

Penerapan Welch Power Spectral Density untuk Menilai Aktivitas Listrik Lambung terhadap Stimulasi Air Bersoda

Basitha Febrinda Hidayatulail ^{1*}, Elta Sonalitha ², Rizki Putri Intan Hafsari ³ dan Ananda Yoga Prasetya ⁴

¹ Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang; email : basitha@unmer.ac.id

² Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang; email : elta@unmer.ac.id

³ Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang; email: rizkiputrihafsari@gmail.com

⁴ Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang; email: anandayoga.prast22@gmail.com

* Penulis : Basitha Febrinda Hidayatulail

Abstract: This study examines gastric slow-wave activity as recorded through electrogastrography (EGG), a non-invasive method for assessing gastric electrical rhythms that reflect underlying motility. Despite growing interest in understanding physiological responses to luminal stimuli, the specific spectral effects of carbonated water on Electrical Control Activity (ECA) remain underexplored, creating a gap in objective measurements of slow-wave modulation. The aim of this research is to evaluate how carbonated water influences dominant slow-wave frequency, power, and normogastric stability using a robust spectral estimation technique. A quasi-experimental pre-post design was conducted with ten healthy participants whose EGG signals were recorded across fasting, postprandial 1, and postprandial 2 phases. Signals underwent Butterworth filtering, Savitzky-Golay smoothing, and zero-phase processing before Welch Power Spectral Density (PSD) was applied to extract Dominant Frequency (DF), Dominant Power (DP), and Percent Normogastric Distribution (PND). Results showed a significant reduction in DF from fasting (0.049–0.050 Hz) to postprandial 1 (0.043–0.045 Hz, $p < 0.05$), while PND consistently declined across channels (fasting \approx 63–65% vs. postprandial 1 \approx 60–61% and postprandial 2 \approx 62–63%, $p < 0.05$). DP exhibited an increasing trend, though only Channel 2 reached significance ($p < 0.05$). These findings indicate that carbonated water induces short-term modulation of slow-wave rhythmicity and redistributes spectral power away from the physiological 2–4 cpm band. In conclusion, carbonated water produces measurable alterations in gastric slow-wave activity, and Welch PSD proves effective for detecting subtle spectral changes in low-amplitude physiological signals.

Keywords: Welch Power Spectral Density (PSD); electrogastrography (EGG); Electrical Control Activity (ECA); Percent Normogastric Distribution (PND); Gastric

Abstrak: Penelitian ini mengkaji aktivitas gelombang lambat yang direkam melalui electrogastrography (EGG), sebuah metode non-invasif untuk mengevaluasi ritme listrik lambung yang merefleksikan motilitas fisiologis. Meskipun minat terhadap respons lambung terhadap stimulasi intraluminal semakin meningkat, pengaruh air berkarbonasi terhadap parameter spektral Electrical Control Activity (ECA) masih belum banyak dibuktikan secara objektif, sehingga menimbulkan kesenjangan penelitian. Tujuan studi ini adalah menilai bagaimana air berkarbonasi memodulasi frekuensi dominan, daya dominan, dan stabilitas normogastrik menggunakan teknik estimasi spektral yang andal. Desain penelitian pre-post melibatkan sepuluh partisipan sehat yang menjalani perekaman EGG pada fase puasa, postprandial 1, dan postprandial 2. Sinyal diproses menggunakan penyaringan Butterworth, perataan Savitzky-Golay, dan zero-phase filtering sebelum dianalisis menggunakan Welch Power Spectral Density (PSD) untuk mendapatkan Dominant Frequency (DF), Dominant Power (DP), dan Persentase Distribusi Normogastrik (PDN). Hasil menunjukkan penurunan signifikan DF dari puasa (0.049–0.050 Hz) ke postprandial 1 (0.043–0.045 Hz, $p < 0.05$), serta penurunan konsisten PDN dari \approx 63–65% menjadi \approx 60–61% dan \approx 62–63% pada fase berikutnya ($p < 0.05$). DP menunjukkan kecenderungan meningkat, meskipun hanya Kanal 2 yang signifikan ($p < 0.05$). Temuan ini menunjukkan bahwa air berkarbonasi memicu modulasi jangka pendek pada ritme gelombang lambat dan menggeser distribusi daya dari rentang fisiologis 2–4 cpm. Secara keseluruhan, air berkarbonasi menghasilkan perubahan terukur pada aktivitas listrik lambung, dan Welch PSD terbukti efektif mendeteksi perubahan spektral halus pada sinyal fisiologis beramplitudo rendah.

Kata kunci: Welch Power Spectral Density (PSD); electrogastrography (EGG); Electrical Control Activity (ECA); Percent Normogastric Distribution (PND); Lambung.

Diterima: Oktober 20, 2025

Direvisi: Oktober 28, 2025

Diterima: Oktober 29, 2025

Diterbitkan: November 27, 2025

Versi sekarang: November 27, 2025



Hak cipta: © 2025 oleh penulis.

Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka
berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons

Attribution (CC BY SA) (

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Gangguan saluran cerna merupakan salah satu masalah kesehatan global yang berdampak luas terhadap kualitas hidup, produktivitas, hingga beban ekonomi masyarakat. Berbagai studi epidemiologis menunjukkan bahwa gejala seperti kembung, rasa penuh, dispepsia, dan ketidaknyamanan lambung semakin meningkat seiring perubahan pola makan, gaya hidup, serta konsumsi makanan dan minuman modern[1]. Kondisi ini mendorong pentingnya pengembangan metode evaluasi fungsi lambung yang tidak hanya akurat, tetapi juga aman, non-invasif, dan dapat diterapkan secara luas pada populasi umum[2].

Secara fisiologis, motilitas gastrointestinal dikendalikan oleh aktivitas otot polos yang menghasilkan sinyal listrik ritmis yang dikenal sebagai *Gastric Electrical Activity* (GEA)[3]. Aktivitas ini terdiri dari dua komponen utama: *Electrical Control Activity* (ECA) atau gelombang lambat, dan *Electrical Response Activity* (ERA) atau aktivitas lonjakan. ECA mengatur ritme dasar kontraksi lambung pada kisaran 2–4 siklus per menit, sedangkan ERA merupakan komponen listrik yang berkaitan erat dengan kontraksi mekanis dan aktivitas motilitas aktual. Meskipun peran ECA telah banyak diteliti, kajian terhadap ERA masih terbatas, bahkan pada beberapa penelitian komponen ini sering diabaikan meski memiliki keterkaitan erat dengan kontraksi lambung dan proses pencernaan[4].

Seiring perkembangan teknologi biomedis, *Electrogastrography* (EGG) muncul sebagai teknik non-invasif yang mampu merekam aktivitas listrik lambung melalui elektroda permukaan[5]. Metode ini menjadi alternatif ekonomis dan praktis dibanding instrumen lain seperti *Magnetogastrography* (MGG), namun tetap mampu memberikan informasi penting mengenai dinamika ECA dan ERA. Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai pendekatan analisis sinyal—termasuk transformasi Fourier dan analisis densitas spektral—digunakan untuk mengekstraksi parameter dominan seperti frekuensi, kekuatan sinyal, dan distribusi daya[6].

Di sisi lain, minuman berkarbonasi seperti air bersoda semakin banyak digunakan baik dalam konteks konsumsi sehari-hari maupun sebagai bagian dari intervensi gastrointestinal. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa air berkarbonasi dapat memengaruhi rasa kenyang, tekanan intraluminal, dan motilitas lambung[7]. Penelitian sebelumnya juga melaporkan bahwa konsumsi air bersoda dapat meningkatkan aktivitas ECA, namun informasi mengenai bagaimana stimulasi ini memengaruhi ERA masih sangat terbatas[8]. Fakta ini menandakan adanya celah pengetahuan (research gap) yang perlu dievaluasi lebih mendalam, khususnya menggunakan pendekatan analisis sinyal yang lebih sensitif terhadap perubahan aktivitas listrik lambung.

Salah satu teknik analisis sinyal yang banyak digunakan dalam kajian fisiologis adalah *Welch Power Spectral Density (PSD)*[9]. Metode ini mampu menghasilkan estimasi spektrum yang lebih halus dengan variansi yang lebih rendah, sehingga sensitif dalam mendekripsi perubahan kecil pada distribusi daya sinyal, baik pada rentang ECA maupun ERA. Namun, penerapan Welch PSD untuk mengevaluasi respons lambung terhadap stimulasi air bersoda belum banyak dilaporkan dalam literatur, terutama pada kondisi perbandingan antara fase puasa dan postprandial[9].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menilai efek stimulasi air bersoda terhadap aktivitas listrik lambung dengan menerapkan metode Welch Power Spectral Density pada sinyal EGG. Penelitian ini menitikberatkan pada analisis perubahan parameter spektral ECA dan ERA pada berbagai kondisi fisiologis, sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai respons motilitas lambung terhadap stimulasi karbonasi. Temuan ini diharapkan dapat membuka peluang pemanfaatan ERA sebagai indikator tambahan dalam evaluasi non-invasif fungsi gastrointestinal.

2. Tinjauan Literatur

2.1. Aktivitas Listrik Lambung (GEA)

Aktivitas otot polos lambung dikendalikan oleh sinyal listrik ritmis yang disebut *Gastric Electrical Activity* (GEA)[10]. GEA terbentuk oleh sel pacemaker lambung, yaitu Interstitial Cajal Cells (ICCs), yang menghasilkan arus listrik spontan dan berperan dalam pengaturan kontraksi serta motilitas lambung. Secara fundamental, GEA terdiri dari dua komponen utama:

1. *Electrical Control Activity* (ECA) atau gelombang lambat (slow waves), dan
2. *Electrical Response Activity* (ERA) atau lonjakan potensial (spike potentials)

ECA berperan sebagai pengontrol irama dasar kontraksi lambung serta menentukan frekuensi maksimum kontraksi[11]. Pada individu sehat, frekuensi ECA berada pada rentang 2–4 cycles per minute (cpm) dan biasanya meningkat amplitudonya setelah makan (postprandial) Sebaliknya, ERA muncul ketika amplitudo ECA mencapai ambang tertentu dan berasosiasi langsung dengan kontraksi mekanik lambung, sehingga dianggap sebagai refleksi motilitas yang lebih nyata.

2.2 Electrogastrography (EGG)

Electrogastrography (EGG) merupakan teknik perekaman **non-invasif** yang murah dan praktis, menggunakan elektroda permukaan pada kulit abdomen untuk menangkap sinyal myoelektrik lambung[12]. EGG telah banyak digunakan untuk mengevaluasi aktivitas ECA, termasuk deteksi pola normogastria, bradigastria, dan tachigastria berdasarkan karakteristik dominan frekuensi sinyal.

Dibandingkan metode lain seperti **Magnetogastrography (MGG)** yang memerlukan instrumen SQUID berbasis medan magnet, EGG jauh lebih mudah diterapkan di lingkungan klinis maupun riset karena sifatnya portabel dan terjangkau[6]. Meski demikian, kemampuan EGG untuk menggambarkan ERA secara akurat masih menjadi tantangan, sehingga diperlukan pendekatan analisis sinyal yang lebih sensitif untuk mengekstraksi informasi ERA dari rekaman permukaan.

2.3 Welch Power Spectral Density

Metode ini pertama sekali dikemukakan oleh Welch (1967)[9]. Isyarat masukan dibagi menjadi segmen-segmen yang pendek dan perhitungan periodogram dilakukan berdasarkan perhitungan FFT, dengan demikian untuk mencari estimasi spektrum daya dapat dilakukan dengan perhitungan yang lebih efisien. Setiap segmen data dimodifikasi dengan mengalikan pada suatu fungsi jendela (window), sebelum dilakukan perhitungan periodogram[13]. Selanjutnya periodogram yang telah dimodifikasi ini dirata-ratakan dan akan menghasilkan estimasi spektrum yang lebih baik. Untuk metode Welch, PSD dihitung dengan Persamaan (1) mempertimbangkan nilai estimasi Periodogram nya.

$$\widehat{S_w}(e^{jw}) = \frac{1}{K} \sum_{p=0}^{k-1} \hat{S}_p e^{(jw)} \quad (1)$$

Pada penelitian EGG, spektrum daya umumnya dihitung menggunakan transformasi Fourier untuk memperoleh Power Spectral Density (PSD), lalu diturunkan parameter-parameter penting seperti:

Dominant Frequency (DF): puncak spektrum tertinggi pada rentang 1–10 cpm,

Dominant Power (DP): daya pada DF, dan

Rasio distribusi Normogastric: persentase daya normogastric/daya total ECA

Dengan karakter sinyal lambung yang rentan artefak gerakan dan fluktuasi biologis, Welch PSD memberi keunggulan dibanding estimasi spektrum konvensional satu-segmen.

2.4 Air Berkarbonasi dan Pengaruhnya terhadap Fungsi Lambung

Air berkarbonasi, atau yang dikenal sebagai air bersoda, merupakan minuman yang mengandung karbon dioksida (CO₂) terlarut sehingga menimbulkan sensasi gelembung khas saat dikonsumsi[14]. Secara fisiologis, konsumsi air berkarbonasi tidak hanya memberikan efek sensoris berupa rasa segar, tetapi juga dapat mempengaruhi sistem gastrointestinal, khususnya fungsi dan motilitas lambung. Sejumlah penelitian klinis dan fisiologis menunjukkan bahwa karbonasi memiliki dampak langsung maupun tidak langsung terhadap aktivitas listrik serta aktivitas kontraktile pada saluran cerna bagian atas[15].

Secara mekanis, ketika seseorang mengonsumsi air berkarbonasi, CO₂ terlarut dapat dilepaskan dalam lumen lambung dan meningkatkan tekanan intraluminal. Fenomena ini merangsang mekanoreseptor dinding lambung yang selanjutnya memicu respons motilitas. Aktivasi mekanoreseptor tersebut dapat meningkatkan frekuensi kontraksi atau memperbesar amplitudo kontraksi antral, tergantung pada kondisi fisiologis individu. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa air berkarbonasi dapat mempercepat rasa kenyang (*satiety*) akibat distensi lambung yang meningkat, sehingga sering digunakan dalam intervensi pengendalian nafsu makan[16].

Lebih jauh lagi, efek karbonasi juga dapat memengaruhi penyerapan obat di saluran cerna. Beberapa studi menunjukkan bahwa air berkarbonasi dapat mempercepat disolusi tablet tertentu dan memodifikasi distribusi intraluminal obat. Perubahan tekanan dan dinamika cairan di dalam lambung dapat menyebabkan perbedaan pola pengosongan lambung dan absorpsi obat di usus halus. Kondisi ini memberikan gambaran bahwa pengaruh air berkarbonasi tidak hanya terbatas pada aktivitas kontraktile atau elektrik, tetapi juga memiliki implikasi farmakokinetik.

Secara keseluruhan, air berkarbonasi memberikan pengaruh fisiologis yang cukup kompleks terhadap lambung, termasuk perubahan tekanan intraluminal, modifikasi aktivitas listrik, efek pada motilitas, pengaturan rasa kenyang, dan bahkan dinamika penyerapan obat. Dengan demikian, pemahaman mengenai pengaruh air berkarbonasi terhadap fungsi lambung penting dalam penelitian gastrointestinal, baik untuk tujuan diagnostik, klinis, maupun intervensi nutrisi.

2.5 Gap Penelitian dan Posisi Studi

Meskipun electrogastrography (EGG) telah lama digunakan sebagai metode non-invasif untuk memantau aktivitas listrik lambung, sebagian besar penelitian sebelumnya cenderung berfokus pada analisis *Electrical Control Activity* (ECA) yang terkait dengan ritme dasar gelombang lambat lambung. Penelitian mengenai *dominant frequency*, *dominant power*, dan distribusi normogastric telah mapan, namun pemahaman mengenai bagaimana rangsangan eksternal, termasuk konsumsi air berkarbonasi, mempengaruhi stabilitas ritmik lambung masih terbatas. Selain itu, penelitian terdahulu lebih banyak mengevaluasi perubahan subjektif seperti rasa kenyang daripada perubahan objektif pada parameter listrik lambung. Cela ini menunjukkan perlunya studi yang secara khusus mendokumentasikan pengaruh karbonasi terhadap dinamika ECA menggunakan pendekatan analisis sinyal yang lebih cermat.

Selain keterbatasan fokus pada ECA, metodologi analisis yang digunakan pada banyak studi sebelumnya sering kali belum mengoptimalkan teknik estimasi spektral yang mampu menangkap perubahan halus dalam dinamika sinyal lambung. Penggunaan transformasi Fourier konvensional tanpa segmentasi atau perataan spektrum dapat menghasilkan variansi estimasi yang tinggi, sehingga perubahan yang relatif kecil dalam frekuensi atau daya sinyal dapat terlewatkan. Dengan demikian, terdapat kebutuhan untuk menerapkan metode analisis yang lebih stabil seperti Welch Power Spectral Density, yang mampu menghasilkan spektrum yang lebih halus dan andal untuk mengevaluasi perubahan fisiologis minor, terutama pada rentang frekuensi rendah yang mendominasi sinyal lambung.

Posisi studi ini adalah untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menyediakan analisis terstruktur mengenai pengaruh konsumsi air bersoda terhadap aktivitas listrik lambung, khususnya melalui parameter-parameter utama ECA seperti *Dominant Frequency*, *Dominant Power*, dan *ECA Normogastric Distribution*. Dengan memanfaatkan metode Welch PSD dan protokol perekaman tiga fase (fasting, postprandial 1, postprandial 2), penelitian ini memberikan bukti objektif bahwa air berkarbonasi memodulasi aktivitas gelombang lambat lambung secara signifikan. Hal ini tidak hanya memperkuat pemahaman mengenai efek fisiologis karbonasi, tetapi juga menegaskan peran EGG sebagai alat diagnostik yang sensitif untuk mendeteksi perubahan motilitas lambung akibat stimulasi intraluminal.

3. Metode

Penelitian ini menggunakan desain eksperimental kuasi dengan pendekatan pre-post stimulation, yaitu membandingkan aktivitas listrik lambung antara kondisi puasa (fasting) dan dua fase postprandial setelah konsumsi air bersoda. Analisis dilakukan menggunakan metode Welch Power Spectral Density (PSD) untuk mengevaluasi perubahan parameter spektral pada rentang frekuensi ECA.

3.1. Partisipan dan Prosedur Eksperimen

Sebanyak sepuluh partisipan sehat (4 perempuan, 6 laki-laki) berusia rata-rata $26,3 \pm 2,3$ tahun direkrut dalam penelitian ini. Kriteria inklusi meliputi:

- tidak memiliki riwayat penyakit gastrointestinal kronis,
- tidak sedang mengonsumsi obat yang memengaruhi sistem pencernaan selama dua minggu terakhir,
- dalam kondisi sehat saat pengambilan data.

Setiap partisipan menjalani satu sesi perekaman EGG dengan tiga periode yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Selama proses perekaman:

- partisipan berada dalam posisi supine,
- diminta menghindari gerakan mendadak, berbicara, dan tertawa untuk meminimalisir artefak,
- kondisi lingkungan dijaga tenang dan terstandarisasi sesuai prosedur perekaman EGG



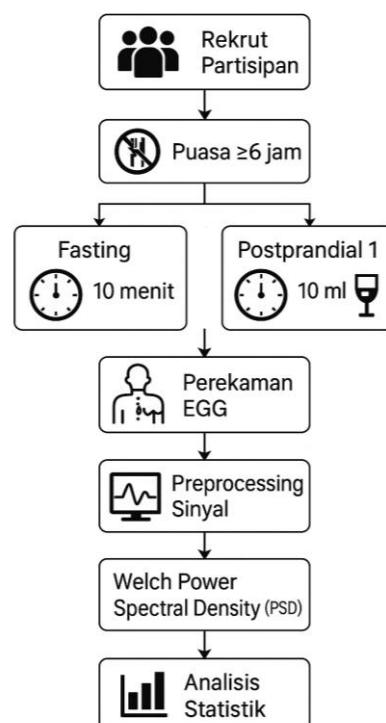
Gambar 1. Skema waktu perekaman.

3.2. Alat dan Perekaman Sinyal

Perekaman EGG menggunakan:

- BIOPAC MP150,
- modul EGG100C,
- perangkat lunak AcqKnowledge,
- konfigurasi tiga kanal unipolar,
- sampling rate 25 Hz.

Penempatan Elektroda Sesuai standar penelitian EGG, penempatan elektroda adalah satu elektroda umum (common electrode) di garis tengah antara sternum dan umbilikus, elektroda CH1, CH2, dan CH3 ditempatkan secara simetris dan berjarak 8 cm dari elektroda umum dengan sudut kemiringan tertentu, elektroda referensi ditempatkan pada iliac crest, sebagai jaringan tidak aktif secara elektrik[17].



Gambar 2. Diagram Alir Analisa Sinyal EGG

3.3. Pra-pemrosesan Sinyal (Preprocessing)

Pra-pemrosesan sinyal dilakukan untuk memastikan kualitas data EGG sebelum dianalisis menggunakan metode Welch PSD. Tahapan ini mencakup penerapan filter bandpass Butterworth orde 2 pada rentang 0.016–0.25 Hz untuk mengisolasi komponen ECA. Selain itu digunakan filter Savitzky–Golay orde 4 untuk mereduksi noise dan

memperhalus sinyal tanpa distorsi bentuk gelombang[17]. Seluruh proses pemfilteran diterapkan menggunakan zero-phase digital filtering agar tidak terjadi pergeseran fase yang dapat mengubah nilai frekuensi dominan sinyal.

3.4. Analisis Sinyal Menggunakan Welch Power Spectral Density

Analisis sinyal menggunakan Welch Power Spectral Density (PSD) dilakukan untuk memperoleh estimasi spektrum daya yang stabil dan sensitif terhadap perubahan frekuensi maupun amplitudo sinyal EGG. Metode Welch bekerja dengan membagi sinyal menjadi beberapa segmen yang saling tumpang tindih, kemudian menerapkan Fast Fourier Transform (FFT) pada setiap segmen sehingga menghasilkan spektrum yang lebih halus serta memiliki variansi lebih rendah dibandingkan estimasi spektral satu-segmen[12]. Hasil spektrum rata-rata dari seluruh segmen digunakan untuk menghitung parameter utama aktivitas listrik lambung, termasuk Dominant Frequency (DF), Dominant Power (DP), dan persentase Normogastric Distribution (PND) pada persamaan (1)[17]. Pendekatan ini sangat cocok untuk sinyal fisiologis beramplitudo kecil seperti EGG, karena mampu meredam fluktuasi dan artefak yang sering muncul akibat gerakan tubuh atau variabilitas biologis. Dengan demikian, Welch PSD memastikan bahwa perubahan kecil pada pola gelombang lambat lambung dapat terdeteksi secara akurat dan konsisten.

$$PND = \frac{Pn}{P_{ECA}} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana PND merupakan persentase Normogastric Distribution perbandingan antara distribusi Pn (normogastric 2-4 cpm) dengan P_{ECA} (sinyal ECA 1-10 cpm).

3.5. Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengevaluasi perbedaan parameter aktivitas listrik lambung antara kondisi fasting, postprandial 1, dan postprandial 2. Uji yang digunakan adalah paired-sample t-test, karena setiap partisipan diukur pada tiga kondisi berbeda sehingga analisis membutuhkan pembandingan within-subject. Nilai $p < 0.05$ dianggap menunjukkan perbedaan signifikan secara statistik. Analisis ini diterapkan pada parameter utama seperti Dominant Frequency (DF), Dominant Power (DP), dan Normogastric Distribution (PND). Pendekatan ini memastikan bahwa setiap perubahan yang terdeteksi benar-benar mencerminkan respons fisiologis akibat stimulasi air berkarbonasi.

4. Hasil dan Pembahasan

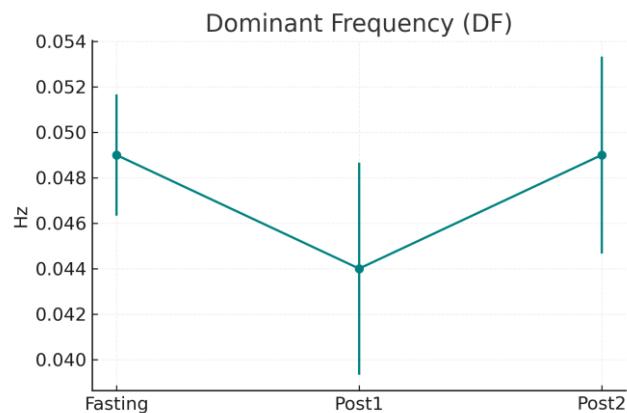
Bagian ini menyajikan hasil analisis aktivitas listrik lambung yang diperoleh dari rekaman electrogastrography (EGG) pada tiga kondisi, yaitu fasting, postprandial 1, dan postprandial 2, setelah stimulasi air berkarbonasi. Parameter utama yang dianalisis meliputi Dominant Frequency (DF), Dominant Power (DP), dan distribusi normogastrik (EPRN), yang dihitung menggunakan metode Welch Power Spectral Density (PSD) untuk memperoleh estimasi spektral yang stabil dan representatif. Hasil-hasil tersebut kemudian diinterpretasikan untuk memahami bagaimana konsumsi air berkarbonasi memengaruhi pola gelombang lambat lambung serta perubahan fisiologis terkait motilitas gastrointestinal. Pembahasan pada bagian ini diintegrasikan dengan temuan studi sebelumnya guna memperjelas posisi dan kontribusi penelitian.

4.1. Dominant Frequency (DF)

Dominant Frequency (DF) merupakan parameter utama dalam analisis electrogastrography (EGG) yang merepresentasikan ritme dasar aktivitas listrik lambung. Nilai DF mencerminkan frekuensi gelombang lambat atau slow waves yang dihasilkan oleh Interstitial Cells of Cajal (ICCs), sel pacemaker yang bertanggung jawab untuk mengatur irama kontraksi otot polos lambung. Pada kondisi fisiologis normal, DF berada pada rentang 2–4 cycles per minute (cpm) atau sekitar 0.033–0.066 Hz, yang disebut sebagai pola normogastria. DF menjadi indikator penting untuk mendeteksi apakah ritme dasar lambung berada dalam kondisi normal, mengalami percepatan (tachygastria), atau perlambatan (bradygastria). Dengan demikian, perubahan DF dapat memberikan gambaran mengenai kondisi motilitas lambung dan responsnya terhadap rangsangan intraluminal, baik dari makanan, minuman, maupun faktor fisiologis lainnya. Penilaian DF menggunakan analisis spektral berbasis Welch

Power Spectral Density (PSD) memungkinkan estimasi frekuensi yang lebih halus sehingga dapat menangkap perubahan kecil namun signifikan dalam pola gelombang lambat ini.

Pada Gambar 3 Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat perubahan jelas pada nilai Dominant Frequency (DF) setelah konsumsi air berkarbonasi. Pada kondisi fasting, DF berada pada kisaran 0.049–0.050 Hz, sesuai dengan karakteristik normogastria. Setelah konsumsi air bersoda, DF mengalami penurunan signifikan pada periode postprandial 1, yaitu mencapai nilai sekitar 0.043–0.045 Hz pada semua kanal EGG, dengan hasil uji statistik menunjukkan $p < 0.05$. Penurunan ini merupakan indikasi bahwa air berkarbonasi secara langsung memodulasi ritme dasar gelombang lambat lambung segera setelah masuk ke dalam saluran cerna. Namun, pada periode postprandial 2, DF kembali meningkat mendekati nilai fasting, yaitu sekitar 0.049 Hz, meskipun tidak menunjukkan perbedaan signifikan dibandingkan fase puasa. Pola ini menunjukkan bahwa efek air bersoda terhadap DF bersifat sementara dan terjadi terutama pada fase awal respons postprandial. Selain itu, dinamika penurunan pada awal kemudian pemulihannya pada fase berikutnya menunjukkan bahwa ritme lambung memiliki mekanisme penyesuaian yang cepat terhadap perubahan tekanan intraluminal yang disebabkan oleh CO_2 terlarut dalam air berkarbonasi.



Gambar 3. Mean Dominan Frekuensi (DF) pada seluruh partisipan.

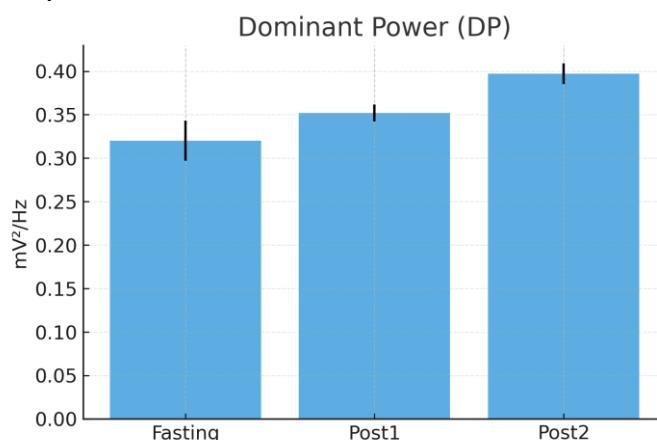
Temuan ini sejalan dengan teori fisiologi lambung yang menyatakan bahwa perubahan tekanan intraluminal dan distensi dinding lambung dapat memengaruhi aktivitas pacemaker ICCs dan pola gelombang lambat[18]. Penurunan DF pada fase postprandial awal mengindikasikan terjadinya modifikasi transien pada osilasi listrik lambung, yang secara fisiologis dapat disebabkan oleh respons adaptif terhadap masuknya cairan berkarbonasi yang meningkatkan peregangan dinding lambung. Hal ini sesuai dengan laporan bahwa modulasi ritme dasar dapat terjadi pada kondisi pencernaan aktif, terutama saat lambung berinteraksi dengan rangsangan kimia atau mekanis. Kembalinya DF mendekati nilai normal pada postprandial 2 menggambarkan bahwa sistem regulasi lambung kembali stabil setelah fase awal adaptasi berlalu. Dengan demikian, hasil penelitian memperkuat pemahaman bahwa meskipun air berkarbonasi dapat memengaruhi ritme dasar lambung, efek tersebut bersifat cepat, tidak mengganggu kestabilan jangka panjang, dan sesuai dengan mekanisme homeostasis fisiologis sistem gastrointestinal. Temuan ini menegaskan bahwa DF merupakan parameter sensitif untuk mendeteksi respons awal lambung terhadap stimulasi intraluminal, termasuk air berkarbonasi.

4.2. Dominant Power (DP)

Dominant Power (DP) merupakan parameter penting dalam analisis spektral electrogastrography (EGG) karena menggambarkan kekuatan atau amplitudo sinyal gelombang lambat lambung pada frekuensi dominannya. Jika Dominant Frequency (DF) menunjukkan ritme dasar aktivitas listrik lambung, maka DP mencerminkan seberapa kuat aktivitas gelombang tersebut diekspresikan oleh otot polos gastrointestinal. Secara fisiologis, peningkatan DP sering dihubungkan dengan peningkatan amplitudo kontraksi lambung, terutama setelah proses makan atau stimulasi intraluminal lainnya. Sebaliknya, penurunan DP dapat mengindikasikan berkurangnya aktivitas kontraktil atau adanya gangguan motilitas. DP menjadi relevan ketika menilai respons lambung terhadap variasi jenis makanan atau minuman, karena amplitudo gelombang lambat cenderung meningkat ketika lambung menerima beban mekanik atau kimia yang memerlukan adaptasi fungsi motoriknya. Dengan

menggunakan metode analisis Welch Power Spectral Density (PSD), DP dapat dihitung dengan lebih stabil dan akurat, karena teknik ini meredam noise dan fluktuasi yang sering muncul pada sinyal beramplitudo kecil seperti EGG.

Pada Gambar 4 menunjukkan perubahan pola Dominant Power setelah konsumsi air berkarbonasi, meskipun tidak semua perubahan bersifat signifikan secara statistik. Pada kondisi fasting, DP berada pada kisaran $0.290\text{--}0.358\text{ mV}^2/\text{Hz}$ pada ketiga kanal EGG. Setelah konsumsi air bersoda pada fase postprandial 1, DP mengalami peningkatan dengan nilai rata-rata $0.318\text{--}0.392\text{ mV}^2/\text{Hz}$, namun perubahan ini tidak menunjukkan signifikansi statistik pada sebagian besar kanal. Pada fase postprandial 2, DP kembali meningkat dengan kisaran $0.359\text{--}0.446\text{ mV}^2/\text{Hz}$, dan hanya kanal 2 yang menunjukkan perubahan signifikan dengan $p < 0.05$, sementara kanal lainnya tidak menunjukkan peningkatan bermakna. Pola ini mengindikasikan bahwa meskipun terdapat peningkatan amplitudo gelombang lambat setelah konsumsi air berkarbonasi, respons ECA tidak merata di seluruh kanal rekaman EGG. Hal ini dapat disebabkan oleh variasi posisi elektroda, sensitivitas kanal terhadap lokasi aktivitas listrik lambung, atau distribusi kontraktile lambung yang tidak seragam saat merespons stimulasi karbonasi. Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan DP setelah konsumsi air bersoda terjadi, namun manifestasinya lebih terbatas dibandingkan perubahan pada parameter lainnya.



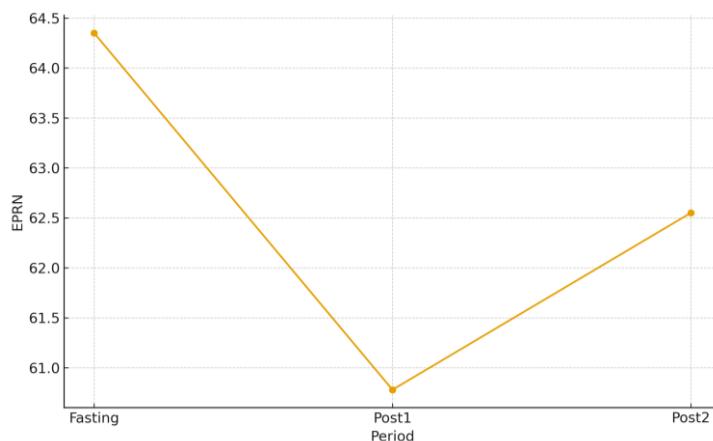
Gambar 4. Mean Dominan Power (DP) pada seluruh partisipan.

Jika dikaitkan dengan teori fisiologi lambung, perubahan Dominant Power yang meningkat setelah stimulasi air berkarbonasi sejalan dengan pemahaman bahwa amplitudo gelombang lambat akan meningkat ketika lambung mengalami distensi atau rangsangan kimia[19]. Air berkarbonasi diketahui meningkatkan tekanan intraluminal dan merangsang mekanoreseptor dinding lambung sehingga menghasilkan respons kontraktile yang lebih besar. Namun, fakta bahwa peningkatan DP dalam penelitian ini tidak seragam pada seluruh kanal, dan hanya satu kanal yang menunjukkan signifikansi statistik, dapat dijelaskan oleh teori bahwa amplitudo gelombang lambat sangat dipengaruhi oleh lokasi aktivitas motorik yang dominan pada suatu waktu serta distribusi spasial sinyal listrik lambung. Selain itu, variasi individual dalam sensitivitas terhadap karbonasi dan dinamika adaptasi lambung dapat berkontribusi pada perbedaan respons. Dengan demikian, hasil penelitian ini konsisten dengan teori fisiologis bahwa minuman berkarbonasi meningkatkan aktivitas motorik lambung, namun efek tersebut lebih bersifat lokal dan tidak seterstruktur respons peningkatan frekuensi. Temuan ini menegaskan bahwa DP tetap merupakan parameter penting untuk menilai kekuatan aktivitas elektrik lambung, meskipun sensitivitasnya terhadap stimulasi air berkarbonasi tidak sekuat parameter frekuensi.

4.2. ECA Normogastric Distribution (PDN)

ECA Normogastric Distribution, yang dalam penelitian ini dinyatakan sebagai PDN (Presentase Distribusi Normogastria), merupakan parameter penting untuk menggambarkan proporsi daya sinyal gelombang lambat lambung dalam rentang frekuensi fisiologis 2–4 cycles per minute (cpm). Rentang ini disebut normogastria, yang mencerminkan ritme dasar lambung yang normal dan stabil, dikendalikan oleh aktivitas pacemaker Interstitial Cells of Cajal (ICCs). Dengan menghitung persentase daya dalam rentang normogastrik dibandingkan total daya ECA (1–10 cpm), peneliti dapat menilai apakah aktivitas gelombang lambat

dominan berada dalam pola fisiologis, atau mengalami deviasi ke pola bradygastria (lebih lambat) atau tachygastria (lebih cepat). Parameter ini sangat sensitif terhadap kondisi fisiologis lambung, seperti fase makan, distensi, dan stimulasi kimia, sehingga sering digunakan untuk memantau kestabilan ritme dasar lambung pada berbagai kondisi klinis maupun eksperimen. Distribusi normogastric yang tinggi menunjukkan kestabilan ritme lambung, sedangkan penurunan nilai ini dapat mengindikasikan gangguan atau modulasi aktivitas lambung.



Gambar 5. Mean PDN pada seluruh partisipan.

Pada Gambar 5. nilai PDN menunjukkan pola penurunan konsisten pada kedua fase postprandial setelah konsumsi air berkarbonasi. Pada fase fasting, nilai PDN berada pada kisaran 63–65%, kemudian turun menjadi 60–61% pada postprandial 1, dan tetap berada pada kisaran 62–63% pada postprandial 2. Penurunan ini terbukti signifikan secara statistik ($p < 0.05$) pada seluruh kanal EGG. Penurunan distribusi normogastric ini menunjukkan bahwa sebagian daya spektral bergeser keluar dari rentang 2–4 cpm akibat stimulasi intraluminal air berkarbonasi. Secara fisiologis, fenomena ini konsisten dengan teori bahwa distensi lambung yang dihasilkan oleh pelepasan CO_2 dapat memodulasi aktivitas gelombang lambat dan mengganggu kestabilan ritme dasar secara sementara[20]. Modifikasi ini dapat mencerminkan adaptasi awal terhadap perubahan tekanan dan peregangan dinding lambung sebelum ritme kembali stabil pada fase postprandial selanjutnya.

4.2. Implikasi Analisis EGG

Penggunaan Welch Power Spectral Density (PSD) pada analisis electrogastrography (EGG) memberikan keunggulan metodologis yang signifikan dibandingkan pendekatan spektral berbasis Fast Fourier Transform (FFT) tunggal[9]. Welch PSD membagi sinyal menjadi beberapa segmen yang saling tumpang tindih sehingga memungkinkan perataan spektrum yang lebih baik, stabil, dan tahan terhadap noise. Sinyal EGG dikenal beramplitudo rendah dan rentan terhadap artefak seperti gerakan tubuh, aktivitas pernapasan, serta variabilitas biologis[17]. Dengan demikian, kemampuan Welch PSD dalam menurunkan variansi estimasi dan menampilkan spektrum yang lebih halus menjadikannya metode yang sangat relevan untuk menganalisis sinyal fisiologis lambung.

Pada penelitian ini, penggunaan Welch PSD memungkinkan deteksi perubahan kecil yang tidak selalu tampak pada visualisasi sinyal mentah. Misalnya, penurunan DF pada postprandial 1, peningkatan DP pada beberapa kanal, serta penurunan PDN yang konsisten dapat diidentifikasi dengan lebih jelas berkat kestabilan spektral yang diberikan metode ini. Keakuratan yang lebih tinggi dalam penentuan puncak spektral memastikan bahwa variasi ritme lambung akibat stimulasi air berkarbonasi dapat ditangkap secara objektif dan terukur.

Penggunaan Welch Power Spectral Density dalam penelitian ini terbukti meningkatkan ketepatan analisis EGG, memungkinkan identifikasi penurunan signifikan DF, penurunan stabil PDN, serta peningkatan DP pada beberapa kanal, sehingga memperjelas bahwa stimulasi air berkarbonasi memodulasi aktivitas gelombang lambat lambung secara terukur dan signifikan.

5. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan menilai pengaruh stimulasi air bersoda terhadap aktivitas listrik lambung melalui pendekatan Welch Power Spectral Density (PSD) pada sinyal electrogastrography (EGG). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsumsi air bersoda memberikan dampak yang jelas terhadap pola gelombang lambat lambung (*Electrical Control Activity*, ECA) yang merupakan penentu ritme dasar motilitas gastrointestinal.

Analisis menunjukkan adanya penurunan *Dominant Frequency* (DF) pada fase postprandial awal, yang mengindikasikan perubahan sementara pada irama dasar aktivitas listrik lambung setelah ingestasi air bersoda. Selain itu, distribusi normogastrik (PDN) mengalami penurunan konsisten pada periode postprandial, mencerminkan pergeseran daya spektral dari rentang fisiologis 2–4 cpm. Meskipun *Dominant Power* (DP) menunjukkan kecenderungan meningkat setelah konsumsi air bersoda, hanya sebagian kanal EGG yang menunjukkan perbedaan bermakna, sehingga respons amplitudo ECA terhadap karbonasi bersifat moderat.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa stimulasi air bersoda memengaruhi stabilitas dan distribusi daya gelombang lambat lambung, dengan temuan signifikan berupa penurunan DF dan penurunan PDN pada fase postprandial ($p < 0.05$) yang mencerminkan adanya modulasi irama dasar aktivitas listrik lambung setelah konsumsi air bersoda.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terimakasih kepada Universitas Merdeka Malang beserta staf Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik yang telah memberikan dukungannya dalam pelaksanaan penelitian ini.

Referensi

- [1] C. Varghese et al., “Clinical associations of functional dyspepsia with gastric dysrhythmia on electrogastrography: a comprehensive systematic review and meta-analysis,” *Neurogastroenterology & Motility*, vol. 33, no. 12, p. e14151, 2021.
- [2] A. Fikree and P. Byrne, “Management of functional gastrointestinal disorders,” *Clinical Medicine*, vol. 21, no. 1, pp. 44–52, 2021.
- [3] D. Oczka, M. Augustynek, M. Penhaker, and J. Kubicek, “Electrogastrography measurement systems and analysis methods used in clinical practice and research: comprehensive review,” *Front Med (Lausanne)*, vol. 11, p. 1369753, 2024.
- [4] J. J. Peralta-Palmezano, D. P. Escobar-Serna, F. J. Peralta-Palmezano, N. R. Acosta-Murillo, and R. Guerrero-Lozano, “Electrogastrography in Adult Gastroparesis: A Systematic Review and Meta-Analysis,” *Dig Dis Sci*, vol. 70, no. 1, pp. 298–315, 2025.
- [5] G. Schamberg et al., “Comparison of Gastric Alimetry® body surface gastric mapping versus electrogastrography spectral analysis,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, p. 14987, 2023.
- [6] C. E. Eichler, L. K. Cheng, N. Paskaranandavadiel, P. Du, L. A. Bradshaw, and R. Avci, “Effects of magnetogastrography sensor configurations in tracking slow wave propagation,” *Comput Biol Med*, vol. 129, p. 104169, 2021.
- [7] R. Cuomo et al., “Effects of carbonated water on functional dyspepsia and constipation,” *Eur J Gastroenterol Hepatol*, vol. 14, no. 9, pp. 991–999, 2002.
- [8] C. Takeuchi et al., “Effects of carbonation and temperature on voluntary swallowing in healthy humans,” *Dysphagia*, vol. 36, no. 3, pp. 384–392, 2021.
- [9] M. Melinda, I. K. A. Enriko, M. Furqan, M. Irhamsyah, Y. Yunidar, and N. Basir, “The effect of power spectral density on the electroencephalography of autistic children based on the welch periodogram method,” *Jurnal Infotel*, vol. 15, no. 1, pp. 111–120, 2023.
- [10] G. O’Grady et al., “Principles and clinical methods of body surface gastric mapping: Technical review,” *Neurogastroenterology & Motility*, vol. 35, no. 10, p. e14556, 2023.
- [11] A. Furgala, K. Ciesielczyk, M. Przybylska-Feluś, K. Jabłoński, K. Gil, and M. Zwolińska-Wcislo, “Postprandial effect of gastrointestinal hormones and gastric activity in patients with irritable bowel syndrome,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, p. 9420, 2023.
- [12] N. B. Popović, “Methods for assessment of electrical activity of smooth muscles,” Универзитет у Београду, 2021.
- [13] A. G. Prospero et al., “New device for active gastric mechanical stimulation,” *Neurogastroenterology & Motility*, vol. 33, no. 11, p. e14169, 2021.
- [14] J. Wu, J. Zhang, and W. Yang, “Carbonated Beverages and Puffed Foods Cause Gastric Rupture: A Case Report,” *Curr Med Imaging*, vol. 20, no. 1, p. E080623217780, 2024.
- [15] T. Riasat, A. Bilal, A. Iftikhar, and M. Zafar, “An empirical analysis of carbonated beverage consumption trends and health consequences among tertiary education students,” *Journal for Current Sign*, vol. 3, no. 3, pp. 1421–1446, 2025.
- [16] A. Iriondo-DeHond, J. A. Uranga, M. D. Del Castillo, and R. Abalo, “Effects of coffee and its components on the gastrointestinal tract and the brain–gut axis,” *Nutrients*, vol. 13, no. 1, p. 88, 2021.
- [17] B. F. Hidayatulail, T. Emoto, T. Haraguchi, and Y. Goto, “Effects of Sparkling Water Stimulation on Gastric Electrical Response Activity,” in 2024 11th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), IEEE, 2024, pp. 16–20.
- [18] A. M. Halinska, O. V Severynovska, and O. O. Halinskyi, “Peristalsis and regulation of gastrointestinal motility: From mechanisms to pathophysiology,” *Regul Mech Biosyst*, vol. 16, no. 2, pp. e25065–e25065, 2025.
- [19] O. N. Athavale et al., “Neural regulation of slow waves and phasic contractions in the distal stomach: a mathematical model,” *J Neural Eng*, vol. 20, no. 6, p. 066040, 2024.

- [20] C.-H. A. Chan, Z. Aghababaie, N. Paskaranandavadiel, R. Avci, L. K. Cheng, and T. R. Angeli-Gordon, “Localized gastric distension disrupts slow-wave entrainment leading to temporary ectopic propagation: a high-resolution electrical mapping study,” *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*, vol. 321, no. 6, pp. G656–G667, 2021.