

Analisis Spektral & Dekomposisi Wavelet

Domain Frekuensi, Transformasi Fourier (FFT), dan DWT untuk Sinyal Transien Elektro

Ir. Novalio Daratha, S.T., M.Sc., Ph.D.

Program Studi Teknik Elektro – Fakultas Teknik
Universitas Bengkulu

Minggu 9 / Semester Ganjil 2026

Capaian Pembelajaran (Sub-CPMK 8)

Mahasiswa mampu menganalisis sinyal deret waktu pada domain frekuensi (FFT, PSD) dan domain waktu-frekuensi (*Wavelet Transform*) untuk mendeteksi harmonisa dan anomali transien gangguan sistem tenaga.

- 1 Keterbatasan Domain Waktu Murni
- 2 Transformasi Fourier Diskrit (DFT / FFT)
- 3 Power Spectral Density (PSD)
- 4 Short-Time Fourier Transform (STFT)
- 5 Discrete Wavelet Transform (DWT)
- 6 Studi Kasus: Diagnostik Motor & Denoising

Transformasi Fourier Diskrit (DFT & FFT)

Memetakan sinyal deret waktu $x[n]$ berhingga ke domain frekuensi diskrit $X[k]$:

Persamaan DFT & Inverse DFT

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

Aplikasi di Teknik Elektro

Deteksi frekuensi harmonisa beban non-linier (inverter, penyearah, motor) dan perhitungan THD (*Total Harmonic Distortion*).

Dilema Fourier & Keunggulan Wavelet

Kelemahan Fourier Standard (FFT)

- Mengasumsikan sinyal periodik stasioner abadi.
- **Hilangnya Lokalisasi Waktu:** FFT tahu frekuensi apa yang ada, tetapi *tidak tahu kapan* frekuensi itu terjadi.

Solusi: Discrete Wavelet Transform (DWT)

- Menggunakan fungsi basis gelombang singkat (*wavelet*) yang terlokalisasi di waktu dan frekuensi.
- Sangat unggul mendeteksi *voltage sag*, sambaran petir, dan transien gangguan hubung singkat.

Dekomposisi Wavelet Sub-Band Bertingkat

Sinyal dilewatkan melalui filter lolos-rendah (*Low-Pass*) dan lolos-tinggi (*High-Pass*):

Koefisien Aproksimasi & Detail

- **Aproksimasi** (cA_j): Informasi frekuensi rendah / tren sinyal utama.
- **Detail** (cD_j): Informasi frekuensi tinggi / komponen transien & derau.

Strategi Denoising (Thresholding)

Detail yang sangat kecil di bawah ambang Donoho dihilangkan (*Soft Thresholding*):

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln(N)} \quad (3)$$

Implementasi Python: DWT Denoising Sinyal Arus

```
import pywt
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Sinyal arus transien dengan derau
signal = df['current_raw'].values

# Dekomposisi Wavelet Daubechies 4 (db4) Level 3
coeffs = pywt.wavedec(signal, 'db4', level=3)
cA3, cD3, cD2, cD1 = coeffs

# Hitung Threshold Universal Donoho
sigma = np.median(np.abs(cD1)) / 0.6745
threshold = sigma * np.sqrt(2 * np.log(len(signal)))

# Terapkan Soft-Thresholding pada komponen detail
clean_coeffs = [cA3] + [pywt.threshold(c, threshold, mode='soft') for c in [cD3, cD2, cD1]]

# Rekonstruksi Sinyal Bersih (Inverse DWT)
clean_signal = pywt.waverec(clean_coeffs, 'db4')
```

Rangkuman & Persiapan Minggu ke-10

Poin Kunci Minggu 9

- FFT mengekstraksi spektrum frekuensi dominan untuk analisis kualitas daya stasioner.
- DWT memberikan resolusi multi-skala waktu-frekuensi yang sangat ideal untuk sinyal transien dinamis.
- Dekomposisi wavelet menjadi tahap pra-pemrosesan fitur yang sangat ampuh sebelum model ML/DL.

Materi Minggu Depan (Minggu ke-10)

Feature Engineering & Machine Learning (XGBoost/LightGBM): Rekayasa fitur lag, statistik jendela bergerak, dan peramalan beban jangka pendek.

Terima Kasih

Pertanyaan & Diskusi Analisis Spektral & Wavelet

Laboratorium Sistem Tenaga & Komputasi Cerdas
Jurusan Teknik Elektro – Universitas Bengkulu