

# Filter Linear Productive Coding

Vanny Alviolani Indriyani (13221020)  
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika  
Institut Teknologi Bandung  
Bandung, Indonesia  
13221020 @mahasiswa.itb.ac.id

**Abstrak**—Salah satu teknik pemrosesan audio yang paling sering digunakan adalah Linear Predictive Coding atau LPC. LPC memanfaatkan metode prediksi linear sehingga didapatkan koefisien LPC yang kemudian digunakan untuk merekonstruksi sinyal. Pada penelitian ini, digunakan berbagai fungsi untuk membentuk satu kesatuan fungsi LPC. Fungsi utama yang digunakan adalah fungsi encode yang digunakan untuk menganalisis sinyal dan fungsi decode untuk mensintesis kembali sinyal asli. Fungsi encode melakukan operasi matematis pada sinyal kini dengan sinyal masa lalu dengan memanfaatkan fungsi circshift. Fungsi decode menggunakan filter yang memanfaatkan koefisien LPC yang didapat dari proses analisis. Hasil yang didapat yaitu sinyal hasil rekonstruksi yang memiliki envelope sinyal audio asli namun dengan amplitud yang lebih rendah dan merata, serta sinyal error yang berupa white noise.

**Kata Kunci**—LPC, windowing, analysis, synthesis.

## I. PENDAHULUAN

PEMROSESAN sinyal audio memiliki peran yang krusial dalam berbagai aplikasi, seperti telekomunikasi, pengenalan dan sintesis ucapan, kompresi audio, dan masih banyak lagi. Pemrosesan sinyal audio terdiri dari dua proses utama yaitu proses analisis yang mengubah sinyal audio menjadi koefisien-koefisien digital dan proses sintesis yang merekonstruksi sinyal audio asli maupun yang telah difilter dari koefisien-koefisien yang telah dibuat. Salah satu teknik penting dalam pemrosesan sinyal suara adalah Linear Predictive Coding (LPC). LPC bekerja dengan memodelkan sinyal suara sebagai kombinasi linear dari nilai-nilai sebelumnya. Dengan menggunakan pendekatan ini, LPC mampu mengekstraksi informasi esensial dari sinyal suara, seperti bentuk spektral dan karakteristik vokal. Keunggulan utama dari LPC terletak pada kemampuannya untuk mereduksi dimensi data audio tanpa kehilangan informasi yang signifikan, membuatnya sangat efektif dalam mengatasi permasalahan pengenalan ucapan dan kompresi suara.

## II. LANDASAN TEORETIS

### A. Definisi dan Penjelasan Matematis LPC

LPC (Linear Predictive Coding) adalah salah satu metode yang sering digunakan dalam pemrosesan sinyal audio dan pemrosesan ucapan (speech) untuk merepresentasikan selubung (envelope) spektrum sinyal ucapan digital

menggunakan model prediksi linier [1]. Metode LPC dapat menghasilkan estimasi parameter sinyal ucapan yang akurat secara efisien dengan rate bit yang rendah.

Model prediksi linear yang digunakan LPC menggunakan kombinasi linear dari sample masa lampau,  $s[n-1]$ ,  $s[n-2]$ , ...,  $s[n-M]$ , untuk memprediksi sample masa kini  $s[n]$  [3].

$$s[n] = \hat{s}[n] = - \sum_{i=1}^M a_i s[n-i]$$

Variabel  $\hat{s}[n]$  melambangkan sampel yang diprediksi dan  $a_i, i = 1, 2, \dots, M$  melambangkan koefisien LPC. Jika analisis yang dilakukan akurat, koefisien LPC dapat digunakan untuk merepresentasikan atau men-decode sinyal  $s[n]$ .

Error pada sampling dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$e[n] = s[n] - \hat{s}[n] = s[n] + \sum_{i=1}^M a_i s[n-i] = \sum_{i=0}^M a_i s[n-i]$$

Dalam domain  $z$ , persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$E(z) = S(z) + \sum_{i=1}^M a_i S(z)z^{-i} = S(z) \left[ 1 + \sum_{i=1}^M a_i z^{-i} \right]$$
$$A(z) = 1 + \sum_{i=1}^M a_i z^{-i} = \sum_{i=0}^M a_i z^{-i}$$
$$S(z) = E(z) \frac{1}{A(z)}$$

Berdasarkan persamaan berikut, dapat dilihat bahwa sinyal error yang dilewati filter dengan denominator berupa koefisien filter LPC akan menghasilkan sinyal audio asli. Hal ini disebut sebagai inverse filtering.

### B. Langkah-langkah dalam Proses LPC

Terdapat beberapa metode yang digunakan untuk melakukan LPC, di antaranya yaitu metode kalkulasi envelope dan limit [5]. Pada penelitian ini digunakan metode kalkulasi envelope yang dilakukan dengan terlebih dahulu menganalisis sinyal ucapan dengan mengestimasi formant (rentang frekuensi maksimum yang membedakan suatu vokal dengan huruf vokal lainnya [2]), menghilangkan pengaruhnya terhadap sinyal ucapan, dan mengestimasi frekuensi serta intensitas dengungan dari pita suara yang tersisa. Proses menghilangkan formant disebut inverse filtering, sementara hasil pemfilteran LPC disebut residu. LPC mensintesis kembali sinyal ucapan menggunakan dengungan yang tersisa untuk merekonstruksi kembali sinyal sumber. Caranya yaitu dengan melewati sinyal tersebut ke filter yang dibuat menggunakan formant yang

telah diestimasi, sehingga menghasilkan sinyal akhir berupa sinyal ucapan [1].

### C. Diagram Blok Arsitektur LPC

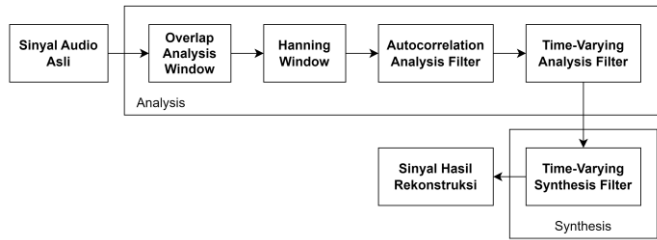


Figure II.1 Diagram Blok LPC [7]

Diagram blok LPC terdiri dari dua blok utama yaitu blok analisis dan blok sintesis. Mula-mula sinyal audio masuk ke overlap analysis window dan hanning window untuk dipartisi ke sampel-sampel dengan lebar window untuk kemudian dianalisis. Selanjutnya, sampel tersebut masuk ke autocorrelation analysis filter dan time-varying analysis filter untuk dilakukan proses matematis sesuai rumus LPC. Hasilnya yang berupa koefisien LPC kemudian dimasukkan ke time-varying synthesis filter untuk merekonstruksi sinyal audio asli bersama dengan sinyal error.

### D. Keterbatasan dan Keunggulan LPC

Keunggulan LPC yaitu adalah dapat mengurangi bitrates dari ucapan, sehingga mengurangi ukuran sinyal yang ditransmisikan. Sinyal yang dikirimkan melalui LPC juga memerlukan bandwidth yang lebih sedikit, sehingga jumlah pengguna dapat ditingkatkan. Metode pengkodean ini juga menggunakan enkripsi data sehingga data tetap aman hingga mencapai tujuan [8]. Meskipun demikian, LPC juga memiliki beberapa kekurangan yaitu kualitas suara hasil rekonstruksi berkurang akibat pengurangan bitrates sinyal ucapan. selanjutnya, LPC merupakan teknik kompresi yang bersifat hilang (lossy), sehingga data dapat memudar jika dikirim ke jarak yang jauh [8].

### E. Penerapan LPC

Secara umum LPC digunakan untuk mengkompresi sinyal audio pada sistem telekomunikasi. LPC juga dapat digunakan untuk mengamankan sinyal audio yang penting karena menggunakan enkripsi. LPC juga digunakan untuk membuat alat yang disebut vocoder yaitu alat untuk mengubah suara penyanyi menjadi suara instrumen musik. Prediktor LPC digunakan dalam codec audio Shorten, MPEG-4 ALS, FLAC, SILK, dan codec audio lossless lainnya [1].

## III. METODOLOGI

Pengerjaan Tugas Besar ini dilakukan dengan membaca sinyal audio, kemudian menyimpannya ke suatu variabel. Sinyal audio tersebut kemudian dilewatkan ke fungsi Encode untuk dilakukan analisis dan fungsi Decode untuk dilakukan sintesis. Hasilnya ditulis kembali menjadi sinyal rekonstruksi

dan sinyal error.

## IV. HASIL DAN ANALISIS

Pada penelitian ini, audio yang akan diolah adalah suara ucapan berisi kesan-pesan peneliti terhadap pelaksanaan mata kuliah EL3010 Pengolahan Sinyal Digital. Spektrum asli sinyal ucapan tersebut adalah sebagai berikut.

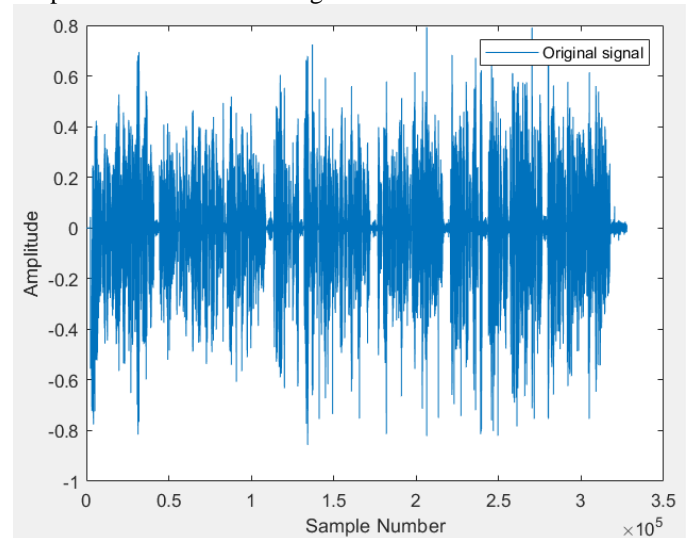


Figure IV.1 Spektrum Audio Original

### A. Analisis Proses Penghasilan Koefisien LPC (Analisis)

LPC atau Linear Predictive Coding adalah salah satu metode pemrosesan sinyal audio dan pemrosesan ucapan (speech) yang digunakan untuk merepresentasikan selubung (envelope) spektrum sinyal ucapan digital menggunakan model prediksi linier. Tahapan pertama pada LPC adalah analisis audio. Tahapan disebut juga sebagai tahap encoding, karena pada tahap ini sinyal audio yang berupa sinyal kontinu diubah menjadi sinyal-sinyal diskrit yang disebut sebagai koefisien LPC. Analisis pada LPC dilakukan dengan melakukan perhitungan secara matematis pada sample-sample sinyal audio yaitu dengan menggunakan persamaan berikut.

$$x(n) = \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + e(n)$$

untuk  $N \gg k$ ,

$$x(n+N) = x_N \cdot a + e(n+N)$$

Sample-sample sinyal audio tersebut dari pemotongan sinyal audio menggunakan teknik yang disebut sebagai OLA atau overlapp-add. Teknik ini mengalikan sample signal dengan window tertentu sehingga akan didapatkan potongan-potongan sinyal dengan lebar berupa lebar window. Pada penelitian ini, digunakan window jenis Hann dengan lebar 0.03 fs. Jenis window Hann dipilih karena tidak memengaruhi frekuensi sinyal secara signifikan dan menghasilkan amplitudo sinyal yang lebih akurat dibanding window lainnya [4]. Hasilnya adalah koefisien LPC yang memiliki jumlah yang sama dengan orde LPC yaitu N. Hal ini menunjukkan bahwa LPC telah melakukan kompresi data audio dari satu step windowing yang

lebar nya 0.03 fs menjadi hanya N buah koefisien.

Koefisien LPC adalah angka-angka yang merepresentasikan magnitude dari tiap potongan sample audio. Koefisien ini yang nantinya akan digunakan sebagai koefisien filter untuk proses sintesis sinyal asli atau inverse filtering. Karena koefisien LPC bersifat merepresentasikan sinyal asli, maka semakin banyak koefisien yang digunakan, sinyal audio hasil sintesis akan semakin mendekati sinyal aslinya. Akan tetapi, koefisien LPC yang terlalu banyak dapat menyebabkan penggunaan memori dan sumber daya yang besar sehingga kompresi audio menjadi tidak maksimal. Hal ini bertentangan dengan fungsi LPC yang seharusnya dapat mengompresi ukuran sinyal menjadi lebih kecil. Selain itu, banyaknya informasi dari koefisien filter dapat memunculkan risiko redundansi informasi yang menyebabkan sinyal hasil sintesis menjadi berbeda dari sinyal asli. Peneliti juga menemukan bahwa semakin banyak koefisien filter yang digunakan, filter sintesis akan lebih menguatkan noise dari sinyal asli. Noise yang muncul pada saat perekaman audio asli seakan-akan dikonsentrasi sehingga terdengar sangat jelas sampai bisa menutupi suara ucapan. Untuk menghindari hal ini, pemilihan orde harus diperhatikan agar koefisien LPC yang dihasilkan tidak terlalu banyak. Pada penelitian ini dipilih orde LPC sebesar 12 karena sudah cukup menghasilkan sinyal yang mirip dengan sinyal asli tanpa suara noise yang terlalu besar. Pemilihan orde ini juga didasari oleh suara vokal manusia yang memiliki resonans harmonics 1,3,5 akibat bentuk tenggorokan manusia yang berbentuk tabung [9]. Sehingga untuk mengambil median nya, dipilih orde berkelipatan 3, dan peneliti memilih orde 12.

#### B. Analisis Proses Rekonstruksi Sinyal Asli Beserta Error (Sintesis)

Tahapan selanjutnya dari LPC yaitu sintesis audio. Tahapan ini disebut juga sebagai tahap encoding karena mengubah koefisien-koefisien LPC yang bernilai diskrit menjadi sinyal audio hasil rekonstruksi yang kontinu. Sintesis dilakukan dengan cara melewati sinyal residu yang didapat dari fungsi `lpcFindPitch` ke filter dengan koefisien filter berupa koefisien LPC. Filter ini juga mempertimbangkan variansi error yang didapat dari fungsi `lpc`. Error pada LPC adalah sinyal yang digunakan untuk me-regenerate sinyal hasil rekonstruksi. Pada penelitian ini, digunakan error berupa white noise karena white noise memiliki spektrum frekuensi yang merata pada seluruh rentang frekuensi, sehingga sinyal output murni dipengaruhi oleh koefisien filter yang berupa koefisien LPC. Error pada LPC tidak memiliki hubungan langsung dengan jumlah koefisien LPC, tetapi koefisien LPC akan memengaruhi sinyal error sehingga didapatkan sinyal hasil rekonstruksi yang mendekati sinyal asli.

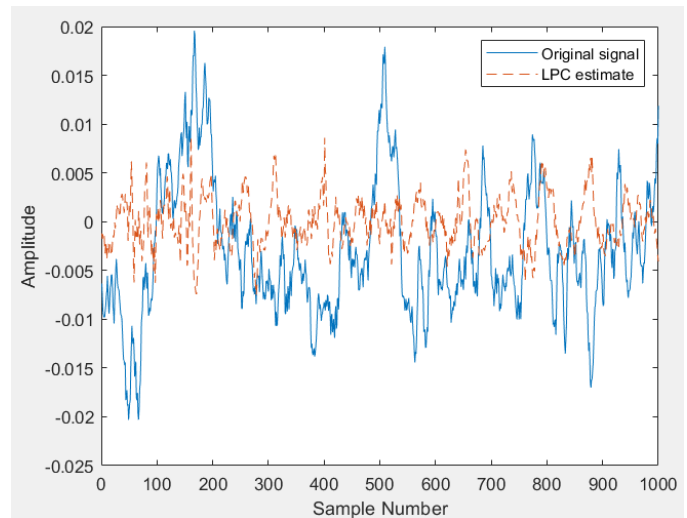


Figure IV.2 Spektrum Audio Hasil Rekonstruksi

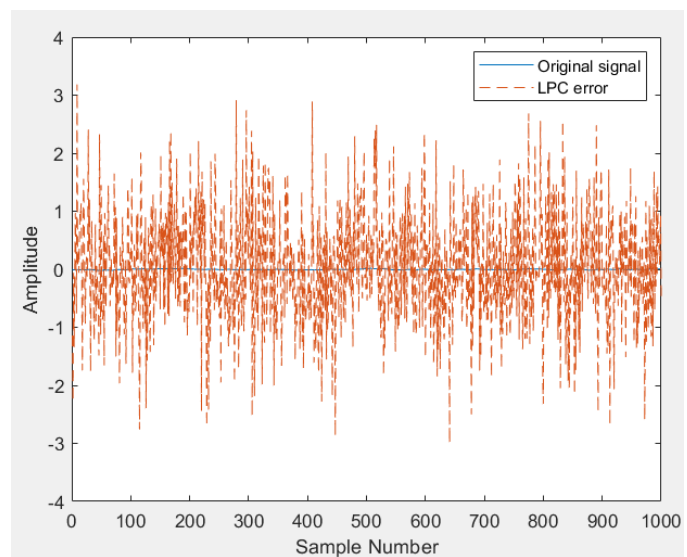


Figure IV.3 Spektrum Sinyal Error

Karena sinyal LPC memiliki fungsi utama untuk mengompresi sinyal audio, dipilih figure of merit (FoM) berupa seberapa besar ukuran sinyal dikompresi serta kualitas suara yang dihasilkan LPC. Gambar III-2 dan III-3 menunjukkan spektrum sinyal hasil rekonstruksi yang dibandingkan dengan spektrum sinyal asli. Terlihat bahwa pada sinyal hasil rekonstruksi masih mempertahankan bentuk selubung (envelope) sinyal asli namun dengan amplitudo yang cukup berbeda. Hal ini disebabkan karena LPC mendeteksi adanya bentuk envelope pada sinyal asli dan merestruksinya kembali. Selain itu, terlihat juga bahwa sinyal hasil rekonstruksi terlihat sedikit ter-delay envelope nya karena adanya pemrosesan yang panjang untuk melakukan analisis dan sintesis sinyal asli. Meskipun begitu, sinyal hasil rekonstruksi masih terdengar jelas pelafalan nya untuk setiap suku kata. Pesan yang ingin disampaikan oleh sinyal asli masih terdengar di sinyal hasil rekonstruksi. Hanya saja amplitudo nya mengecil serta muncul sedikit noise pada background suara. Selain itu, terlihat bahwa ukuran sinyal hasil rekonstruksi jauh lebih kecil dibanding sinyal asli yaitu diperkecil lebih dari delapan kali.

Hal ini menunjukkan bahwa LPC yang dibuat telah bekerja sebagaimana fungsinya yaitu merekonstruksi sinyal dan melakukan kompresi audio.

Spektrum sinyal error yang muncul dari hasil pemrosesan LPC sebenarnya adalah white noise. Terlihat bahwa spektrum error LPC memiliki amplitudo yang cukup besar yaitu lebih dari 1000 kali lipat amplitudo sinyal asli. Hal ini memungkinkan sinyal hasil rekonstruksi untuk memiliki amplitudo yang maksimal dan tidak terlalu kecil.

Proses analisis dan sintesis LPC yang dilakukan pada penelitian ini telah berhasil merekonstruksi suara asli dengan pelafalan setiap kata terdengar jelas serta ukuran yang jauh lebih kecil. Akan tetapi, masih terdapat banyak noise dan terjadi perubahan amplitudo pada sinyal hasil rekonstruksi. Untuk memperbaiki hal ini, dapat dilakukan beberapa perbaikan seperti melakukan perubahan pada orde filter, frekuensi sampling, jenis window yang digunakan, atau mengubah fungsi LPC yang digunakan agar didapatkan audio hasil rekonstruksi yang lebih baik. Selain itu, untuk mengurangi noise juga bisa dilakukan dengan merekam suara audio asli di tempat yang lebih sepi dengan menggunakan voice recorder yang lebih baik, sehingga suara yang terekam hanya suara ucapan dengan suara yang jernih.

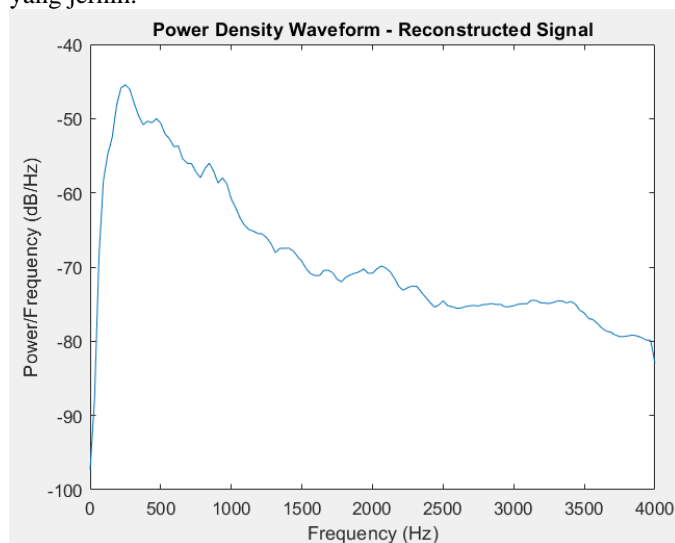


Figure IV.4 Power Density Spectrum of Reconstructed Signal

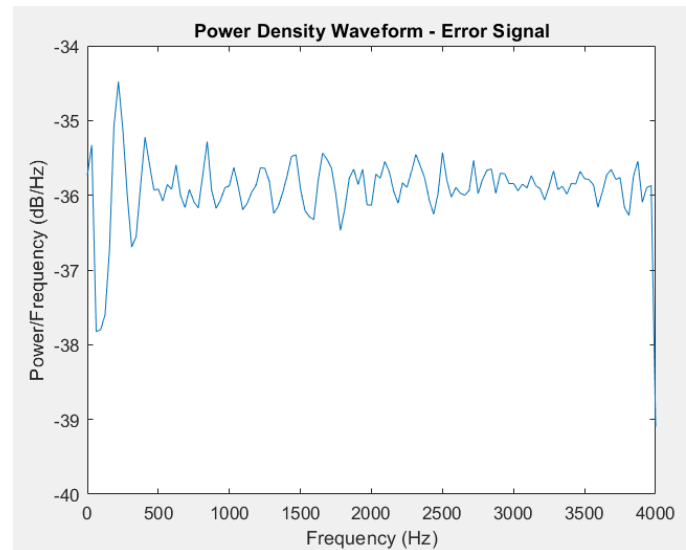


Figure IV.5 Power Density Spectrum of Error Signal

Dari spektrum power density sinyal hasil rekonstruksi dan sinyal error, didapatkan nilai SNR yaitu 16,7372. Angka ini menunjukkan bahwa amplitudo sinyal hasil rekonstruksi masih jauh lebih besar dibanding sinyal noise sehingga sinyal noise tidak akan menutupi suara hasil rekonstruksi. Hasil ini menunjukkan bahwa LPC telah menghasilkan sinyal hasil rekonstruksi yang baik.

### C. Analisis Kode yang Digunakan Untuk Melakukan LPC

Pada kode main Program, terdapat kode untuk melakukan keseluruhan proses LPC mulai dari sintesis sampai analisis. Pada kode ini, mula-mula dilakukan pembacaan sinyal audio yang dilanjutkan dengan me-resampling audio tersebut dengan frekuensi 8 kHz agar periode sampel tidak terlalu kecil. Selanjutnya dibuat koefisien windowing dari window jenis Hann yang digunakan pada fungsi-fungsi berikutnya. Kemudian proses LPC dilanjutkan dengan melakukan analisis menggunakan fungsi `lpcEncode` dengan argumen berupa sinyal asli, orde, dan window. Fungsi ini akan menghasilkan koefisien LPC serta variansi error. Setelah itu, dilakukan pendeteksian pitch atau frekuensi penekanan pada audio menggunakan fungsi `lpcFindPitch`. Selanjutnya dilakukan sintesis sinyal asli menggunakan fungsi `lpcDecode` yang menerima argumen koefisien LPC, variansi error, frekuensi pitch yang sudah dideteksi, koefisien window, dan frekuensi sampling. Hasilnya adalah sinyal yang telah direkonstruksi beserta sinyal error nya. Kedua sinyal ini kemudian ditulis kembali menjadi sinyal audio menggunakan fungsi `audiowrite`. Lalu dilakukan perhitungan SNR untuk keperluan analisis dengan cara membandingkan amplitudo dalam desibel sinyal hasil rekonstruksi dengan sinyal error. Kemudian dilakukan juga perbandingan ukuran data audio sebelum dan sesudah direkonstruksi sehingga dapat dibandingkan ukurannya. Terakhir dilakukan visualisasi plot spektrum sinyal original, sinyal hasil rekonstruksi, dan sinyal error serta plot spektrum power density dari sinyal hasil rekonstruksi dan sinyal error.

Kode `lpcEncode` melakukan analisis sinyal audio asli dengan

cara melakukan stacking window pada sinyal audio asli menggunakan metode OLA atau overlap-add. Sinyal yang telah distack ini kemudian dilakukan perhitungan matematis secara sekuensial dari setiap sampel dengan sinyal masa lalunya dengan memanfaatkan fungsi shifting pada MATLAB yaitu circshift. Dilakukan juga perhitungan variansi sinyal error yang dikembalikan variabel g.

Kode lpcDecode berisi kode untuk melakukan sintesis. Pada kode ini pembuatan sinyal rekonstruksi dibedakan untuk tiap jenis sinyal GFE (power sinyal dengan frekuensi fundamental atau sinyal sumber asli dari tiap segmen window). Untuk GFE yang merupakan power sinyal dilakukan pembangkitan white noise yang disimpan pada variabel src kemudian sinyal hasil rekonstruksi merupakan perkalian window dengan filter yang memiliki numerator 1 dan denominator berupa koefisien LPC untuk tiap sampel. Sinyal yang dimasukkan ke dalam filter tersebut adalah akar GFE yang dikalikan dengan white noise. Kemudian sinyal error diisi dengan white noise. Untuk sinyal GFE berupa power sinyal fan frekuensi pitch. Dilakukan src diset dengan zeros untuk frekuensi pitch dan diset sebagai white noise untuk frekuensi lainnya. Sinyal rekonstruksi merupakan hasil pemfilteran dengan koefisien filter yang sama seperti GFE sebelumnya dengan sinyal yang diinput ke signal adalah src. Sinyal error juga berisi src yang sesuai. Kondisi selanjutnya yaitu ketika GFE merupakan sinyal error, maka sinyal hasil rekonstruksi adalah GFE yang dilewatkan ke filter dengan koefisien nya berupa koefisien LPC.

## V. SIMPULAN

Linear Predictive Coding merupakan salah satu teknik pengolahan sinyal digital yang memanfaatkan model prediksi linear untuk menganalisis suatu sinyal audio. LPC dilakukan dengan melakukan kalkulasi matematis pada sampel-sampel

sinyal audio yang telah dikalikan dengan jenis window tertentu. Hasil analisis LPC berupa koefisien LPC yang merepresentasikan amplitud signal pada tiap segmen window. Koefisien ini kemudian digunakan untuk membuat filter yang dapat merekonstruksi sinyal asli yang proses nya disebut sebagai sintesis. Hasil sintesis LPC berupa sinyal rekonstruksi audio asli yang memiliki envelope yang sama dengan sinyal asli. LPC memiliki error yang merupakan sinyal yang akan di-regenerate menjadi sinyal rekonstruksi. Ukuran sinyal audio hasil rekonstruksi LPC juga lebih kecil dibanding sinyal asli karena sinyal ini dibentuk oleh koefisien-koefisien yang didapat dari sampel audio, kemudian digunakan untuk merekonstruksi sinyal asli.

## REFERENSI

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_predictive\\_coding](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_predictive_coding), (accessed December 2, 2023)
- [2] <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/english/phonetics/formant/>, (accessed December 2, 2023)
- [3] Deng, Li; Douglas O'Shaughnessy (2003). Speech processing: a dynamic and optimization-oriented approach. Marcel Dekker. pp. 41–48. ISBN 978-0-8247-4040-5.
- [4] <https://community.sw.siemens.com/s/article/window-types-hanning-flattop-uniform-tukey-and-exponential#:~:text=Hanning%20windows%20are%20often%20used,th,e%20effects%20of%20other%20windows>, (accessed December 2, 2023)
- [5] <https://ccrma.stanford.edu/~hskim08/lpc/>, (accessed December 4, 2023)
- [6] <https://support.ircam.fr/docs/AudioSculpt/3.0/co/LPC.html>, (accessed December 4, 2023)
- [7] <https://www.mathworks.com/help/dsp/ug/lpc-analysis-and-synthesis-of-speech.html>, (accessed December 4, 2023)
- [8] Raja, Mohit Narayanbhai, et al. (2015). Linear Predictive Coding. International Journal Of Engineering Sciences & Research technology. ISSN: 2277-9655
- [9] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Music/vocres.html>, (accessed December 4, 2023)