

SKRIPSI

**ANALISIS KOHERENSI PERMINTAAN ENERGI LISTRIK TERHADAP
VARIABEL METEOROLOGI DI KOTA MAKASSAR DENGAN
PENDEKATAN WAVELET**

Disusun dan diajukan oleh:

DEWI MAHZYA FORTUNA

D041 171 501

*Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan
Program Strata Satu Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik*

Universitas Hasanuddin

Makassar



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2021

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KOHERENSI PERMINTAAN ENERGI LISTRIK TERHADAP VARIABEL METEOROLOGI DI KOTA MAKASSAR DENGAN PENDEKATAN WAVELET

Disusun oleh:

Dewi Mahzya Fortuna
D041 171 501

Telah diperiksa dan disetujui untuk disidangkan pada tanggal 17 Juni 2021.

Disetujui oleh:

Pembimbing I


Yusri Svam Akil, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19770322 200501 1 001

Pembimbing II


Ir. Hasniaty A, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741205 200012 2 001

Mengetahui,

Departemen Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Dewi Mahzya Fortuna, M.T
NIP. 19991026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA TULIS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dewi Mahzya Fortuna
Nim : D041 171 501
Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul

ANALISIS KOHERENSI PERMINTAAN ENERGI LISTRIK TERHADAP VARIABEL METEOROLOGI DI KOTA MAKASSAR DENGAN PENDEKATAN WAVELET

Ini adalah benar-benar karya saya sendiri dan saya tidak melakukan plagiarism atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika yang berlaku dalam tradisi keilmuan. Atas pernyataan ini saya siap menerima tindakan/sanksi yang dijatuhkan kepada saya apabila dikemudian ditemukan pelanggaran atas etika akademik dalam karya saya ini, atau ada klaim terhadap keaslian karya saya ini.

Makassar, 1 Juli 2021

Yang Membuat Pernyataan,



Dewi Mahzya Fortuna

D041171501

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas seluruh rahmat-Nya yang tidak pernah berhenti, begitupun selama penyusunan tugas akhir ini. Tujuan utama dari penulisan tugas akhir ini tentu sebagai syarat menutup Program Strata-1 Departemen Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin; tetapi hal tersebut tidak menjadi alasan untuk mengkompromi kualitas dari tugas akhir ini. Kendati demikian, tidak menutup kemungkinan masih terdapat banyak kekeliruan dari tugas akhir, semoga seluruh pembaca dapat memaklumi dan mengambil pelajaran dari kesalahan tersebut.

Secara singkat, tugas akhir ini mendemonstrasikan pemanfaatan metode WTC untuk mengobservasi pengaruh permintaan energi listrik harian di Kota Makassar terhadap variabel meteorologi (temperatur, kelembapan, radiasi matahari, dan kecepatan angin). Lebih lanjut penelitian ini juga melakukan observasi variabilitas dari setiap variabel yang diobservasi menggunakan pendekatan CWT. Kelebihan pendekatan wavelet dalam merepresentasikan hasilnya diharapkan mampu memberikan informasi baru mengenai bagaimana dinamika korelasi antara permintaan energi listrik dan variabel meteorologi di Kota Makassar.

Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat membawa manfaat bagi siapapun yang membacanya. Kepada seluruh pihak yang sudah saya sita waktu dan tenaganya demi terselesaikannya tugas akhir ini, terima kasih banyak, saya berhutang banyak pada kalian.

Dewi Mahzya Fortuna

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN.....	xii
BAB 1	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
1.6 Metode Penelitian	6
BAB 2.....	8
2.1 Karakteristik Permintaan energi listrik.....	8
2.2 Variabel Meteorologi.....	10
2.3 Transformasi Wavelet.....	12
BAB 3.....	26
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	26
3.2 Alat dan Bahan	26
3.3 Jenis Pengambilan Data	30
3.4 Alur Penelitian	31
3.5 Tahap Simulasi Program.....	32

BAB 4.....	37
4.1 Deret Waktu Permintaan Energi Listrik dan Variabel Meteorologi di Kota Makassar	37
4.2 Deret <i>Return</i> Permintaan Energi Listrik dan Variabel Meteorologi di Kota Makassar	40
4.3 Dekomposisi Sinyal dengan Pendekatan MODWT	42
4.4 Kovarian dan Korelasi Wavelet.....	47
4.5 Hasil Simulasi CWT (<i>Continuous Wavelet Transform</i>)	54
4.6 Hasil Simulasi WTC	64
BAB 5.....	78
5.1 Kesimpulan	78
5.2 Saran	79
DAFTAR PUSTAKA.....	80
LAMPIRAN	84

ABSTRAK

Variabel meteorologi patut untuk diobservasi karena memegang kunci signifikan terhadap perilaku permintaan energi listrik di setiap tempat termasuk di Kota Makassar. Oleh karena itu, mengeksplorasi bagaimana variabel meteorologi mempengaruhi pola permintaan listrik sangat penting dalam menyediakan pasokan dan strategi permintaan listrik yang efisien di masa depan. Penelitian ini mengusulkan metodologi wavelet untuk mengetahui karakteristik kebutuhan listrik di Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan sebagai representasi beban listrik di Indonesia terhadap beberapa variabel meteorologi di bawah lingkungan tropis yaitu suhu, kelembapan, radiasi matahari, dan kecepatan angin. Metode yang diterapkan pada data deret waktu harian selama tiga tahun (2018-2020) adalah continuous wavelet transform (CWT) untuk mengeksplorasi volatilitas masing-masing variabel, dan wavelet transform coherence (WTC) untuk menilai korelasi antar variabel yang dipertimbangkan. Dari hasil analisis ditemukan saling ketergantungan yang signifikan pada periode 2-64 hari di setiap pergantian tahun antara suhu udara, kelembapan, dan radiasi matahari terhadap permintaan listrik selama waktu pengamatan. Tidak seperti parameter lain, intensitas koherensi yang kurang ditemukan antara angin dan beban meskipun wilayah koherensi sangat terlokalisasi. Hasil ini menyajikan pemahaman yang luas tentang dinamika korelasi antara variabel-variabel yang diamati pada ruang frekuensi waktu yang berbeda, yang tentunya akan membantu dalam meningkatkan strategi perencanaan dan peramalan penyedia listrik untuk memenuhi kebutuhan listrik sepanjang waktu di Kota Makassar.

Kata kunci: Permintaan listrik, Variabel meteorologi, Korelasi, Wavelet, Kota Makassar.

ABSTRACT

Meteorological variables are worth observing as they probably hold a significant key toward electricity consumption behavior in one place including in Kota Makassar. Therefore, exploring how meteorological variables affect electricity demand patterns is crucial in providing an efficient electricity supply and demand strategy in the future. This paper proposes a wavelet methodology to investigate characteristics of electricity demand in Makassar, South Sulawesi Province towards several meteorological variables under tropical environment namely temperature, humidity, solar radiation, and wind speed. The methods applied to the daily time-series data for three years (2018-2020) are continuous wavelet transform (CWT) to explore each variable's volatility, and wavelet transform coherence (WTC) to assess the correlation between among considered variables. From analysis, significant interdependence was found for a periodicity of 2-64 days at every turn of the year between air temperature, humidity, and solar radiation towards the electricity demand throughout the observation time. Unlike other parameters, less coherency intensity was discovered between wind and the load although the coherence region is highly localized. These results present a broad understanding of the correlation dynamics between observed variables at different time-frequency spaces, which will be helpful to improve the planning and forecasting strategies for power utility to meet electricity demand from time to time in Indonesia.

Keywords: Electricity demand, Meteorological variables, Correlation, Wavelet, Makassar.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Deret $yt = \cos 2\pi P1 + \cos 2\pi P2 + \epsilon t$	14
Gambar 2.2 <i>Power Spectral Density</i>	14
Gambar 2.3 Spektrum Daya Wavelet	14
Gambar 2.4 Jenis-Jenis <i>Mother Wavelet</i>	17
Gambar 2.5 Analisis Multiresolusi dengan Transformasi Wavelet.....	19
Gambar 2.6 Gelombang Wavelet.....	20
Gambar 2.7 Lingkaran Perbedaan Fasa	24
Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian	32
Gambar 4.1 Deret Waktu Variabel Penelitian	38
Gambar 4.2 Deret <i>Return</i> Variabel Penelitian	41
Gambar 4.3 Dekomposisi MODWT Permintaan Energi Listrik Level J=6	44
Gambar 4.4 Dekomposisi MODWT Temperatur dengan Level Wavelet J=6	45
Gambar 4.5 Dekomposisi MODWT Kelembapan dengan Level Wavelet J=6.....	45
Gambar 4.6 Dekomposisi MODWT Radiasi Matahari Level Wavelet J=6	46
Gambar 4.7 Dekomposisi MODWT Kecepatan Angin Level Wavelet J=6.....	46
Gambar 4.8 Kovariansi dan Korelasi Permintaan Energi Listrik dan Temperatur	48
Gambar 4.9 Kovariansi dan Korelasi Permintaan Energi Listrik dan Kelembapan	50
Gambar 4.10 Kovariansi dan Korelasi Permintaan energi listrik dan Radiasi Matahari.....	52

Gambar 4.11 Kovariansi dan Korelasi Permintaan energi listrik dan Kecepatan Angin	54
Gambar 4.12 Indeks Intensitas Pergerakan.....	56
Gambar 4.13 Spektrum CWT Permintaan Energi Listrik Tahun 2018-2020	56
Gambar 4.14 Spektrum CWT Temperatur Tahun 2018-2020.....	59
Gambar 4.15 Spektrum CWT Kelembapan Tahun 2018-2020	61
Gambar 4.16 Spektrum CWT Radiasi Matahari Tahun 2018-2020	62
Gambar 4.17 Spektrum CWT Kecepatan Angin Tahun 2018-2020.....	63
Gambar 4.18 WTC Permintaan Energi Listrik dan Temperatur.....	66
Gambar 4.19 WTC Permintaan Energi Listrik dan Kelembapan	71
Gambar 4.20 WTC Permintaan Energi Listrik dan Radiasi Matahari.....	74
Gambar 4.21 WTC Permintaan Energi Listrik dan Kecepatan Angin	77

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 10 Daftar Gardu Induk yang Diobservasi beserta Penyulangannya Tahun 2018-2020	27
Tabel 4.1 Nilai Maksimum dan Minimum Data Aktual.....	39
Tabel 4.2 Skala Wavelet	43
Tabel 4.4 Arah Panah dan Representasinya.....	67
Tabel 4.5 Korelasi Permintaan Energi Listrik dan Temperatur.....	68
Tabel 4.6 Korelasi Permintaan Energi Listrik dan Kelembapan	72
Tabel 4.7 Korelasi Permintaan Energi Listrik dan Radiasi Matahari	75

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang / Singkatan	Arti dan Keterangan
DWT	Discrete Wavelet Transform
CWT	Continuous Wavelet Transform
WTC	Wavelet Transform Coherence
MODWT	Maximum Overlap Discrete Wavelet Transform
GDP	Gross Domestic Product

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Investigasi empiris akan konsumsi dan permintaan energi telah menjadi salah satu topik yang paling banyak diteliti, mengingat spesifikasi dari konsumsi energi sudah menjadi variabel yang berkontribusi paling besar dalam memprediksi dan memproyeksikan permintaan energi di masa yang akan datang. Energi merupakan instrumen paling vital dalam pembangunan sosial ekonomi dan merupakan salah satu komoditas strategis terpenting sebuah negara. Konsumsi listrik selalu tumbuh lebih tinggi dibandingkan jenis sumber energi yang lain. Pengadaan listrik yang didominasi dari pembakaran bahan bakar fosil faktanya bertanggung jawab sekitar 50% dari total emisi karbon dioksida yang tersebar di seluruh dunia / atmosfer bumi. Sejumlah faktor ekonomi hingga lingkungan tersebut menjadikan hasil analisis dan karakteristik permintaan energi di sebuah negara sebagai basis yang kuat bagi pemerintah dalam merancang sebuah regulasi terkait strategi konservasi lingkungan hingga menetapkan harga komersil listrik di negaranya masing-masing.

Pertumbuhan populasi di suatu wilayah merupakan salah satu indikator yang mendorong peningkatan aktivitas masyarakat setempat. Penggunaan energi terutama listrik yang sudah mendominasi hampir seluruh aktifitas manusia mengindikasikan bahwa, peningkatan populasi di suatu wilayah pasti diikuti dengan peningkatan konsumsi listrik. Selain populasi, terdapat sejumlah variabel

yang dikenal sebagai penggerak permintaan energi listrik. Dari sudut pandang sosial ekonomi, sejumlah variabel penggerak permintaan energi listrik diantaranya termasuk GDP (*Gross Domestic Product*), harga listrik, tingkat penyerapan tenaga kerja, ruang hunian, penerapan skema label energi dan penerapan standar efisiensi energi (Chen, 2017). Variabel meteorologi seperti temperatur, kelembapan, solar radiasi, hingga kecepatan angin juga merupakan variable penggerak permintaan energi listrik (Avdakovic, et al., 2013).

Konsumsi listrik jelas akan mengalami peningkatan di masa yang akan datang. Berangkat dari hal ini, studi terkait permintaan energi listrik perlu dilakukan untuk memastikan bahwa sistem tenaga listrik mampu melayani kebutuhan beban secara efektif sepanjang waktu selama pengoperasiannya. Karakteristik permintaan energi listrik merupakan salah satu studi utama terkait permintaan energi listrik yang umumnya dilakukan untuk mengetahui pendorong utama konsumsi listrik suatu wilayah, dan seberapa jauh pengaruhnya di bawah kondisi tertentu. Kondisi meteorologi seperti temperatur, kelembapan, solar radiasi dan kecepatan angin dikenal fluktuatif dan beragam disetiap wilayah. Hal ini mengindikasikan pentingnya untuk menyelidiki, dan mengukur pengaruh parameter meteorologi terhadap karakteristik permintaan energi listrik disetiap wilayah, termasuk di Kota Makassar.

Beberapa tahun terakhir, metode analisis wavelet mulai gemar digunakan oleh peneliti dalam melakukan pengolahan sinyal dan mengobservasi hubungan antara dua variabel. Penelitian (González-Concepción, et al., 2012) menggunakan transformasi wavelet untuk menyelidiki hubungan antara hipotek dan GDP di

Spanyol. Penelitian (Grinsted, et al., 2014) mengaplikasikan transformasi wavelet kedalam deret waktu geofisika. Penelitian (Wisha, et al., 2018) menggunakan wavelet untuk menyelidiki korelasi antara temperatur permukaan laut dan zonal komponen angin di perairan Sumatera Barat.

Transformasi wavelet merupakan analisis multiresolusi yang mampu merepresentasikan sinyal dalam ruang waktu dan frekuensi. Teknik analisis wavelet hadir dalam dua kelas transformasi: CWT (*Continuous Wavelet Transform*) dan DWT (*Discrete Wavelet Transform*). DWT umumnya digunakan untuk reduksi *noise* dan kompresi data, sedangkan CWT digunakan untuk mengubah deret waktu ke dalam ruang frekuensi dan waktu (Bonkaney, et al., 2019). Kemampuan analisis CWT dalam melacak perubahan transisi dalam lintas waktu seakan menjawab keterbatasan yang dimiliki oleh metode analisis spektral konservatif seperti transformasi Fourier yang tidak mampu merepresentasikan dan melacak informasi dalam dinamika *transient*. CWT bekerja dengan menghitung konvolusi sebuah sinyal dengan sebuah jendela modulasi (*mother wavelet*) pada setiap waktu dengan skala yang diinginkan.

WTC (*Wavelet Transform Coherence*) merupakan bagian dari kelas transformasi CWT. Analisis WTC mampu melacak dan merepresentasikan tingkat korelasi antara dua variabel dalam setiap interval waktu dari periode yang ditinjau. Representasi hasil analisis WTC menggunakan indikator angka berkisar dari 0 hingga 1, yang juga dikenal sebagai koefisien korelasi. Semakin dekat nilainya dengan satu, semakin tinggi korelasi kedua seri tersebut.

Analisis regresi dikenal sebagai metode yang umum digunakan untuk mengobservasi hubungan dan tingkat korelasi dari dua variabel yang ditinjau. Namun, metode ini hanya mampu memberikan gambaran umum mengenai hubungan dan kekuatan korelasi antara dua variabel atau lebih yang sedang ditinjau. Hubungan antara dua variabel yang ditinjau dalam periode waktu tertentu direpresentasikan dalam sebuah nilai koefisien regresi. Kondisi ini mengartikan bahwa, metode regresi tidak memberikan informasi akan dinamika tingkat korelasi yang terjadi dalam setiap interval waktu periode yang ditinjau.

Penelitian sebelumnya (Akil, et al., 2014) telah mengobservasi hubungan parameter meteorologi dibawah iklim tropis terhadap karakteristik permintaan energi menggunakan analisis regresi. Pendekatan regresi pada penelitian tersebut membuat hilangnya informasi akan dinamika tingkat korelasi yang terjadi dalam setiap interval waktu yang ditinjau. Dari permasalahan tersebut maka dilakukan penelitian tugas akhir dengan judul **“ANALISIS KOHERENSI PERMINTAAN ENERGI LISTRIK TERHADAP VARIABEL METEOROLOGI DI KOTA MAKASSAR DENGAN PENDEKATAN WAVELET”**

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang menjadi landasan tugas akhir ini, maka permasalahan yang akan menjadi objek penelitian adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara mengaplikasikan metode WTC dalam mengukur koherensi antara permintaan energi listrik terhadap variabel meteorologi di Kota Makassar?

2. Bagaimana korelasi antara permintaan energi listrik terhadap variabel meteorologi dalam ruang frekuensi waktu di Kota Makassar?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang hendak dicapai dari penelitian ini antara lain:

1. Mengetahui cara mengaplikasikan metode WTC dalam mengukur koherensi antara permintaan energi listrik terhadap variabel meteorologi.
2. Menganalisis korelasi permintaan energi listrik terhadap variabel meteorologi (temperatur, kelembapan, radiasi matahari, dan kecepatan angin) terhadap dalam ruang frekuensi waktu di Makassar.

1.4 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil akhir yang lebih terperinci dan terfokus, maka permasalahan yang akan dibahas akan dibatasi dengan ketentuan berikut:

1. WTC dipilih sebagai metode untuk mengetahui kekuatan koherensi antara variabel meteorologi dan permintaan energi listrik yang diamati.
2. Data permintaan energi listrik Kota Makassar tahun 2018 – 2020 diambil dari PLN UP2D (Unit Pelaksana Pengatur Distribusi) Makassar.
3. Data variabel meteorologi (temperatur, kelembapan, radiasi matahari, dan kecepatan angin) diambil dari Pusat Database BMKG.
4. Data permintaan energi listrik Kota Makassar dibatasi dengan 10 gardu induk yang diobservasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat seperti yang diuraikan berikut ini :

1. Bagi institusi, penelitian ini dapat berguna sebagai referensi ilmiah dalam pengembangan penelitian akan pengaruh variabel meteorologi terhadap permintaan listrik di suatu wilayah.
2. Bagi peneliti, penelitian ini memiliki manfaat untuk menambah wawasan dan menjadi sumber data dalam menganalisis pengaruh variabel meteorologi terhadap permintaan listrik dalam ruang frekuensi waktu di Makassar menggunakan pendekatan WTC.

1.6 Metode Penelitian

Untuk menghasilkan tugas akhir yang komprehensif, maka dalam penelitian akan digunakan metode sebagai berikut:

1. Penelitian kepustakaan

Penelitian kepustakaan dilakukan untuk membentuk landasan teori yang konkrit berdasarkan literatur terkait, sebelum melakukan implementasi dan pengujian secara langsung.

2. Pengujian dan analisis

Kegiatan pengujian dan analisis dimaksudkan untuk memperoleh data-data aktual yang merupakan hasil pengukuran dan observasi secara langsung.

3. Diskusi dan konsultasi

Melakukan dialog secara langsung kepada pembimbing dan pihak-pihak yang berkompeten di bidang terkait untuk mendapatkan pengetahuan mengenai penelitian yang dilakukan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Permintaan energi listrik

Energi merupakan instrumen paling vital dalam pembangunan sosial ekonomi dan telah menjadi salah satu komoditas strategis terpenting sebuah negara. Peran energi sebagai input yang telah mendominasi nyaris seluruh aktifitas produksi dan konsumsi, membuatnya menjadi indikator utama terhadap perkembangan ekonomi sebuah negara. Peran energi mendorong produktifitas ekonomi, perkembangan industri dan merupakan pusat operasi dari kegiatan ekonomi modern (Asghar, 2008). Energi dalam berbagai bentuknya, penting untuk menyediakan semua barang dan jasa yang terkait dengan pencapaian target pembangunan manusia, dan memainkan peran kunci untuk mengatasi kemiskinan. Dalam hal dimensi ekonomi dari perkembangan berkelanjutan, energi merupakan penggerak utama dari pertumbuhan ekonomi makro (Najam & Cleveland, 2003).

Permintaan listrik selalu tumbuh lebih tinggi dibandingkan jenis sumber energi yang lain. Negara berkembang seperti Amerika Tengah dan Indonesia telah menyaksikan pertumbuhan konsumsi tenaga listrik yang jauh lebih signifikan dibandingkan dengan negara-negara maju. Kota Makassar beberapa tahun terakhir sedang aktif melakukan perbaikan infrastruktur hingga pelayanan publik, kemudian diikuti tingkat urbanisasi yang terus meningkat. Tentunya kondisi ini juga mendorong peningkatan permintaan energi listrik dari waktu ke waktu. Peran listrik sangat vital dalam menopang dan mendorong produktivitas masyarakat

mengindikasikan tingginya urgensi setiap wilayah untuk memastikan sistem operasi tenaga listriknya mampu melayani kebutuhan beban secara efisien di masa yang akan datang.

Berbagai studi mengenai permintaan energi listrik dapat dilakukan untuk mengukur dan memprediksi kemampuan operasi sistem tenaga listrik di suatu wilayah. Karakteristik permintaan energi listrik merupakan salah satu studi terkait permintaan energi listrik yang umumnya dilakukan untuk mengetahui pendorong utama konsumsi listrik suatu wilayah, dan seberapa jauh pengaruhnya di bawah kondisi tertentu.

Pola konsumsi listrik di setiap wilayah tersusun dari sejumlah variabel pendorong permintaan energi listrik. Karakteristik setiap wilayah yang berbeda-beda tentunya menyebabkan karakteristik permintaan energi listrik yang beragam pula. Berdasarkan sudut pandang sosial ekonomi, sejumlah variabel yang berperan akan pembentukan pola konsumsi listrik diantaranya termasuk GDP, harga listrik, tingkat penyerapan tenaga kerja, ruang hunian, temperatur, penerapan skema label energi dan penerapan standar efisiensi energi (Chen, 2017). Konsumsi listrik merupakan sektor yang teridentifikasi cukup sensitif terhadap perubahan iklim karena dipengaruhi langsung oleh variabel cuaca (Bonkaney, et al., 2019). Kondisi geografi setiap wilayah yang unik dan beragam menjadikan studi mengenai bagaimana pengaruh variabel meteorologi (temperatur, kelembapan, solar radiasi, hingga kecepatan angin) terhadap karakteristik permintaan energi listrik banyak dilakukan. Seperti penelitian (Akil, et al., 2014) yang melakukan studi untuk

mengetahui seberapa besar pengaruh variabel meteorologi di bawah iklim tropis terhadap karakteristik permintaan energi listrik di Indonesia.

Hasil studi terkait karakteristik permintaan energi listrik dapat digunakan untuk menetapkan strategi dalam mengelola sistem tenaga listrik secara efektif dan mampu berkontribusi sebagai basis dalam merancang regulasi terhadap pengoperasian sistem tenaga listrik setempat.

2.2 Variabel Meteorologi

Variabel meteorologi juga dikenal sebagai variabel cuaca. Cuaca adalah nilai aktual sesaat akan keadaan atmosfer di suatu wilayah tertentu pada bumi yang perubahannya dapat terjadi dalam kurun waktu yang relatif singkat (<1 jam – 24 jam). Cuaca adalah keadaan atmosfer, yang menggambarkan mana kondisi atmosfer itu. Basah atau kering, tenang atau badai, cerah atau berawan. Cuaca didorong oleh perbedaan tekanan udara, temperatur, dan kelembapan antara satu tempat dan tempat lain. Perbedaan ini dapat terjadi karena sudut Matahari di tempat tertentu yang bervariasi menurut garis lintang dan letak geografis setiap wilayah yang beragam. Di Indonesia, BMKG (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika) bertanggung jawab untuk terus memantau, menganalisis, dan menyampaikan informasi mengenai variabel meteorologi kepada publik. Revolusi peradaban yang terjadi beberapa tahun belakangan faktanya memudahkan masyarakat untuk mengakses informasi terkait kondisi meteorologi di seluruh belahan dunia.

Setiap wilayah memiliki karakteristik cuaca yang beragam, hal ini didorong oleh fakta bahwa cuaca tersusun dari sejumlah unsur-unsur yang mempengaruhi pembentukannya. Sejumlah unsur-unsur yang mempengaruhi kondisi meteorologi di suatu wilayah adalah

- **Penerimaan Radiasi Surya**

Radiasi surya dikenal sebagai gelombang elektromagnetik yang dibangkitkan dari sejumlah proses fusi nuklir pada proses mengubah hidrogen menjadi helium. Umumnya, radiasi surya yang sampai ke puncak atmosfer sebesar 1360 W/m^2 , namun yang sampai ke permukaan bumi hanya setengah dari angka tersebut. Hal ini dikarenakan setengah proporsi dari angka tersebut akan kembali dipantulkan ke angkasa oleh awan, menjadi partikel padat pada atmosfer, dan lain-lain. Radiasi surya yang berhasil sampai ke permukaan bumi dikenal dengan istilah *insolation*. Daya serap dinotasikan sebagai kemampuan permukaan untuk menyerap energi cahaya yang diterimanya, sedangkan daya pantul diindikasikan sebagai kemampuan permukaan untuk memantulkan cahaya yang diterimanya. Faktor yang mempengaruhi penerimaan radiasi surya di bumi adalah jarak antara matahari dan bumi, intensitas radiasi surya, panjang hari dan atmosfer.

- **Temperatur**

Temperatur adalah kondisi permukaan bumi di wilayah tertentu dan biasanya diukur dalam derajat Celcius ($^{\circ}\text{C}$) atau derajat Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$). Ini secara tradisional diukur menggunakan merkuri dalam termometer

kaca, dengan termokopel dan termistor. Wilayah yang berada disekitar lintas garis ekuator umumnya memiliki temperatur yang tinggi.

- Kelembapan Udara

Kelembapan adalah jumlah kelembapan di udara dan dinyatakan sebagai persentase kelembapan relatif (% RH). Higrometer berisi umbi basah dan kering digunakan untuk menghitung kelembapan; metode alternatif termasuk higrometer rambut dan perangkat kapasitansi (Skilling & . Munro, n.d.). Temperatur yang tinggi mengindikasikan bahwa kemampuannya untuk mengandung uap air juga semakin tinggi.

- Kecepatan Angin

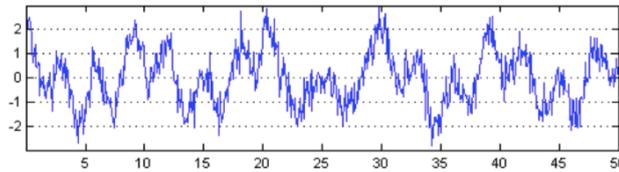
Kecepatan angin menggambarkan kecepatan pergerakan angindi wilayah tertentu dan diukur dalam meter per detik (m/s). Termometer umumnya digunakan untuk mengukur kecepatan udara (Skilling & . Munro, n.d.), sedangkan barometer umumnya digunakan untuk mengukur tekanan udara.

2.3 Transformasi Wavelet

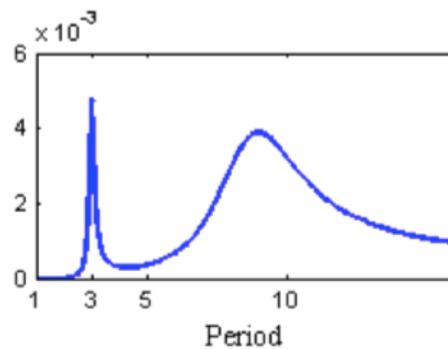
Wavelet dikenal sebagai gelombang mini (*small wave*) yang mempunyai kapabilitas untuk menganalisis data dalam ruang waktu dan frekuensi. Transformasi wavelet merupakan analisis multi resolusi yang mengubah informasi dari deret waktu ke dalam ruang waktu dan frekuensi. Karena kamampuannya ini, analisis wavelet dikenal mampu merepresentasikan informasi frekuensi dan waktu dari sinyal secara terperinci.

Analisis wavelet dikenal sebagai metodologi analisis matematika yang cukup populer beberapa tahun terakhir. Fakta terbesar yang mendorong penggunaan analisis wavelet dibandingkan dengan spektral analisis konvensional adalah karena kemampuannya dalam menangkap dan mengilustrasikan semua osilasi yang terjadi pada setiap interval waktu dari sinyal yang ditinjau. Jendela modulasi fleksibel pada wavelet membuat transformasi ini mampu untuk menangkap dan mengilustrasikan sinyal ke dalam resolusi waktu dan frekuensi yang tinggi

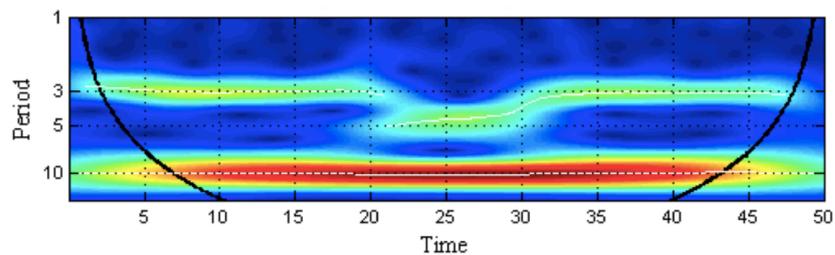
Penggunaan analisis spektral konservatif akan membuat informasi dalam dinamika transiet hilang dan sulit untuk dilacak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Fourier merupakan transformasi paling umum yang digunakan untuk melakukan pemrosesan sinyal digital. Namun, transformasi ini hanya mampu memberi informasi frekuensi dari sinyal tapi tidak informasi akan kapan (waktu) frekuensi tersebut terjadi. Terlihat jelas untuk siklus periode yang sama, Gambar 2.2 menunjukkan hasil analisis spektral daya Fourier yang mampu mengilustrasikan frekuensi pada periode siklus 3 tahun, 5 tahun dan 10 tahun namun gagal untuk menangkap seluruh informasi yang terjadi selama interval waktu periode yang ditentukan. Di sisi lain, Gambar 2.3 menunjukkan spektrum daya dari analisis wavelet yang berhasil mengilustrasikan seluruh informasi dari interval waktu 0 hingga 50 pada setiap siklus periodenya.



Gambar 2.1 Deret $y_t = \cos(2\pi/p_1) + \cos(2\pi/p_2) + \epsilon_t$



Gambar 2.2 *Power Spectral Density*



Gambar 2.3 Spektrum Daya Wavelet

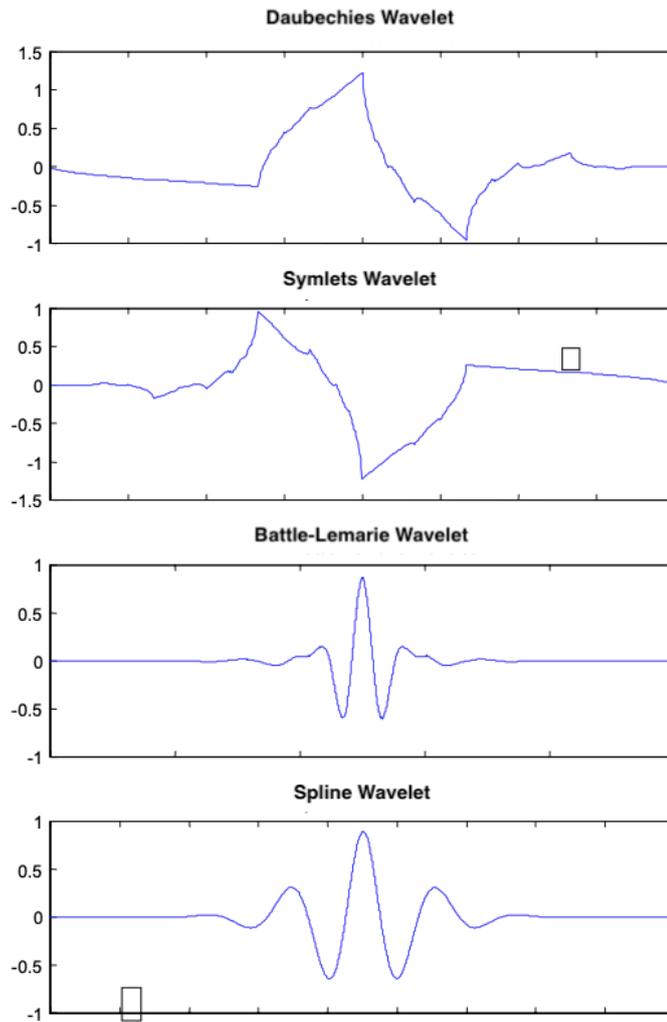
Pada Gambar 2.3 sumbu horizontal menggambarkan dimensi waktu sedangkan sumbu vertikal menggambarkan periode. Indikator daya digambarkan dengan warna, warna biru yang menandakan daya rendah hingga warna merah yang menggambarkan daya yang tinggi. Kontur berwarna merah dan hitam menggambarkan siklus yang kuat dan signifikan. Hasil analisis ini memperlihatkan siklus tiga tahun yang terjadi antara waktu 0 hingga 50. Area berwarna kuning juga ditemukan antara tahun 20 dan 30 dengan garis putih yang mengidentifikasi

periode siklus 5. Ini menunjukkan bahwa perubahan variasi dari deret waktu siklus periode 5 tahun juga penting untuk ditinjau (Aguiar-Contraria & Soares, 2011).

Dari perbandingan ini dapat disimpulkan bahwa transformasi Fourier tidak mampu merepresentasikan perubahan yang terjadi pada seluruh interval waktu dari periode tersebut. Kehadiran metode wavelet seakan menjawab keterbatasan yang dimiliki oleh transformasi Fourier. Gambar 2.3 jelas menunjukkan bahwa metode wavelet mampu menangkap perubahan yang terjadi pada siklus 3 dan 10 tahun dan juga mampu menemukan variasi yang terjadi selama siklus periode 5 tahun, yaitu pada tahun 20 hingga 30 (Aguiar-Contraria & Soares, 2011).

Teknik analisis wavelet menyajikan dua kelas transformasi, yaitu CWT dan DWT (Khoirunnisa, et al., 2020). CWT umumnya digunakan untuk kebutuhan fitur ekstraksi dan mampu memperluas deret waktu ke dalam ruang frekuensi waktu. Sedangkan DWT umumnya digunakan untuk meredam kebisingan dan kompresi data. Representasi CWT didapatkan dengan mengubah skala dari wavelet (meregang atau menyempit), menggeser sinyal wavelet sepanjang waktu interval observasi, melakukan konvolusi sinyal wavelet dan sinyal asli, dan diintegrasikan sepanjang waktu. Sedangkan, komputasi DWT didapatkan dengan mengaplikasikan *filter* atau batas frekuensi tertentu untuk menganalisa sinyal untuk berbagai skala. Sinyal yang melewati HPF (High Pass Filter) digunakan untuk menganalisis frekuensi tinggi dari sinyal, dan sinyal yang melewati LPF (Low Pass Filter) digunakan untuk menganalisis frekuensi rendah pada sinyal (Palikar, 1996).

DWT adalah sebuah teknik reduksi sebuah dimensi yang dilakukan dengan dekomposisi multiresolusi guna mengatasi sejumlah masalah pemodelan yang menghasilkan sebuah sinyal representasi lokal pada domain waktu dan frekuensi. Transformasi DWT mampu mengubah sinyal asli ke domain wavelet untuk dianalisis kemudian dapat menguraikan sinyal-sinyal pada frekuensi rendah hingga frekuensi tinggi dengan akurat. Untuk melakukan transformasi DWT tiga tahapan yang harus dilakukan adalah menentukan wavelet yang akan digunakan, menentukan level multiresolusi, dan menentukan aturan batasan. Filter wavelet ini digunakan untuk menguraikan data ke dalam frekuensi yang berbeda (Khomariah & Sari, 2020). Terdapat sejumlah mother wavelet yang bisa digunakan untuk melakukan transformasi wavelet, namun jenis-jenis mother wavelet yang umumnya digunakan untuk melakukan transformasi DWT ditunjukkan pada Gambar 2.4.



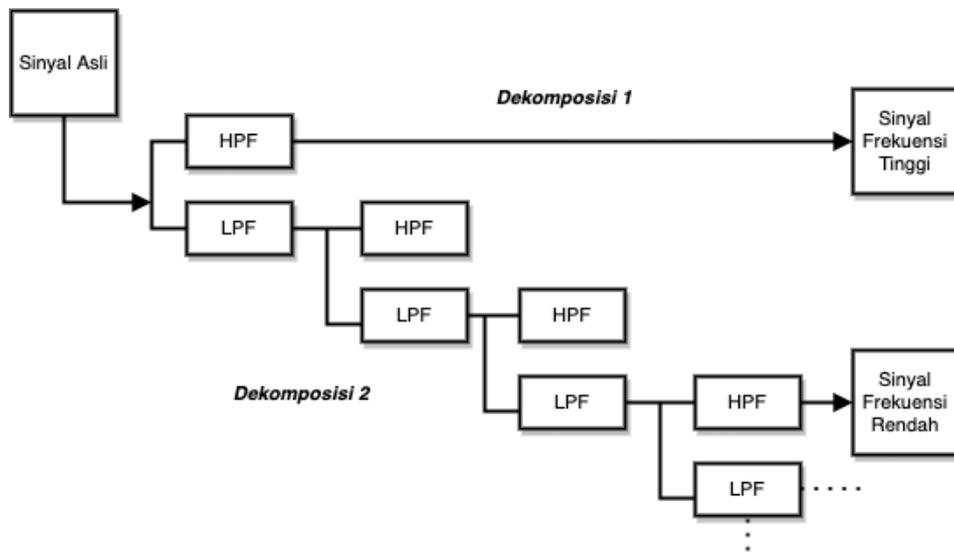
Gambar 2.4 Jenis-Jenis *Mother Wavelet*

Melalui transformasi wavelet, sinyal asli dari deret waktu direpresentasikan dalam ekspansi wavelet yang kemudian diekspresikan oleh kofisien kombinasi linear dari wavelet yang mengalami proses dilatasi dan translasi. Maka dari itu, operasi data dapat dilakukan sesuai dengan kofisien wavelet yang dihasilkan pada skala resolusi yang berbeda. Untuk skala yang tinggi, kofisien wavelet merepresentasikan komponen frekuensi rendah dari sinyal original. Sedangkan untuk skala rendah, kofisien wavelet akan merepresentasikan komponen frekuensi

tinggi yang mungkin disebabkan oleh noise atau fenomena lokal. Berangkat dari proses tersebut, maka prosedur dekomposisi ini disebut sebagai analisis multiresolusi (Fantoni, et al., 1998).

Konsep dasar dari analisis multiresolusi adalah untuk menganalisa sinyal pada skala yang berbeda-beda menggunakan sebuah filter dengan *cut-off* frekuensi yang beragam. Sebuah sinyal original akan melewati HPF (High Pass Filter) untuk mengobservasi frekuensi tinggi, dan akan melewati LPF (Low Pass Filter) untuk mengobservasi frekuensi rendah. HPF didapatkan dari fungsi wavelet $\psi(t)$, sedangkan LPF didapatkan dari fungsi wavelet $\phi(t)$. Gelombang wavelet yang menjadi filter harus memenuhi kondisi tertentu, yang disebut dengan *admissibility condition*.

Sinyal frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh HPF disebut dengan koefisien detail, kemudian sinyal frekuensi rendah yang dihasilkan oleh LPF adalah koefisien perkiraan. Dekomposisi dimulai dari diaplikasikannya HPF dan LPF pada sinyal asli. Dekomposisi sinyal kemudian dilanjutkan dengan mengekstraksi sinyal frekuensi rendah menggunakan dua buah filter. Persitiwa ini akan terjadi secara berulang sesuai dengan level dekomposisi yang sudah ditentukan sebelumnya. Akhir dari proses dekomposisi inilah yang membuat sinyal asli memiliki representasi dari sinyal frekuensi tinggi dan frekuensi rendah (Satirapod & Rizos, 2005). Proses dekomposisi ini pada akhirnya mampu merepresentasikan sinyal asli dalam berbagai level frekuensi. Analisis multiresolusi dengan transformasi wavelet ditampilkan pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Analisis Multiresolusi dengan Transformasi Wavelet

MODWT (Maximum Overlap Discrete Wavelet Transform) dikenal sebagai bentuk modifikasi dari DWT. MODWT umumnya digunakan untuk melakukan dekomposisi sinyal sampai dengan level multiresolusi n . Dekomposisi sinyal ini akan menjadi komponen orthogonal (D_1, D_2, \dots, D_6) yang akan diplot secara merinci untuk mewakili sinyal dalam komponen frekuensi yang berbeda-beda. Komponen yang dihaluskan disebut dengan S_n (Raza, et al., 2019).

Dalam MODWT deret dari $y(t)$ dinotasikan dalam Persamaan 2.1:

$$y(t) = S_j(t) + D_j(t) + D_{j-1}(t) + \dots + D_1(t) \quad (2.1)$$

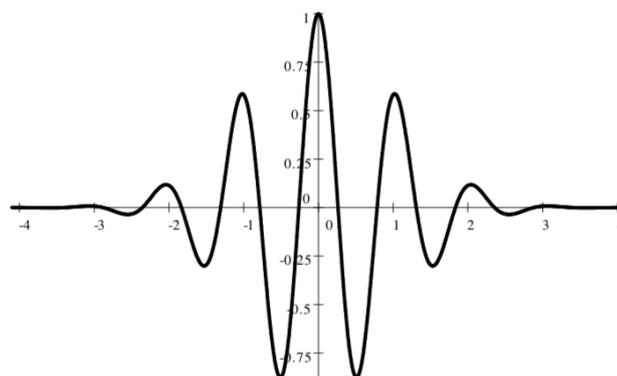
Dimana level tertinggi dari koefisien perkiraan $S_j(t)$ adalah sinyal yang dihaluskan dan $D_1(t), D_2(t), \dots, D_j(t)$ berhubungan dengan panjang osilasi secara berurutan seperti $2-4, 4-8, \dots, 2^j + 2^{j+1}$ (Hung, 2020).

CWT mampu memperluas deret waktu kedalam ruang waktu dan frekuensi sekaligus. CWT juga merupakan metode yang tepat untuk melakukan pengujian

terhadap dua deret waktu yang memiliki hubungan satu sama lain. Dari CWT, XWT (*Cross Wavelet Transform*) kemudian dapat dibangun dengan tujuan mengeksplorasi daerah yang memiliki kesamaan kekuatan tertinggi dan mengetahui hubungan fase dalam ruang waktu dan frekuensi. Selanjutnya, WTC mampu mengukur seberapa koheren XWT dalam ruang frekuensi waktu (Grinsted, et al., 2014). WTC merupakan kelas transformasi yang mampu memudahkan peneliti dalam mengilustrasikan hubungan antara dua deret waktu secara efisien.

Sebuah fungsi wavelet $n(t)$ direpresentasikan dengan gelombang kecil dengan ukuran yang dibatasi. Wavelet disebut gelombang karena sifatnya yang berosilasi, dan kecil karena domain waktunya yang diawali dan diakhiri dengan angka yang bernilai mendekati atau mencapai 0 (Aguiar-Conraria & Soares, 2011).

Spektrum energi pada ruang waktu akan dikalkulasikan menggunakan gelombang wavelet. Kondisi tersebut mampu mendeteksi fluktuasi berkala yang mampu mendeskripsikan proses dinamika nonlinier kompleks yang digambarkan secara spasial oleh interaksi gangguan spektrum.



Gambar 2.6 Gelombang Wavelet

Komputasi dari transformasi WTC dimulai dari menentukan *mother wavelet* untuk menguraikan data deret waktu menjadi ruang waktu dan frekuensi. Secara umum, fungsi *morlet wavelet* digunakan untuk merepresentasikan analisis waktu dan frekuensi dari variansi beban sistem daya. Analisis *morlet wavelet* mampu mengidentifikasi periode karakteristik dari konsumsi listrik dalam waktu dan memberikan pemahaman yang lebih akan perilaku dinamika dari konsumsi yang terkait. Analisis *morlet* dipilih untuk mengestimasi karakteristik spektral dari ruang waktu yang mampu menampilkan fluktuasi dari periodik komponen sebagai fungsi dari waktu (Avdakovic, et al., 2013). *Morlet wavelet* dihasilkan dari gelombang *sine* yang dikalikan dengan *envelope Gaussian*.

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa terdapat sejumlah *mother wavelet* yang disediakan, namun untuk *mother wavelet* dari transformasi *morlet wavelet* dinyatakan dalam Persamaan 2.2:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{iw_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (2.2)$$

Berdasarkan Persamaan 2.2 tersebut, kita perlu memilih nomor dari gelombang W_0 , yang memberikan jumlah osilasi bersama dengan Wavelet itu sendiri. Satu syarat umum dari transformasi wavelet adalah rata-rata dari Wavelet itu sendiri harus 0. Pada praktiknya, dengan memilih $W_0 = 6$, maka eror yang dihasilkan dari rata-rata non-0 akan lebih kecil dari kesalahan pembulatan komputer biasa (Aguiar-Contraria & Soares, 2011). Lebih lanjut, transformasi CWT dilakukan dengan menggunakan Persamaan 2.3 dan 2.4 (González-Concepción, et al., 2012),

$$X(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{\mathbf{a}, \mathbf{b}}^* dt \quad (2.3)$$

atau

$$\psi_{\tau,s}(t) := \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right), s, \tau \in \mathbb{R}, s \neq 0 \quad (2.4)$$

Tranformasi wavelet menghasilkan fungsi dalam ruang waktu dan frekuensi. τ dikenal sebagai koefisien *translation* sedangkan s dikenal sebagai koefisien *scaling*. *Translation* berarti menggeser gelombang wavelet ke depan untuk menganalisis seluruh sinyal, sedangkan koefisien *scale* berarti mengompres atau merentangkan gelombang wavelet sesuai dengan ukuran jendela frekuensi. Posisi Wavelet dalam domain waktu ditentukan oleh τ dan posisi wavelet dalam domain frekuensi diberikan oleh s . Oleh karena itu, dengan memetakan deret asli menjadi fungsi τ dan s , mampu memberikan informasi tentang waktu dan frekuensi.

Dalam kasus mengobservasi hubungan antara dua variabel atau lebih, pendekatan regresi merupakan metode yang paling umum digunakan. Persamaan regresi sederhana dinyatakan dengan Persamaan 2.5,

$$Y = a + bx \quad (2.5)$$

Selanjutnya metode korelasi digunakan untuk mengetahui derajat kedekatan atau kekuatan korelasi antara variabel-variabel tersebut. Sayangnya, metode ini hanya mampu memberikan gambaran umum mengenai hubungan dan kekuatan korelasi antara dua variabel atau lebih yang sedang ditinjau. Hubungan antara dua variabel yang ditinjau dalam periode waktu tertentu direpresentasikan dalam sebuah nilai koefisien regresi, ini mengartikan bahwa metode ini tidak memberikan

informasi mengenai perubahan-perubahan pada hubungan atau tingkat korelasi yang terjadi dalam setiap interval waktu periode tersebut.

Keterbatasan pedekatan regresi kemudian terjawab oleh kehadiran kelas transformasi WTC. WTC merepresentasikan analisisnya dengan menampilkan seluruh perubahan tingkat hubungan atau korelasi yang terjadi dalam interval waktu yang ditinjau. Level korelasi dinyatakan dalam indikator warna yang berkisar dari 0 (biru) hingga 1 (merah). Semakin kuat korelasi antara dua variabel yang ditinjau, maka daerah tersebut akan berwarna merah.

Berangkat dari hal ini, penelitian yang dilakukan akan menggunakan kelas tranformasi WTC untuk menganalisis tingkat koherensi variabel meteorologi dan permintaan energi listrik di Kota Makassar. Berikut dibawah merupakan persamaan dari WTC dan hubungan fasa x terhadap y,

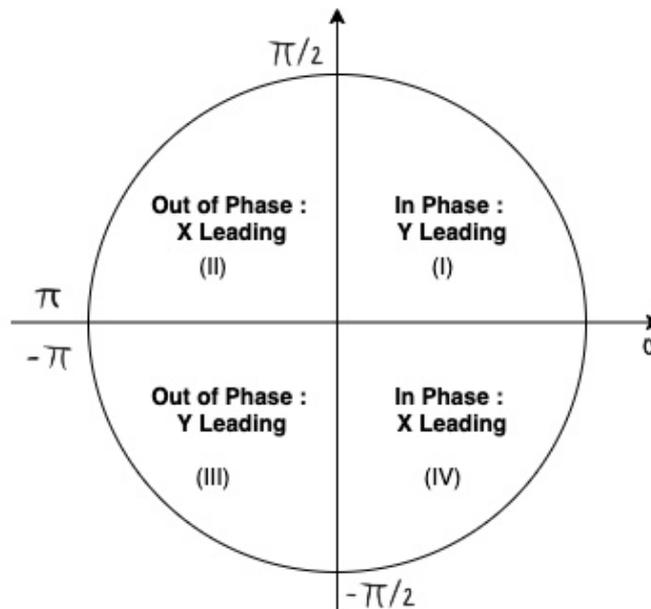
$$R_n^2(s) = \frac{|s(s^{-1}W_n^{xy}(s))|^2}{s(s^{-1}W_n^x(s))^2 s(s^{-1}W_n^y(s))^2} \quad (2.6)$$

$$\text{Angle}(\tau, s) = \text{Phase}_x - \text{Phase}_y \quad (2.7)$$

S merupakan operator penghalus. Koefisien $R_n^2(s)$ harus berada pada kisaran $0 \leq R_n^2(s) \leq 1$ dimana angka mendekati 0 mengindikasikan korelasi yang lemah antara kedua dua deret waktu sedangkan ketika nilai koefisien $R_n^2(s)$ mendekati angka 1 mengartikan korelasi yang kuat antara keduanya (Avdakovic, et al., 2013). Perbedaan fase antara dua deret waktu didefinisikan sebagai argumen dari fragmen imajiner dan nyata yang dihaluskan dari spektrum silang serta memberikan

informasi tentang penundaan osilasi antara dua deret waktu (Bonkaney, et al., 2019) (Avdakovic, et al., 2013).

Perbedaan fasa merupakan sebuah pedoman yang digunakan untuk mengkarakterisasi hubungan fasa antara dua deret waktu yang sedang diobservasi. Perbedaan fasa 0 mengindikasikan bahwa deret waktu tersebut bergerak bersamaan pada waktu dan frekuensi tertentu. Jika $\phi_{xy} \in (0, \frac{\pi}{2})$, maka deret tersebut bergerak dalam fasa, tapi deret waktu y memimpin x. Jika $\phi_{xy} \in (-\frac{\pi}{2}, 0)$ mengartikan bahwa deret tersebut tetap bergerak didalam fasa namun deret waktu x memimpin y. Perbedaan fasa dari π atau $-\pi$ mengindikasikan hubungan anti-fasa. Jika $\phi_{xy} \in (\frac{\pi}{2}, \pi)$ maka deret x memimpin. Deret waktu y akan memimpin jika $\phi_{xy} \in (-\pi, -\frac{\pi}{2})$. Lingkaran perbedaan fasa dapat dilihat pada Gambar 2.7 (Aguiar-Conraria & Soares, 2011).



Gambar 2.7 Lingkaran Perbedaan Fasa

Lebih lanjut, penggunaan metode analisis wavelet khususnya yang bertujuan untuk mengobservasi korelasi atau koherensi sejumlah variabel maka diperlukan data dengan properti statistik yang baik. Data dengan properti statistik yang buruk akan berujung dengan buruknya kualitas hasil analisis hingga menimbulkan error saat analisis di jalankan. Untuk mengatasi data dengan properti statistik yang buruk, maka normalisasi data dapat dilakukan terlebih dahulu sebelum analisis wavelet digunakan. Sejumlah penelitian yang juga melakukan normalisasi data sebelum melakukan analisis wavelet diantaranya adalah (Raza, et al., 2019) (Sharif, et al., 2017) (Afshan, et al., 2018).

Normalisasi data dapat dilakukan dengan menggunakan sejumlah pendekatan, salah satunya adalah pendekatan menggunakan persamaan *continuously compounded return* untuk menghasilkan deret *return*. Deret *return* memang dikenal mampu memberikan properti statistik yang sangat baik (Wu & Shahidehpour, 2010). Penelitian (Dash, 2015) menggunakan *continuously compounded return* sebagai pendekatannya untuk menghasilkan deret *return*. Deret *continuously compounded return* dinyatakan dalam bentuk:

$$R_t = \ln(P_t) - \ln(P_{t-1}) = \ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right) \quad (2.8)$$

R_t merupakan pengembalian logaritma satu periode pada waktu t dan P_t adalah data variabel pada waktu t .