

Analisis Pengaruh Ekstraksi Zero Crossing Rate (ZCR) Terhadap Karakteristik Statistik Sinyal Wicara Bugis

Sriwijanaka Yudi Hartono^{1*}, Husain T², Bambang Panji Asmara³, Muhammad Nawir¹

¹Teknik Elektro, Universitas Muslim Indonesia

²Universitas Dipa Makassar, Jln. Perintis Kemerdekaan KM 9 Kota Makassar

³Teknik Elektro dan Komputer, Universitas Negeri Gorontalo

e-mail: ¹sriwijanaka.hartono@umi.ac.id, ²husain@undipa.ac.id, ³bambang@ung.ac.id,

⁴Muhammad.nawir@umi.ac.id

Abstrak

Penelitian ini menganalisis karakteristik statistik fitur Zero Crossing Rate (ZCR) pada sinyal wicara bahasa Bugis sebagai parameter ekstraksi ciri dalam pengolahan sinyal wicara. Data dikumpulkan dari lima penutur asli bahasa Bugis yang berasal dari Bone, Parepare, Pinrang, Sinjai, dan Sidrap dengan tiga jenis ujaran, yaitu aksara “/ka/”, aksara “/ga/”, dan kalimat “/mabbicara ogi/”. Tahapan pengolahan sinyal meliputi perekaman suara, pre-emphasis dengan koefisien $\alpha = 0,97$, segmentasi sinyal ke dalam frame berukuran 512 sampel dengan langkah 256 sampel, serta ekstraksi fitur ZCR. Analisis statistik deskriptif dilakukan berdasarkan nilai rata-rata (mean) dan variansi. Hasil penelitian menunjukkan nilai rata-rata ZCR untuk aksara “/ka/” sebesar 0,447 (variansi 0,012), aksara “/ga/” sebesar 0,428 (variansi 0,016), dan kalimat “/mabbicara ogi/” sebesar 0,352 (variansi 0,024). Aksara “/ka/” menghasilkan nilai ZCR tertinggi, yang mengindikasikan perubahan polaritas sinyal lebih tinggi dibandingkan ujaran lainnya. Sebaliknya, kalimat menghasilkan rata-rata ZCR terendah namun variansi tertinggi, yang mencerminkan dinamika sinyal lebih kompleks akibat transisi antar fonem. Uji korelasi Pearson menunjukkan korelasi positif yang signifikan antara mean dan variansi pada aksara “/ka/” ($r = 0,886$; $p = 0,046$) dan kalimat ($r = 0,939$; $p = 0,018$), sedangkan pada aksara “/ga/” tidak signifikan ($r = 0,600$; $p = 0,285$). Perbedaan antar penutur juga teramati, yang dipengaruhi oleh dialek, intonasi, kecepatan bicara, dan karakteristik fisiologis saluran vokal. Temuan ini mengonfirmasi bahwa ZCR mampu merepresentasikan karakteristik temporal sinyal wicara Bugis dan dapat menjadi acuan (baseline) untuk penelitian lanjutan dalam ekstraksi ciri bahasa daerah.

Kata kunci: Zero Crossing Rate, Pengolahan Sinyal Wicara, Bahasa Bugis, Mean, Variansi.

Abstract

This study analyzes the statistical characteristics of the Zero Crossing Rate (ZCR) feature in Bugis speech signals as a parameter for feature extraction in speech signal processing. Data were collected from five native Bugis speakers originating from Bone, Parepare, Pinrang, Sinjai, and Sidrap, with three types of utterances: the syllables “/ka/”, “/ga/”, and the sentence “/mabbicara ogi/”. The speech processing stages consisted of recording, pre-emphasis filtering using a coefficient of $\alpha = 0.97$, signal segmentation into frames with a window size of 512 samples and a step size of 256 samples, and ZCR feature extraction. Descriptive statistical analysis was then performed based on the mean and variance values. The results show that the mean ZCR for “/ka/” is 0.447 with a variance of 0.012, “/ga/” is 0.428 with a variance of 0.016, while the sentence “/mabbicara ogi/” has a mean of 0.352 with a variance of 0.024. The “/ka/” syllable exhibits the highest ZCR, indicating a higher polarity transition rate than other utterances. In contrast, the sentence produces the lowest mean but the highest variance, indicating more complex signal dynamics due to phoneme transitions. Pearson correlation analysis reveals a significant positive correlation between mean and variance for “/ka/” ($r = 0.886$; $p = 0.046$) and sentence ($r = 0.939$; $p = 0.018$), while “/ga/” shows no significant correlation ($r = 0.600$; $p = 0.285$). Differences among speakers were also observed, influenced by dialect, intonation, speech rate, and physiological characteristics of the vocal tract. This study confirms that ZCR effectively represents the temporal characteristics of Bugis speech signals and can serve as a baseline for further research in regional-language feature extraction.

Keywords: Zero Crossing Rate, Speech Signal Processing, Bugis Language, Mean, Variance.

1. PENDAHULUAN

Pengolahan sinyal wicara (speech signal processing) merupakan salah satu cabang ilmu yang berkembang pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan sistem komunikasi manusia-komputer yang lebih alami dan interaktif. Sinyal wicara mengandung informasi linguistik dan paralinguistik yang kaya, sehingga pemahaman mendalam tentang karakteristik sinyal menjadi sangat krusial untuk aplikasi seperti pengenalan wicara (speech recognition), verifikasi pembicara (speaker verification), dan sistem dialog otomatis. Di Indonesia, keberagaman bahasa daerah menjadi tantangan sekaligus peluang dalam pengembangan sistem pengenalan wicara berbasis bahasa lokal. Salah satunya adalah bahasa Bugis, yang merupakan bahasa daerah dengan jumlah penutur signifikan di Sulawesi Selatan. Berdasarkan data Badan Bahasa (2020), jumlah penutur bahasa Bugis mencapai lebih dari 5 juta jiwa, menjadikannya salah satu bahasa daerah terbesar di Indonesia bagian timur. Meskipun demikian, penelitian tentang ekstraksi ciri sinyal wicara bahasa Bugis masih sangat terbatas dibandingkan dengan bahasa-bahasa besar lainnya.

Bahasa Bugis memiliki struktur fonetik dan fonologis yang khas, berbeda dengan bahasa Indonesia baku maupun bahasa daerah lainnya. Ciri khas ini tercermin dalam pola gelombang sinyal wicara yang dihasilkan, seperti durasi fonem, intonasi, dan frekuensi dasar (pitch). Dalam konteks bahasa daerah, penelitian tentang pengenalan wicara telah dilakukan untuk berbagai bahasa, seperti bahasa Sunda dan Jawa [2], serta bahasa Jawa berbasis suku kata menggunakan MFCC dan CNN [4]. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemilihan metode ekstraksi ciri sangat memengaruhi akurasi sistem pengenalan wicara. Pemahaman tentang parameter dasar sinyal seperti mean dan variansi sangat penting untuk mengetahui distribusi amplitudo sinyal, yang kemudian dapat digunakan untuk proses ekstraksi ciri yang lebih kompleks.

Salah satu metode ekstraksi ciri yang sederhana namun memiliki potensi besar adalah Zero Crossing Rate (ZCR). ZCR didefinisikan sebagai jumlah perpotongan sinyal terhadap garis nol per satuan waktu, yang secara efektif merefleksikan kandungan frekuensi sinyal wicara. Metode ini telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti deteksi aktivitas suara (voice activity detection), klasifikasi sinyal bicara dan musik, serta segmentasi fonemik. Penelitian Ajrin [7], menunjukkan bahwa ZCR bersama dengan MFCC dapat digunakan untuk identifikasi dialek suku bangsa dengan Deep Neural Network classifier, yang mengindikasikan bahwa ZCR memiliki kemampuan diskriminatif yang baik untuk membedakan ciri-ciri sinyal wicara dari berbagai latar belakang penutur.

Meskipun ZCR menawarkan berbagai keunggulan, penerapannya dalam konteks sinyal wicara bahasa daerah, khususnya bahasa Bugis, masih belum banyak dieksplorasi. Penelitian tentang pengenalan wicara bahasa Lampung telah dilakukan dengan menggunakan ekstraksi ciri Perceptual Linear Prediction (PLP) untuk transkripsi teks [5], sementara penelitian tentang bahasa Bugis lebih banyak terfokus pada ekstraksi pitch menggunakan algoritma autokorelasi [6]. Perbedaan (research gap) yang menjadi fokus penelitian ini adalah bahwa sebagian besar penelitian sebelumnya lebih banyak menggunakan fitur MFCC atau pitch, sedangkan penelitian ini secara khusus menganalisis pengaruh ekstraksi ZCR terhadap parameter statistik (mean dan variansi) sinyal wicara bahasa Bugis, yang belum banyak dikaji secara kuantitatif. Selain itu, nilai mean dan variansi sinyal wicara merupakan dua parameter statistika fundamental yang menggambarkan pusat sebaran dan variabilitas sinyal terhadap waktu. Mean sinyal mencerminkan komponen DC atau offset sinyal, sementara variansi memberikan informasi tentang energi dan fluktuasi sinyal di sekitar nilai rata-ratanya.

Isu lain yang menjadi perhatian adalah belum adanya standar prosedur ekstraksi ZCR yang diuji secara khusus untuk sinyal wicara bahasa Bugis. Parameter seperti panjang jendela (window size), ukuran langkah (step size), dan pra-pemrosesan sinyal sering kali berbeda-beda antar penelitian. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh ekstraksi ZCR terhadap nilai mean dan variansi sinyal wicara bahasa Bugis. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk mengukur perubahan parameter statistik sinyal setelah penerapan ekstraksi ZCR, sehingga dapat menjadi acuan bagi penelitian ekstraksi ciri bahasa Bugis di masa mendatang.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh ekstraksi fitur Zero Crossing Rate (ZCR) terhadap nilai mean dan variansi pada sinyal wicara bahasa Bugis melalui pendekatan statistik deskriptif. Berikut ini akan diuraikan secara ringkas metode penelitian yang dilakukan dengan skenario pengujian:

2.1. Analisis Permasalahan

Penelitian ini berangkat dari permasalahan utama, yaitu belum diketahuinya secara kuantitatif pengaruh ekstraksi ZCR terhadap perubahan nilai mean dan variansi sinyal wicara bahasa Bugis. Secara

teoritis, ZCR dihitung berdasarkan jumlah perpotongan sinyal terhadap garis nol dalam selang waktu tertentu. Proses perhitungan ini berpotensi mengubah karakteristik statistik sinyal asli, karena ZCR hanya mempertimbangkan tanda perubahan amplitudo tanpa mempertimbangkan besaran amplitudo itu sendiri [7]. Oleh karena itu, diperlukan analisis sistematis untuk mengukur perubahan parameter statistik sinyal (mean dan variansi) setelah proses ekstraksi ZCR dibandingkan dengan sinyal asli. Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif komparatif.

2.2. Analisis Permasalahan

Arsitektur sistem dalam penelitian ini terdiri dari enam tahapan utama yaitu:

Tahap 1: Pengumpulan Data Sinyal Wicara Bugis

1. Data suara diambil dari 5 (lima) penutur asli bahasa Bugis yang berasal dari Bone, Parepare, Pinrang, Sinjai, dan Sidrap.
2. Setiap penutur merekam tiga jenis ujaran: aksara “/ka/”, aksara “/ga/”, dan kalimat “/mabbicara ogi/” dalam format .wav dengan frekuensi sampling 16 kHz menggunakan bantuan software Wavesurfer dan MATLAB.

Tahap 2: Pra-pemrosesan Sinyal

1. Pre-emphasis dengan koefisien $\alpha = 0,97$ untuk memperkuat komponen frekuensi tinggi.
2. Normalisasi amplitudo untuk menyeragamkan skala sinyal.
3. Segmentasi sinyal menjadi frame dengan panjang jendela 512 sampel dan step size 256 sampel.

Tahap 3: Proses Ekstraksi Fitur ZCR

Perhitungan ZCR per frame dengan rumus:

$$ZCR = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N-1} |sgn(x[n]) - sgn(x[n-1])| \quad (1)$$

dimana:

$x[n]$ = sampel sinyal ke- n

sgn = fungsi tanda (sign function)

N = panjang jendela

Tahap 4: Proses Perhitungan Mean dan Variansi

1. Perhitungan mean sinyal per frame:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x[n] \quad (2)$$

2. Perhitungan variansi sinyal per frame:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x[n] - \mu)^2 \quad (3)$$

Tahap 5: Analisis Perbandingan

1. Membandingkan nilai mean dan variansi sinyal asli dengan sinyal hasil ekstraksi ZCR
2. Visualisasi dalam bentuk grafik perbandingan

Tahap 6: Evaluasi dan Interpretasi

1. Interpretasi pengaruh ZCR terhadap mean dan variansi
2. Penarikan kesimpulan tentang tingkat perubahan parameter statistik

2.3. Metode yang Digunakan Dalam Penelitian

2.3.1 Fitur Zero Crossing Rate (ZCR)

Zero Crossing Rate adalah fitur domain waktu yang menghitung jumlah perubahan tanda (dari positif ke negatif atau sebaliknya) dalam sinyal. ZCR digunakan sebagai indikator kasar kandungan frekuensi sinyal; sinyal dengan frekuensi tinggi cenderung memiliki ZCR lebih tinggi dibandingkan sinyal frekuensi rendah [1].

Contoh perhitungan ZCR per frame: Pada sebuah frame dengan 5 sampel sinyal [0.2, -0.1, 0.3, -0.2, 0.1], perubahan tanda terjadi pada transisi dari sampel ke-1 ke ke-2 (positif ke negatif), ke-2 ke ke-3 (negatif ke positif), dan ke-3 ke ke-4 (positif ke negatif), sehingga ZCR untuk frame tersebut adalah $3/5 = 0,6$. Semakin tinggi nilai ZCR, maka semakin cepat osilasi sinyal dalam frame tersebut, yang umumnya berkorelasi dengan komponen frekuensi tinggi seperti konsonan letup (plosive).

2.3.2 Mean Sinyal

Mean atau nilai rata-rata sinyal merupakan nilai pusat distribusi amplitudo sinyal. Mean sinyal dapat memberikan informasi tentang komponen DC (direct current) atau offset sinyal.

2.3.3 Variansi Sinyal

Variansi mengukur seberapa jauh nilai-nilai sampel sinyal menyebar dari nilai rata-ratanya. Variansi yang tinggi menunjukkan sinyal memiliki fluktuasi amplitudo yang besar, sedangkan variansi yang rendah menunjukkan sinyal yang relatif stabil.

2.4. Implementasi

2.4.1 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

Tabel 1. Alat dan Bahan

Kategori	Spesifikasi
Perangkat Keras	Laptop/PC, mikrofon kondenser
Sistem Operasi	Windows 10
Bahasa Pemrograman dan software	MATLAB, wavesurfer
Data	Rekaman sinyal wicara bahasa Bugis dari 5 penutur dalam format file .wav (total 15 file dengan durasi 2 – 3 detik perfile, kondisi perekaman SNR > 30 dB).

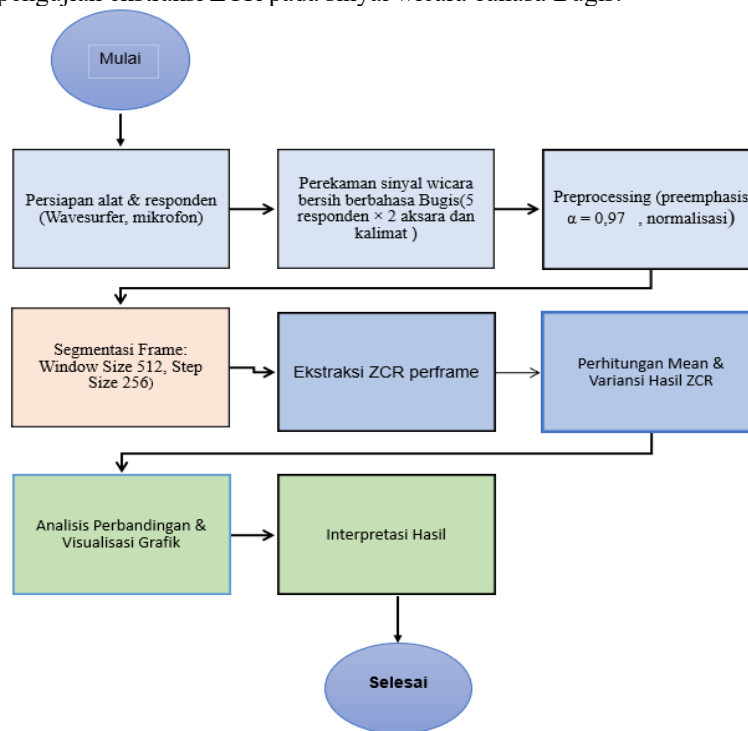
2.4.2 Skenario Pengujian

Penelitian dilakukan dengan parameter tetap sebagai berikut ini:

1. Window size: 512 sampel
2. Step size: 256 sampel
3. Pre-emphasis: $\alpha = 0,97$
4. Frekuensi sampling: 16 kHz

2.4.3 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini pada gambar 1. di bawah ini adalah diagram alir dari pelaksanaan penelitian yang dilakukan dalam pengujian ekstraksi ZCR pada sinyal wicara bahasa Bugis:



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Pada Gambar 1. tersebut di atas, menyajikan diagram alir penelitian yang dimulai dari perekaman suara (input file .wav), dilanjutkan dengan pre-emphasis dan segmentasi framing, ekstraksi ZCR, perhitungan mean dan variansi, hingga tahap evaluasi berupa perbandingan statistik antara sinyal asli dan sinyal hasil ekstraksi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Zero Crossing Rate (ZCR) pada Penuturan Aksara "/ka/"

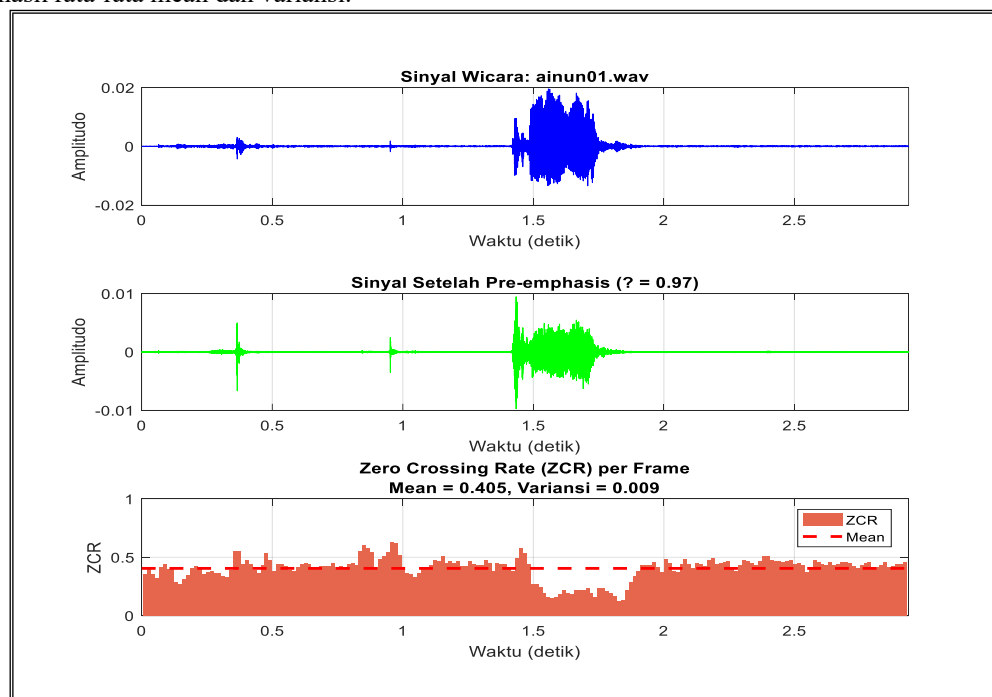
Pengujian pertama dilakukan terhadap data penuturan aksara "/ka/" oleh lima orang penutur yang berasal dari Bone, Parepare, Pinrang, Sinjai, dan Sidrap. Tahapan pengolahan sinyal meliputi perekaman

sinyal wicara dengan bantuan wavesurfer, proses pre-emphasis menggunakan koefisien $\alpha=0,97$, kemudian melakukan ekstraksi fitur dengan menggunakan metode Zero Crossing Rate (ZCR). Hasil pengujian keseluruhan data sinyal pengucapan aksara dapat dilihat pada tabel 2, berikut ini:

Tabel 2. Hasil Pengujian Penuturan Aksara “/ka/”

No.	Nama Sinyal Wicara	Mean	Variansi	Rata-rata Mean	Rata-rata Variansi	Daerah Asal Penutur
1	ainun01.wav	405.323	9423.849	0,405	0,009	Bone
2	candra01.wav	346.605	3812.931	0,346	0,004	Pare-pare
3	narti01.wav	519.656	17504.598	0,519	0,018	Pinrang
4	ucan01.wav	380.795	12924.040	0,381	0,012	Sinjai
5	sate01.wav	581.186	18221.799	0,581	0,018	Sidrap

Sedangkan pada gambar 2 di bawah ini adalah salah satu sampel data sinyal wicara ainun01.wav dan grafik hasil rata-rata mean dan variansi.



Gambar 2. Hasil Pengujian Penuturan aksara “/ka/” Bahasa Bugis

Berdasarkan Tabel 2, nilai rata-rata ZCR keseluruhan untuk aksara “/ka/” adalah 0,447 dengan variansi 0,012. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa fonem “/ka/” memiliki tingkat perubahan polaritas sinyal yang relatif stabil antar frame. Nilai rata-rata ZCR tertinggi diperoleh dari penutur sate01.wav (Sidrap) sebesar 0,581, sedangkan nilai terendah dari penutur candra01.wav (Parepare) sebesar 0,346. Variansi terbesar juga dimiliki oleh penutur dari Sidrap (0,018), sedangkan variansi terkecil terdapat pada penutur dari Parepare (0,004).

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik artikulasi setiap penutur memengaruhi jumlah perpotongan nol pada sinyal wicara. Penutur dengan energi konsonan yang lebih kuat menghasilkan frekuensi perubahan tanda yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan nilai ZCR. Selain faktor artikulasi, variasi tersebut juga dipengaruhi oleh dialek daerah, intonasi, kecepatan pengucapan, serta karakteristik fisiologis saluran vokal masing-masing penutur. Hal ini memperlihatkan bahwa ZCR cukup sensitif dalam membedakan karakteristik fonetik antar penutur.

3.2. Analisis Zero Crossing Rate (ZCR) pada Penuturan Aksara “/ga/”

Pengujian kedua dilakukan terhadap penuturan aksara “/ga/” menggunakan prosedur ekstraksi yang sama. Nilai rata-rata ZCR keseluruhan mencapai 0,428, sedangkan variansi sebesar 0,016. Nilai rata-rata tersebut lebih tinggi dibandingkan aksara “/ka/”, menunjukkan bahwa fonem “/ga/” menghasilkan perubahan polaritas sinyal yang lebih banyak selama proses pengucapan.

Pada tingkat individu, penutur narti02.wav dari Pinrang memperoleh rata-rata ZCR tertinggi, sedangkan penutur candra02.wav dari Parepare memiliki nilai yang terendah. Variansi terbesar terdapat pada sate02.wav dari Sidrap, yang menunjukkan fluktuasi ZCR cukup besar selama pengucapan. Hasil pengujian keseluruhan pada penuturan data kedua ini, dapat dilihat pada tabel 3 berikut ini:

Tabel 3. Hasil pengujian penuturan aksara “/ga/”

No.	Nama Sinyal Wicara	Mean	Variansi	Rata-rata Mean	Rata-rata Variansi	Daerah Asal Penutur
1	ainun02.wav	353.508	17196.031	0,353	0,017	Bone
2	candra02.wav	333.021	6769.546	0,333	0,007	Pare-pare
3	narti02.wav	578.734	17239.924	0,578	0,017	Pinrang
4	ucan02.wav	382.129	14036.373	0,382	0,014	Sinjai
5	sate02.wav	491.749	24675.529	0,491	0,025	Sidrap

Nilai rata-rata ZCR keseluruhan mencapai 0,428 dengan variansi 0,016. Nilai rata-rata ini lebih tinggi dibandingkan aksara “/ka/”, yang mengindikasikan bahwa fonem “/ga/” menghasilkan perubahan polaritas sinyal yang lebih banyak selama proses pengucapan.

Pada tingkat individu, penutur narti02.wav (Pinrang) memperoleh rata-rata ZCR tertinggi (0,578), sedangkan penutur candra02.wav (Parepare) memiliki nilai terendah (0,333). Variansi terbesar terdapat pada sate02.wav (Sidrap) sebesar 0,025, yang menunjukkan fluktuasi ZCR cukup besar selama pengucapan.

Fenomena ini mengindikasikan bahwa fonem bersuara (voiced consonant) seperti “/ga/” menghasilkan karakteristik spektral yang berbeda dibandingkan fonem “/ka/”. Adanya getaran pita suara menyebabkan distribusi energi berubah sehingga jumlah zero crossing meningkat pada beberapa frame tertentu. Oleh karena itu, fitur ZCR mampu membedakan karakteristik fonem berdasarkan sifat fonetiknya.

3.3. Analisis Zero Crossing Rate (ZCR) pada Penuturan Kalimat “/mabbicara ogi/”

Hasil pengujian ketiga yang dilakukan pada kalimat bahasa Bugis dengan data “/mabbicara ogi/”, yang terdiri atas beberapa suku kata dan kombinasi fonem. Hasil ekstraksi menunjukkan nilai rata-rata ZCR sebesar 0,352 dengan variansi sebesar 0,024. Nilai rata-rata ini merupakan yang paling rendah dibandingkan dua pengujian sebelumnya. Untuk lebih jelasnya berikut ini hasil pengujian selengkapnya dapat dilihat pada tabel 4 di bawah ini:

Tabel 4. Hasil pengujian penuturan Bahasa Bugis dengan kalimat “/mabbicara ogi/”

No.	Nama Sinyal Wicara	Mean	Variansi	Rata-rata Mean	Rata-rata Variansi	Daerah Asal Penutur
1	ainun03.wav	291.754	14205.465	0,291	0,014	Bone
2	candra03.wav	318.558	11135.682	0,318	0,011	Pare-pare
3	narti03.wav	451.415	39359.615	0,451	0,039	Pinrang
4	ucan03.wav	293.103	17753.309	0,293	0,018	Sinjai
5	sate03.wav	407.026	37539.726	0,407	0,038	Sidrap

Hasil ekstraksi pada tabel 4 di atas, menunjukkan nilai rata-rata ZCR sebesar 0,352 dengan variansi 0,024. Nilai rata-rata ini merupakan yang terendah dibandingkan dua pengujian sebelumnya. Nilai rata-rata ZCR tertinggi diperoleh pada penutur narti03.wav (Pinrang) sebesar 0,451, sedangkan nilai terendah pada ainun03.wav (Bone) sebesar 0,291.

Nilai ZCR yang lebih rendah pada tingkat rata-rata menunjukkan bahwa ketika penutur mengucapkan kalimat utuh, sebagian besar frame didominasi oleh vokal yang memiliki karakteristik frekuensi rendah, sehingga jumlah zero crossing menurun. Sebaliknya, variansi yang lebih tinggi dibandingkan ujaran aksara menunjukkan adanya perubahan dinamis antara segmen vokal, konsonan bersuara, dan konsonan tak bersuara sepanjang kalimat.

3.4. Analisis Perbandingan Mean dan Variansi ZCR Antar Jenis Ujaran

Berdasarkan hasil uji ekstraksi ZCR yang terdapat pada Tabel 2, 3, dan 4 sebelumnya, maka akan dilakukan perbandingan untuk mengidentifikasi perbedaan karakteristik statistik antar jenis ujaran. Berikut ini pada tabel 5 menyajikan ringkasan rata-rata mean dan variansi ZCR untuk ketiga jenis ujaran.

Tabel 5. Perbandingan Rata-rata Mean dan Variansi ZCR antar jenis ujaran

Jenis Ujaran	Mean ZCR	Variansi ZCR
“/ka/”	0,447	0,012
“/ga/”	0,428	0,016
Kalimat “/mabbicara ogi/”	0,352	0,024

Berdasarkan dari tabel 5, aksara “/ka/” menghasilkan nilai mean ZCR tertinggi (0,447), diikuti oleh “/ga/” (0,428), dan kalimat (0,352). Hal ini menunjukkan bahwa fonem “/ka/” memiliki tingkat perubahan polaritas sinyal yang paling tinggi dibandingkan dua ujaran lainnya. Sebaliknya, kalimat menghasilkan mean ZCR terendah, karena pengucapan kalimat lebih banyak didominasi oleh segmen vokal yang memiliki frekuensi rendah, sehingga jumlah perpotongan nol berkurang

Sedangkan pada sisi variansi, kalimat memiliki variansi tertinggi (0,024), yang mengindikasikan bahwa ujaran kontinu memiliki dinamika sinyal paling kompleks akibat perpindahan antar fonem. Aksara “/ga/” berada di posisi tengah dengan variansi (0,016), sedangkan “/ka/” memiliki variansi terendah (0,012), yang menunjukkan karakteristik sinyal paling stabil.

3.5. Analisis Korelasi Antara Mean dan Variansi ZCR

Untuk dapat menguji kekuatan hubungan antara nilai mean dan variansi ZCR, dilakukan uji korelasi Pearson terhadap seluruh data penutur pada setiap jenis ujaran. Hasil analisis tersebut disajikan dalam tabel 6 berikut ini:

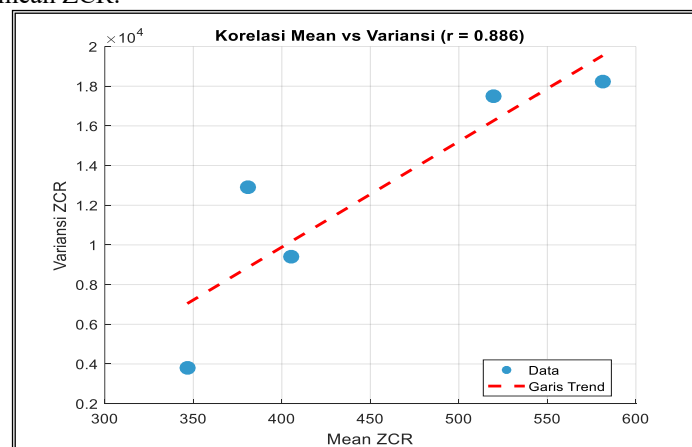
Tabel 6. Hasil Uji Korelasi Pearson antara Mean dan Variansi ZCR

Jenis Ujaran	Koefisien Korelas (r)	p-value	Keterangan
“/ka/”	0,886	0,046	Korelasi positif signifikan ($p < 0,05$)
“/ga/”	0,600	0,285	Korelasi positif tidak signifikan ($p > 0,05$)
Kalimat “/mabbicara ogi/”	0,939	0,018	Korelasi positif sangat signifikan ($p < 0,05$)

Berdasarkan dari Tabel 6 tersebut, menyatakan bahwa pada aksara “/ka/” diperoleh koefisien korelasi $r = 0,886$ dengan $p\text{-value} = 0,046$ ($p < 0,05$), yang mengindikasikan korelasi positif yang signifikan secara statistik antara mean dan variansi ZCR. Hal ini menunjukkan bahwa sinyal dengan tingkat perubahan tanda yang tinggi cenderung memiliki variabilitas yang lebih besar.

Sedangkan pada aksara “/ga/”, nilai $r = 0,600$ dengan $p\text{-value} = 0,285$ ($p > 0,05$), sehingga hubungan yang teramati tidak signifikan secara statistik. Kemungkinan penyebabnya adalah variasi artikulasi antar penutur yang lebih tinggi pada fonem “/ga/” dibandingkan “/ka/”, atau karakteristik fonetik “/ga/” yang lebih kompleks karena merupakan konsonan plosif velar bersuara.

Untuk hasil yang diperoleh pada tingkat kalimat, diperoleh korelasi sangat kuat dengan $r = 0,939$ dan $p\text{-value} = 0,018$ ($p < 0,05$), yang menegaskan bahwa pada ujaran kontinyu, peningkatan frekuensi zero crossing diiringi oleh peningkatan variabilitas sinyal yang terstruktur. Hal ini mengindikasikan bahwa dalam konteks kalimat, sinyal wicara Bugis memiliki pola yang lebih terstruktur, sehingga perubahan frekuensi zero crossing sangat memengaruhi sebaran data. Berikut ini akan ditunjukkan sampel grafik korelasi mean dengan variansi ZCR dari data penuturan aksara “/ka/”, pada gambar 3 menyajikan grafik korelasi antara mean dan variansi ZCR pada aksara “/ka/” sebagai representasi visual dari hubungan yang teramati. Setiap titik pada grafik merepresentasikan satu penutur, dengan penutur dari Sidrap (sate01) dan Pinrang (narti01) menunjukkan nilai mean dan variansi tertinggi, sedangkan penutur dari Parepare (candra01) menunjukkan nilai terendah. Garis regresi linear pada grafik mengonfirmasi kecenderungan peningkatan variansi seiring dengan peningkatan mean ZCR.



Gambar 3. Grafik Korelasi antara mean dan varian pada penuturan aksara “/ka/”

Grafik ini menunjukkan hubungan antara nilai mean dan variansi ZCR pada penuturan aksara /ka/ oleh lima penutur dari daerah berbeda (Bone, Parepare, Pinrang, Sinjai, dan Sidrap). Koefisien korelasi Pearson $r = 0,886$ dengan $p\text{-value} = 0,046$ ($p < 0,05$) mengindikasikan korelasi positif yang signifikan secara statistik. Garis regresi linear menunjukkan kecenderungan peningkatan variansi seiring dengan peningkatan mean ZCR.

Temuan ini mengindikasikan bahwa ZCR tidak sekadar mengekstrak fitur, tetapi juga mengubah struktur data secara fundamental. Oleh karena itu, dalam pengembangan sistem pengenalan ucapan, penggunaan ZCR perlu dipertimbangkan bersama fitur lain agar tidak kehilangan informasi penting dari sinyal asli [5]. Secara spesifik, keunggulan ZCR adalah kemampuannya memperjelas perbedaan antar penutur dari daerah berbeda seperti yang teramati seperti penutur dari Pinrang dan Sidrap dibandingkan dengan Parepare. Hal ini menunjukkan bahwa ZCR memiliki sensitivitas terhadap variasi dialek dan karakteristik artikulasi penutur. Namun, kelemahan utama ZCR adalah perlu kebutuhan tahapan preprocessing yang memadai (filtering, normalisasi) untuk meminimalkan efek noise sebelum ekstraksi ZCR dilakukan.

Secara lebih luas, ekstraksi ZCR berhasil mentransformasi sinyal dari representasi statis (amplitudo) menjadi representasi dinamis (laju perubahan). Dalam konteks pengenalan ucapan, fitur yang berbasis dinamika (seperti ZCR, delta MFCC, dan lain-lain) seringkali lebih informatif dibandingkan fitur statis [1], [2]. Perubahan korelasi yang teramati dalam penelitian ini juga mengindikasikan bahwa ZCR memiliki karakteristik yang berbeda secara fundamental dari sinyal asli, sehingga layak dijadikan fitur tambahan (complementary feature) dalam sistem pengenalan ucapan bahasa Bugis di masa mendatang.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Penelitian ini berhasil menganalisis pengaruh ekstraksi fitur Zero Crossing Rate (ZCR) terhadap nilai mean dan variansi pada sinyal wicara bahasa Bugis melalui pendekatan statistik deskriptif. Hasil pengujian terhadap tiga jenis ujaran (aksara “/ka/”, aksara “/ga/”, dan kalimat “/mabbicara ogi/”) menunjukkan bahwa metode ZCR mampu menggambarkan karakteristik temporal sinyal wicara dengan baik melalui perubahan jumlah perpotongan nol pada setiap frame sinyal.
2. Ekstraksi ZCR menghasilkan nilai mean tertinggi pada aksara “/ka/” (0,447), diikuti “/ga/” (0,428), dan kalimat “/mabbicara ogi/” (0,352). Sementara itu, variansi tertinggi terdapat pada kalimat “/mabbicara ogi/” (0,024), diikuti “/ga/” (0,016), dan “/ka/” (0,012). Hal ini menunjukkan bahwa kalimat memiliki dinamika sinyal paling kompleks akibat perpindahan antar fonem, sedangkan “/ka/” memiliki karakteristik paling stabil.
3. Uji korelasi Pearson menunjukkan hubungan yang signifikan antara mean dan variansi ZCR pada aksara “/ka/” ($r = 0,886$; $p = 0,046$) dan kalimat “/mabbicara ogi/” ($r = 0,939$; $p = 0,018$), sedangkan pada aksara “/ga/” tidak signifikan ($r = 0,600$; $p = 0,285$). Temuan ini mengindikasikan bahwa efektivitas ZCR bergantung pada jenis ujaran, sehingga dalam pengembangan sistem pengenalan ucapan, ZCR perlu dikombinasikan dengan fitur lain untuk hasil yang lebih optimal.
4. Fitur ZCR mampu memperkuat perbedaan antar penutur dari daerah berbeda, sehingga berpotensi dikembangkan untuk sistem identifikasi dialek bahasa Bugis. Namun, karena jumlah penutur terbatas ($n = 5$), temuan ini masih bersifat deskriptif dan memerlukan validasi dengan sampel yang lebih besar.

5. SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian berikutnya disarankan menggunakan jumlah penutur yang lebih banyak dengan cakupan wilayah dialek bahasa Bugis yang lebih luas sehingga karakteristik statistik yang diperoleh menjadi lebih representatif.
2. Untuk meningkatkan akurasi karakterisasi sinyal wicara, fitur Zero Crossing Rate (ZCR) sebaiknya dikombinasikan dengan fitur ekstraksi lainnya, seperti Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC), Short-Time Energy (STE), Spectral Centroid, Spectral Roll-off, atau Linear Predictive Coding (LPC) sehingga mampu memberikan representasi sinyal yang lebih lengkap.
3. Penelitian selanjutnya juga dapat mengevaluasi pengaruh berbagai tingkat noise (Signal-to-Noise Ratio/SNR) terhadap kestabilan nilai ZCR, sehingga diperoleh gambaran mengenai tingkat

ketahanan (robustness) fitur ZCR pada kondisi lingkungan nyata.

4. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu referensi dalam pengembangan sistem pengenalan ujaran (Automatic Speech Recognition), identifikasi penutur (Speaker Identification), maupun pelestarian bahasa daerah berbasis teknologi pengolahan sinyal digital dan kecerdasan buatan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Liu, A. N. J. Raj, V. Rajangam, K. Ma, Z. Zhuang, and S. Zhuang, "Multiscale-multichannel feature extraction and classification through one-dimensional convolutional neural network for speech emotion recognition," *Speech Communication*, vol. 156, Art. no. 103010, 2024, doi: 10.1016/j.specom.2023.103010.
- [2] S. Z. Pranida, R. A. Genadi, M. C. Airlangga, and S. Shehata, "ASR under noise: Exploring robustness for Sundanese and Javanese," in *Proc. 9th Widening NLP Workshop (WinLP)*, Suzhou, China, 2025, pp. 87–99, doi: 10.18653/v1/2025.winlp-main.16.
- [3] K. Alam, M. H. Bhuiyan, and M. F. Monir, "Bangla speaker accent variation classification from audio using deep neural networks: A distinct approach," in *Proc. TENCON 2023—2023 IEEE Region 10 Conf. (TENCON)*, 2023, pp. 134–139, doi: 10.1109/TENCON58879.2023.10322411.
- [4] H. Hermanto and T. W. Sen, "Syllable-based Javanese speech recognition using MFCC and CNNs: Noise impact evaluation," *Jurnal Teknik Informatika*, vol. 18, no. 1, pp. 32–42, 2025, doi: 10.15408/jti.v18i1.41067.
- [5] M. Zainudin, A. Junaidi, F. R. Lumbanraja, Aristoteles, and Tristiyanto, "Perceptual linear prediction feature extraction for Lampung voice to text transcription (Case study: Lampung Pepadun Dialect A)," in *Proc. 5th Int. Conf. Applied Sciences, Mathematics, and Informatics (ICASMI 2024)*, 2025, pp. 108–117, doi: 10.2991/978-94-6463-730-4_10.
- [6] S. Y. Hartono, S. Suyuti, S. A. Mutmainnah, and M. F. Nur, "Ekstraksi pitch sinyal wicara (speech) bahasa daerah Bugis dengan algoritma autokorelasi," *Jurnal INSTEK (Informatika Sains dan Teknologi)*, vol. 9, no. 1, pp. 125–134, 2024, doi: 10.24252/instek.v9i1.46418.
- [7] G. F. Ajrin, R. Magdalena, and B. Hidayat, "Identifikasi dialek suku bangsa menggunakan metode Mel-Frequency Cepstral Coefficient dan Zero Crossing Rate dengan Deep Neural Network Classifier," *e-Proceedings of Engineering*, vol. 9, no. 6, 2022.
- [8] D. J. Min and D. Kim, "Speech emotion recognition using time and frequency domain feature based bidirectional LSTM model," *The Journal of Korean Institute of Next Generation Computing*, vol. 19, no. 6, pp. 18–29, 2023, doi: 10.23019/kingpc.19.6.202312.002.
- [9] J. Lee, "Speech recognition of Korean phonemes ‘入’, ‘ス’, ‘ス’ based on volatility and turning points," *KIIE Transactions on Computing Practices*, vol. 20, no. 11, pp. 579–585, 2014.
- [10] P. A. H. Vardhini, S. S. Prasad, M. H. S. Vishnu Sai, C. Santoshi, and D. Konduru, "Pioneering minimalist speech analysis through optimized spectral features machine learning models," in *Proc. 2024 Int. Conf. Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*, Pune, India, 2024, pp. 1–6, doi: 10.1109/ESCI59607.2024.10497288.
- [11] A. E. Mahdi and E. Jafer, "Two-feature voiced/unvoiced classifier using wavelet transform," *The Open Electrical & Electronic Engineering Journal*, vol. 2, pp. 8–13, 2008, doi: 10.2174/1874129000802010008.
- [12] M. R. Laskar, P. K. Sen, I. Paul, S. Das, and S. Ghosh, "Principal feature extraction from regional speech in emergency communication," in *Proc. 2019 2nd Int. Conf. Advanced Computational and Communication Paradigms (ICACCP)*, 2019, pp. 681–685, doi: 10.1109/ICACCP.2019.8882951.
- [13] N. A. N. Dewi, Kusriani, E. Utami, and K. A. Yuana, "Systematic literature review: Identification of regional dialects using speech feature extraction techniques," in *Proc. 2025 13th Int. Conf. Cyber and IT Service Management (CITSM)*, 2025, doi: 10.1109/CITSM67730.2025.11291440.