan VHF mampu menggambarkan transisi dari fase *Stepped Leader* menuju *Return Stroke* dengan cukup jelas. Sinyal LF memberikan informasi mengenai perubahan medan listrik yang berkaitan dengan pelepasan muatan utama, sedangkan sinyal VHF menunjukkan aktivitas elektromagnetik yang menyertai perkembangan kanal petir sebelum dan saat terjadinya *Return Stroke*.



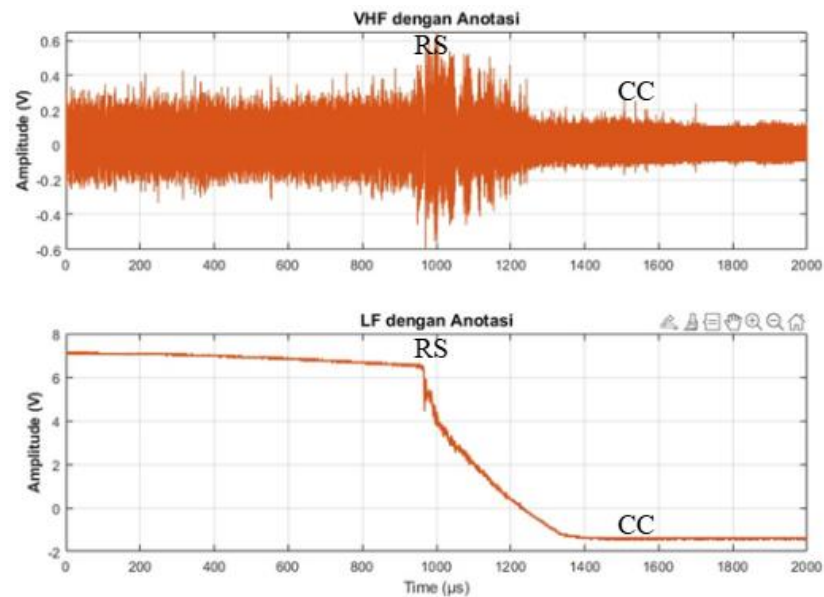
Gambar 4.9 Histogram distribusi frekuensi pada fase SL

Gambar 4.9 menunjukkan histogram distribusi *Instantaneous Frequency* (IF) pada fase *Stepped Leader* (SL). Berdasarkan hasil analisis, distribusi frekuensi pada fase ini berada pada rentang 30,28-75,50 MHz, dengan nilai rata-rata sebesar 45,27 MHz. Frekuensi dominan terkonsentrasi pada kisaran 30–32 MHz, yang ditunjukkan oleh tingginya jumlah kejadian pada interval frekuensi tersebut. Selain itu, terlihat adanya peningkatan jumlah kejadian pada kisaran 42–45 MHz, sedangkan distribusi frekuensi pada rentang 50–75 MHz cenderung lebih menyebar dengan jumlah kejadian yang relatif lebih sedikit. Pola distribusi ini menunjukkan bahwa selama fase *Stepped Leader*, aktivitas pelepasan muatan didominasi oleh komponen frekuensi sekitar 30 MHz, namun masih terdapat variasi frekuensi hingga mencapai 75,50 MHz. Hal ini mengindikasikan bahwa proses propagasi *leader* menghasilkan karakteristik spektral yang lebih bervariasi dibandingkan fase *Preliminary Breakdown* (PB).

4.2.3 Return Stroke

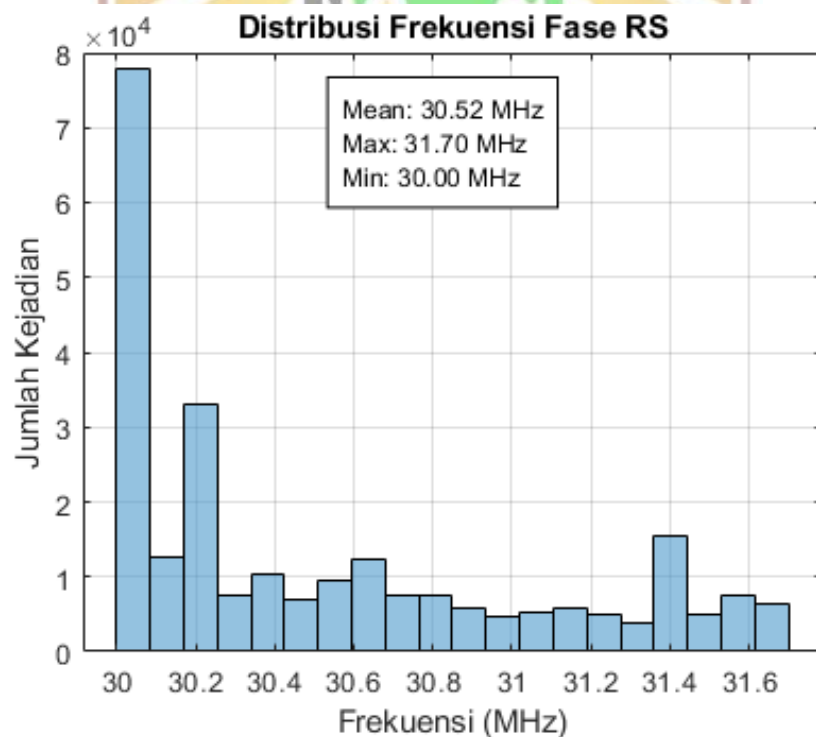
Fase *Return Stroke* (RS), yaitu fase pelepasan muatan utama melalui kanal petir yang telah terbentuk. Pada sinyal LF terlihat perubahan amplitudo yang sangat tajam pada rentang waktu sekitar $9,5 \times 10^2 \mu\text{s}$ hingga $1,35 \times 10^3 \mu\text{s}$, yang menunjukkan terjadinya aliran arus utama dengan intensitas tinggi. Sementara itu, sinyal VHF memperlihatkan peningkatan aktivitas pulsa berfrekuensi tinggi yang mencapai intensitas maksimum di sekitar $1,0 \times 10^3 \mu\text{s}$, kemudian menurun secara bertahap setelah fase *Return Stroke* berakhir. Karakteristik ini menunjukkan bahwa fase *Return Stroke* merupakan tahap pelepasan energi terbesar pada peristiwa petir, di mana sinyal LF merepresentasikan perubahan medan listrik akibat arus utama,

sedangkan sinyal VHF menggambarkan tingginya aktivitas pelepasan muatan yang menyertai proses tersebut, dan bisa terlihat seperti gambar 4.10.



Gambar 4.10 Fase *Return Stroke* dan *Continuing Current* yang dilihat dengan (window 1ms)

Histogram distribusi frekuensi untuk fase *return stroke* dapat dilihat dari gambar 4.11 berikut:



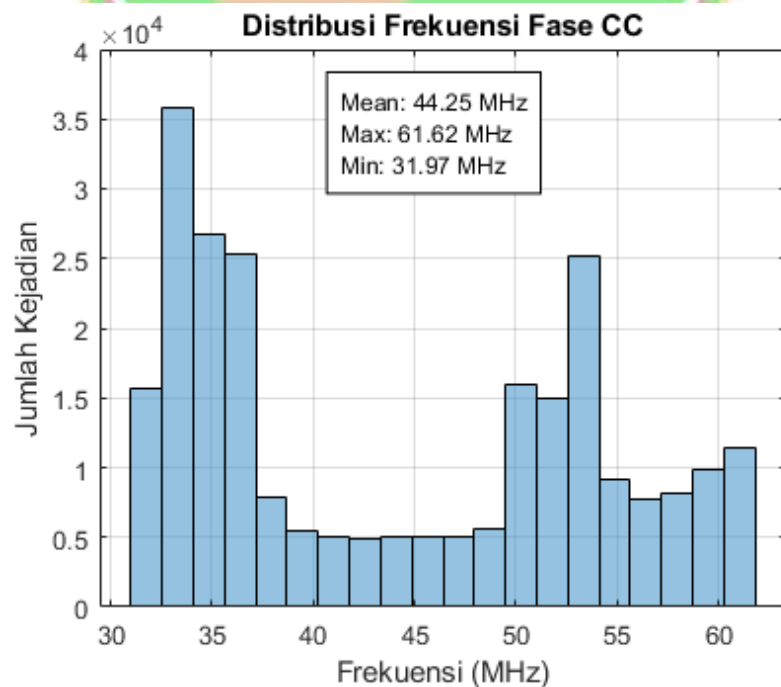
Gambar 4.11 Histogram distribusi frekuensi pada fase RS

Gambar 4.11 menunjukkan histogram distribusi *Instantaneous Frequency* (IF) pada fase *Return Stroke* (RS). Berdasarkan hasil analisis, distribusi frekuensi

pada fase ini berada pada rentang 30-31,70 MHz, dengan nilai rata-rata sebesar 30,52 MHz. Sebagian besar kejadian terkonsentrasi pada kisaran 30–30,20 MHz, yang ditunjukkan oleh tingginya jumlah kejadian pada interval frekuensi tersebut. Sementara itu, frekuensi di atas 30,20 MHz memiliki jumlah kejadian yang relatif lebih sedikit dan tersebar hingga mencapai 31,70 MHz. Pola distribusi ini menunjukkan bahwa fase *Return Stroke* memiliki rentang frekuensi yang relatif sempit dengan konsentrasi pada data sekitar 30 MHz, sehingga karakteristik spektral pada fase ini cenderung lebih stabil dibandingkan fase *Stepped Leader*. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa proses pelepasan muatan utama selama fase *Return Stroke* menghasilkan distribusi frekuensi yang lebih terpusat dan konsisten.

4.2.4 Continuing Current

Fase *continuing current* merupakan tahap yang terjadi setelah pelepasan muatan utama berlangsung, di mana saluran ionisasi yang telah terbentuk masih mempertahankan kemampuan konduktifnya sehingga perpindahan muatan listrik tetap dapat berlangsung. Pada fase ini, karakteristik sinyal menunjukkan perubahan yang relatif lebih stabil dibandingkan fase pelepasan utama, dengan amplitudo yang cenderung mengalami perubahan secara bertahap seiring berkurangnya intensitas aktivitas listrik pada saluran petir. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa proses transfer muatan belum sepenuhnya berhenti, melainkan masih berlangsung melalui kanal pelepasan yang telah terbentuk sebelumnya. Karakteristik fase ini dapat diamati pada Gambar 4.10 melalui pola perubahan amplitudo sinyal yang berlangsung lebih lambat dan kontinu setelah terjadinya pelepasan utama, yang mencerminkan keberlanjutan aliran muatan pada saluran petir.



Gambar 4.12 Histogram distribusi frekuensi pada fase CC

Gambar 4.12 menunjukkan histogram distribusi *Instantaneous Frequency* (IF) pada fase *Continuing Current* (CC). Berdasarkan hasil analisis, distribusi frekuensi pada fase ini berada pada rentang 31,97 MHz hingga 61,62 MHz, dengan nilai rata-rata sebesar 44,25 MHz. Sebagian besar kejadian terkonsentrasi pada rentang frekuensi 32–36 MHz, yang ditunjukkan oleh tingginya jumlah kejadian pada interval tersebut. Selain itu, terlihat adanya konsentrasi frekuensi lain pada kisaran 50–53 MHz, sedangkan frekuensi di atas 55 MHz memiliki jumlah kejadian yang relatif lebih sedikit dan tersebar hingga mencapai 61,62 MHz. Pola distribusi ini menunjukkan bahwa selama fase *Continuing Current* masih terdapat aktivitas radiasi elektromagnetik pada rentang frekuensi VHF, meskipun distribusi frekuensinya lebih menyebar dibandingkan pada fase *Return Stroke*. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pelepasan muatan masih berlangsung selama fase *Continuing Current* dengan karakteristik frekuensi yang lebih bervariasi.

Pada penelitian ini, analisis dilakukan terhadap petir negatif *cloud-to-ground*, dan pada penelitian yang dilakukan oleh Hazmi A., dkk [4] yang dilakukan di atas atap gedung Universitas Andalas, Padang, dekat garis khatulistiwa (0,98 LU) menggunakan *Discone antenna* dan *Slow Antenna*, yang berfokus pada petir *cloud-to-ground* positif dengan menggunakan metode STFT dengan *window* 100 μ s. Perbandingan dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Tabel Perbandingan Penelitian ini dengan petir -CG dan petir +CG pada penelitian lain menggunakan Metode STFT

Karakteristik Sinyal Petir	Penelitian	Metode	Banyak Data	Frekuensi (MHz)		
				min	max	mean
PB	Penelitian ini	<i>Continuous Wavelet Transform</i>	1	30.56	58.88	37.09
	Hazmi A., dkk	<i>Short-Time Fourier Transform</i>	7	24	52	39
SL	Penelitian ini	<i>Continuous Wavelet Transform</i>	1	30.28	75.50	45.27
RS	Penelitian ini	<i>Continuous Wavelet Transform</i>	1	30	31.70	30.52
SL – RS	Hazmi A., dkk	<i>Short-Time Fourier Transform</i>	7	30	50	39
CC	Penelitian ini	<i>Continuous Wavelet Transform</i>	1	31.97	61.62	44.25
	Hazmi A., dkk	<i>Short-Time Fourier Transform</i>	7	30	50	38

Tabel 4.1 menyajikan perbandingan karakteristik frekuensi sinyal VHF pada setiap fase petir antara penelitian ini dengan penelitian Hazmi A., dkk. Perbandingan dilakukan untuk mengevaluasi hasil analisis menggunakan metode *Continuous Wavelet Transform* (CWT) berbasis *Morlet Wavelet* terhadap metode *Short-Time Fourier Transform* (STFT). Penelitian ini menggunakan 1 data kejadian petir, sedangkan penelitian Hazmi A., dkk. menggunakan 7 data sebagai objek analisis.

Pada fase *Preliminary Breakdown* (PB), penelitian ini memperoleh frekuensi pada rentang 30,56–58,88 MHz dengan nilai rata-rata 37,09 MHz, sedangkan pada penelitian Hazmi A., dkk. memperoleh frekuensi pada rentang 24–52 MHz dengan rata-rata 39 MHz. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai rata-rata kedua penelitian relatif serupa, namun penelitian ini memiliki rentang frekuensi yang lebih luas. Pada fase *Stepped Leader* (SL), diperoleh frekuensi pada rentang 30,28–75,50 MHz dengan rata-rata 45,27 MHz. Hasil ini tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan penelitian Hazmi A., dkk. karena pada penelitian sebelumnya fase *Stepped Leader* dan *Return Stroke* dianalisis sebagai satu fase (SL–RS), sedangkan pada penelitian ini keduanya dipisahkan sehingga karakteristik frekuensi masing-masing fase dapat diamati secara lebih spesifik. Pada fase *Return Stroke* (RS), diperoleh frekuensi pada rentang 30–31,70 MHz dengan nilai rata-rata 30,52 MHz. Nilai ini lebih rendah dibandingkan hasil penelitian Hazmi A., dkk. pada fase SL–RS, yang memiliki rentang 30–50 MHz dengan rata-rata 39 MHz. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pemisahan fase menggunakan metode CWT mampu memberikan informasi frekuensi yang lebih spesifik pada setiap fase petir. Selanjutnya, pada fase *Continuing Current* (CC) diperoleh frekuensinya berada pada rentang 31,97–61,62 MHz dengan rata-rata 44,25 MHz, sedangkan penelitian Hazmi A., dkk. memperoleh hasil frekuensinya 30–50 MHz dengan rata-rata 38 MHz. Hasil ini menunjukkan bahwa fase *Continuing Current* pada penelitian ini masih memiliki aktivitas frekuensi VHF yang cukup signifikan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *Continuous Wavelet Transform* (CWT) mampu memberikan representasi waktu-frekuensi yang lebih rinci dibandingkan metode *Short-Time Fourier Transform* (STFT). Hal ini terlihat dari kemampuan CWT dalam memisahkan karakteristik frekuensi pada setiap fase petir, sehingga analisis sinyal VHF yang bersifat non-stasioner dapat dilakukan dengan lebih spesifik dan akurat.

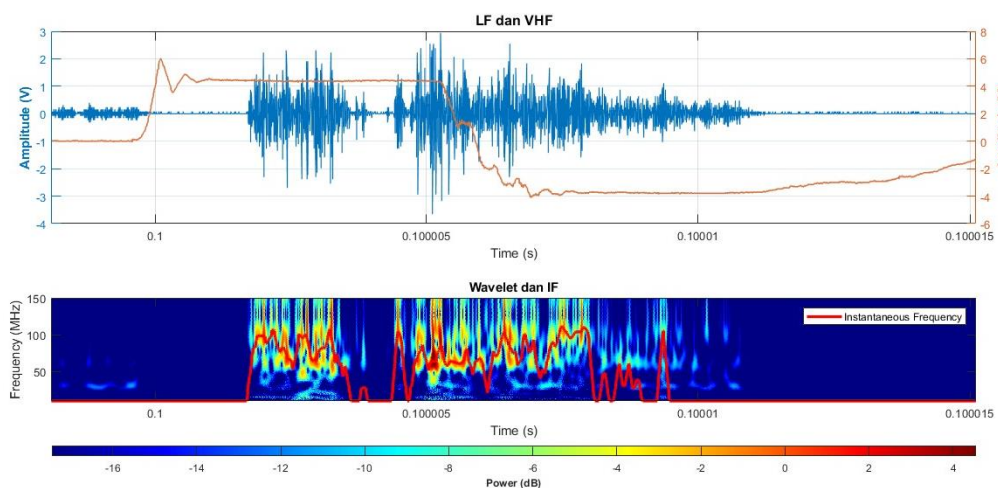
4.3 Analisis Data Compact Intracloud Discharge (CID) Sebagai Data Pelengkap

Selain data petir awan ke tanah bermuatan negatif (-CG) yang menjadi fokus utama penelitian ini, turut dianalisis sembilan data kejadian *Compact Intracloud Discharge* (CID) yang diperoleh dari sistem akuisisi data yang sama. *Compact Intracloud Discharge* (CID) merupakan salah satu jenis pelepasan muatan yang

terjadi di dalam awan (*intracloud*) dengan karakteristik berupa satu pulsa pelepasan yang berlangsung sangat singkat dan memiliki amplitudo yang tinggi. Berbeda dengan petir -CG, yang mengalami tahapan pelepasan muatan secara berurutan, meliputi *Preliminary Breakdown* (PB), *Stepped Leader* (SL), *Return Stroke* (RS), dan *Continuing Current* (CC), pelepasan muatan pada CID tidak melibatkan pembentukan kanal menuju permukaan bumi sehingga tidak memiliki fase-fase pelepasan yang serupa. Oleh karena itu, karakteristik sinyal CID umumnya diidentifikasi berdasarkan bentuk pulsa bipolar pada sinyal medan listrik serta distribusi frekuensinya secara keseluruhan, tanpa dilakukan pemisahan ke dalam fase-fase pelepasan sebagaimana pada petir -CG.

Dalam penelitian ini, data CID digunakan sebagai data pendukung untuk melengkapi analisis karakteristik sinyal VHF menggunakan metode *Continuous Wavelet Transform* (CWT) berbasis *Morlet Wavelet*. Analisis terhadap data CID difokuskan pada karakteristik waktu-frekuensi sinyal secara umum guna memberikan gambaran tambahan mengenai kemampuan metode CWT dalam merepresentasikan sinyal petir yang bersifat non-stasioner. Dengan demikian, data CID tidak digunakan sebagai dasar dalam menjawab rumusan masalah maupun mencapai tujuan penelitian, karena fokus utama penelitian tetap diarahkan pada analisis karakteristik sinyal petir awan ke tanah bermuatan negatif (-CG).

Gambar 4.13 menampilkan salah satu contoh hasil pengolahan data CID, berupa bentuk gelombang medan listrik LF dan VHF pada domain waktu beserta representasi *wavelet* dan *Instantaneous Frequency* (IF).

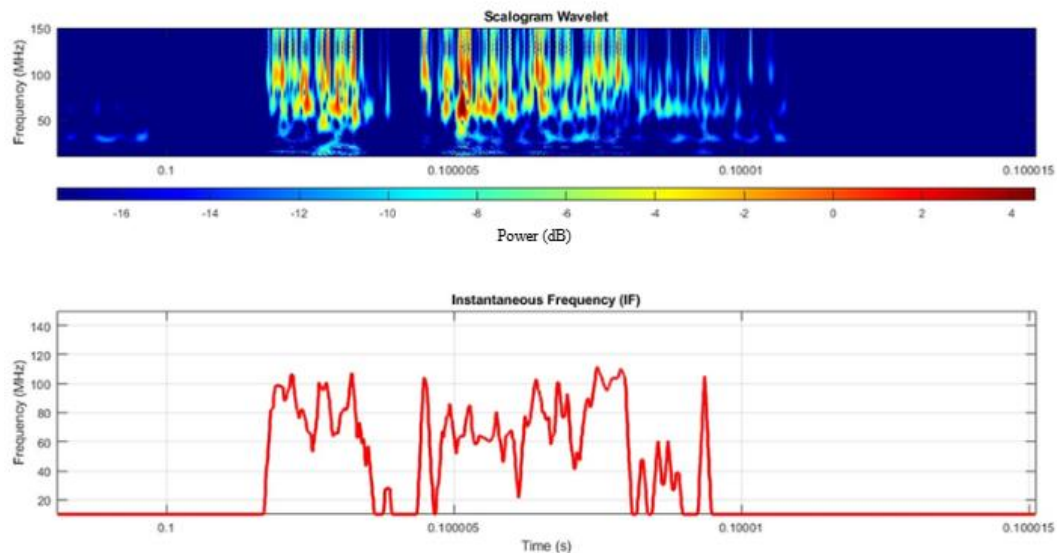


Gambar 4.13 Bentuk Sinyal LF dan VHF beserta *Wavelet* dan *Instantaneous Frequency* (IF) petir CID pada 6 Desember 2025

Berdasarkan Gambar 4.13, terlihat bahwa sinyal VHF pada kejadian CID muncul dalam bentuk rangkaian pulsa singkat yang berlangsung dalam durasi yang sangat pendek (dalam orde puluhan mikrodetik), tanpa disertai perubahan amplitudo bertahap pada sinyal LF sebagaimana yang teramati pada fase-fase petir -CG. Representasi *wavelet* dan IF menunjukkan bahwa energi sinyal terkonsentrasi

pada rentang frekuensi yang cukup tinggi, dengan *Instantaneous Frequency* yang berfluktuasi tajam antara sekitar 30 MHz hingga 110 MHz dalam rentang waktu yang sangat singkat.

Untuk memperjelas distribusi energi pada rentang waktu pengamatan yang lebih sempit, Gambar 4.14 menampilkan scalogram wavelet beserta grafik *Instantaneous Frequency* dari kejadian CID yang sama.



Gambar 4.14 *Scalogram Wavelet* dan *Instantaneous Frequency* (IF) petir CID pada 6 Desember 2025

Berdasarkan hasil analisis *Continuous Wavelet Transform* (CWT) pada Gambar 4.14, konsentrasi energi hanya muncul pada interval waktu sekitar 0,100003s hingga 0,100010s, yang ditunjukkan oleh dominasi warna hijau, kuning, hingga merah pada *scalogram*, merepresentasikan nilai magnitudo yang lebih tinggi pada skala dB. Sebaliknya, pada interval sebelum dan sesudah rentang waktu tersebut, energi sinyal relatif rendah yang ditandai dengan nilai dB yang lebih kecil, ditunjukkan oleh dominasi warna biru. Hal ini mengindikasikan bahwa aktivitas pelepasan muatan hanya terjadi pada interval waktu tertentu, sedangkan di luar interval tersebut tidak terdapat aktivitas VHF yang signifikan.

Grafik *Instantaneous Frequency* (IF) pada bagian bawah menunjukkan perubahan frekuensi dominan yang berlangsung secara dinamis selama interval pelepasan muatan. Grafik IF menunjukkan frekuensi dominan berada pada 30MHz hingga 110 MHz, sedangkan komponen frekuensi di bawah 30 MHz dikategorikan sebagai noise sehingga tidak dianalisis, dengan beberapa puncak frekuensi yang muncul secara berulang. Fluktuasi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik spektral sinyal berubah dengan cepat seiring berlangsungnya proses pelepasan muatan, yang merupakan salah satu ciri sinyal petir yang bersifat non-stasioner.

Kesesuaian antara hasil *scalogram* dan grafik IF terlihat dari munculnya nilai frekuensi instan hanya pada saat terdapat konsentrasi energi pada *scalogram*. Ketika distribusi energi meningkat, grafik IF memperlihatkan kenaikan frekuensi

dominan, sedangkan pada interval yang didominasi warna biru, nilai IF kembali mendekati nol karena tidak terdapat komponen frekuensi yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa hasil analisis *Instantaneous Frequency* mampu merepresentasikan perubahan frekuensi dominan yang sejalan dengan distribusi energi yang diperoleh dari transformasi *wavelet*.

Secara keseluruhan, hasil pada Gambar 4.14 menunjukkan bahwa *Continuous Wavelet Transform* (CWT) berbasis *Morlet Wavelet* mampu menggambarkan karakteristik waktu-frekuensi sinyal VHF secara jelas. Melalui representasi *scalogram* dan *Instantaneous Frequency*, perubahan distribusi energi serta variasi frekuensi dominan dapat diamati secara bersamaan, sehingga memudahkan identifikasi karakteristik sinyal petir yang bersifat non-stasioner.

Perbandingan awal ini menunjukkan bahwa metode *Instantaneous Frequency* berbasis CWT dapat diterapkan secara konsisten pada berbagai jenis pelepasan muatan petir. Dengan cara pengolahan dan analisis data yang sama pada table 4.2, dimana dari 9 kejadian petir yang telah direkam dapat dilihat nilai dari masing masing nilai maximum, minimum, dan rata-rata frekuensi sinyal VHF dari petir.

Tabel 4.2 Hasil pengolahan gelombang sinyal VHF dari 9 data petir CID dengan *Sample Rate* 250MS/s

Waktu Perekaman Data	Amplitudo Puncak LF (V)	Parameter <i>Instantaneous Frequency</i> (IF)		
		Min	Max	Mean
06-12-2025 (795)	6.0042	30 MHz	111.9 MHz	46.6 MHz
06-12-2025 (796)	5.6884	30 MHz	107.9 MHz	44.6 MHz
19-04-2025 (797)	5.7674	30 MHz	111.8 MHz	50.6 MHz
06-12-2025 (799)	4.7404	30 MHz	110.5 MHz	61.5 MHz
06-12-2025 (814)	4.5823	30 MHz	112.0 MHz	40.2 MHz
06-12-2025 (845)	4.0293	30 MHz	106.4 MHz	56.7 MHz
30-04-2025 (263)	3.0020	30 MHz	115.32 MHz	49.95 MHz
30-04-2025 (264)	6.7154	30 MHz	88.0 MHz	34.5 MHz
01-05-2025 (266)	3.2391	30 MHz	115.33 MHz	54.64 MHz

Tabel 4.2 menyajikan hasil pengolahan sinyal VHF dari sepuluh kejadian petir yang digunakan dalam penelitian ini. Data tersebut terdiri atas 9 kejadian *Compact Intracloud Discharge* (CID) sebagai data pendukung untuk satu kejadian petir awan ke tanah bermuatan negatif (-CG) sebagai objek utama penelitian.

Seluruh data direkam menggunakan sistem akuisisi dengan *sampling rate* sebesar 250 MS/s. Pada tabel ditampilkan nilai amplitudo puncak sinyal LF serta karakteristik frekuensi sinyal VHF yang diperoleh melalui analisis *Continuous Wavelet Transform* (CWT) berbasis *Morlet Wavelet* dan parameter *Instantaneous Frequency* (IF). Parameter yang dianalisis meliputi nilai minimum, maksimum, dan rata-rata dari setiap kejadian petir.

Berdasarkan hasil pengolahan data, amplitudo puncak sinyal LF menunjukkan variasi yang cukup signifikan, yaitu berkisar antara 3,0020 V hingga 6,7154 V. Variasi amplitudo tersebut menunjukkan bahwa setiap kejadian petir memiliki intensitas perubahan medan listrik yang berbeda-beda. Nilai amplitudo tertinggi diperoleh pada data 30-04-2025 (264) sebesar 6,7154 V, sedangkan amplitudo terendah diperoleh pada data 30-04-2025 (263) sebesar 3,0020 V.

Karakteristik frekuensi hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh data memiliki frekuensi minimum yang relatif seragam, yaitu sebesar 30,0 MHz. Sementara itu, frekuensi maksimum tertinggi dari 9 data CID diperoleh pada data 01-05-2025 (266) sebesar 115,33 MHz, dengan nilai rata-rata 54,64 MHz, dan frekuensi dengan nilai maksimum terendah dari 9 data CID diperoleh pada data 30-04-2025 (264) sebesar 88 MHz, dengan nilai rata-rata 34,5 MHz. Perbedaan nilai frekuensi maksimum dan rata-rata pada setiap data menunjukkan bahwa karakteristik spektral sinyal VHF berbeda pada masing-masing kejadian petir. Variasi tersebut dipengaruhi oleh perbedaan proses pelepasan muatan yang terjadi, sehingga distribusi energi sinyal terhadap frekuensi juga tidak sama.

