

KORELASI MUSIMAN ANTARA ZENITH WET DELAY (ZWD) DAN DEBIT SUNGAI DI DAS CIKAPUNDUNG HULU, KAWASAN BANDUNG UTARA, JAWA BARAT

(Seasonal Correlation Between Zenith Wet Delay And River Discharge In The Upper Cikapundung Watersheed, North Bandung Region, West Java)

Wedyanto Kuntjoro, Z.A.J. Tanuwijaya, A. Pramansyah, dan Dudy D. Wijaya

Kelompok Keahlian Geodesi, Program Studi Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Email: wedyanto.k@gmail.com

ABSTRAK

Kandungan total uap air troposfer (*precipitable water vapor*) di suatu tempat dapat diestimasi berdasarkan karakteristik bias gelombang elektromagnetik dari satelit navigasi *GPS*, berupa *zenith wet delay* (*ZWD*). Pola musiman deret waktu *ZWD* sangat penting dalam studi siklus hidrologi khususnya yang terkait dengan kejadian-kejadian banjir. Artikel ini menganalisis korelasi musiman antara *ZWD* dan debit sungai Cikapundung di wilayah Bandung Utara berdasarkan estimasi rata-rata pola musimannya. Berdasarkan rekonstruksi sejumlah komponen harmonik ditemukan bahwa pola musiman *ZWD* memiliki kemiripan dan korelasi yang kuat dengan pola musiman debit sungai. Pola musiman *ZWD* dan debit sungai dipengaruhi secara kuat oleh fenomena pertukaran Monsun Asia dan Monsun Australia. Korelasi linier di antara keduanya menunjukkan hasil yang sangat kuat, dimana hampir 90% fluktuasi debit sungai dipengaruhi oleh kandungan uap air di troposfer dengan level signifikansi 95%. Berdasarkan spektrum amplitudo silang dan koherensi, kedua kuantitas ini nampak didominasi oleh siklus monsun satu tahunan disertai indikasi adanya pengaruh siklus tengah tahunan dan 4 bulanan.

Kata kunci: *ZWD*, debit sungai, siklus hidrologi, monsun.

ABSTRACT

The total content of tropospheric water vapor (precipitable water vapor) in a certain place can be estimated based on the bias characteristics of electromagnetic waves from GPS navigation satellites, in the form of zenith wet delay (ZWD). The seasonal pattern of the ZWD time series is very important in hydrological cycle's study, especially those related to flood events. This article analyzes the seasonal correlation between ZWD and Cikapundung river discharge in the North Bandung region based on the estimated average seasonal pattern. Based on the reconstruction of a number of harmonic components it was found that the seasonal pattern of ZWD has a strong resemblance and correlation with the seasonal pattern of river discharge. The seasonal pattern of ZWD and river discharge is strongly influenced by the Asian and Australian Monsoon exchange phenomena. Linear correlation between the two shows very strong results, where almost 90% of river discharge fluctuations are affected by the moisture content in the troposphere with a 95% significance level. Based on cross-spectrum amplitude and coherence, both quantities are dominated by annual monsoon cycles and there are indications that they are influenced by semi-annual and 4-monthly cycles.

Keywords: *ZWD*, discharge, hydrology cycle, monsoon.

PENDAHULUAN

Informasi tentang variasi musiman dari kandungan total uap air di atmosfer sangatlah penting, khususnya dalam penelitian bidang meteorologi, hidrologi, dan perubahan iklim. Penggunaan perangkat balon radiosonde dalam men-*trace* lapisan-lapisan troposfer untuk memperoleh data total uap air pada jam-jam tertentu, biaya operasional hariannya sangat tidak ekonomis. Salah satu metoda alternatif yang saat ini digunakan untuk mengetahui kandungan total uap air di atmosfer adalah memanfaatkan data pengamatan *GPS* (*Global Positioning System*). Secara umum prinsip penentuan kandungan uap air di atmosfer menggunakan perangkat *GPS* didasarkan pada bias perambatan sinyal yang disebabkan lapisan troposfer. Dalam perambatannya, sinyal gelombang elektromagnetik yang datang dari satelit ke *receiver* (perangkat) *GPS* di permukaan bumi akan diganggu oleh kandungan total elektron di ionosfer dan uap air di troposfer, masing-masing dikenal

sebagai bias ionosfer dan bias troposfer. Di lapisan ionosfer, besarnya bias yang terjadi bergantung pada frekuensi sinyal yang digunakan, oleh karena itu besarnya bias yang terjadi pada lapisan ini diestimasi dengan menggunakan dua frekuensi sinyal yang berbeda. Adapun di lapisan troposfer, besarnya bias tidak bergantung pada frekuensi sinyal sehingga tidak bisa diestimasi dengan menggunakan perbedaan frekuensi (Abidin, 2006).

Metoda yang biasa digunakan dalam penentuan bias di troposfer adalah dengan inversi *GPS*, yang biasanya digunakan untuk menentukan besarnya penyimpangan jarak dari satelit ke *receiver GPS* akibat perlambatan waktu tempuh sinyal saat melintasi troposfer. Penyimpangan jarak ini disebut sebagai *zenith tropospheric delay (ZTD)*. Nilai *ZTD* kemudian dijadikan sebagai faktor koreksi untuk menentukan jarak dari satelit ke *receiver*. Besarnya *ZTD* dapat digunakan untuk mengkarakterisasi kondisi kandungan uap air di troposfer pada daerah pengamatan, yaitu dengan cara memisahkan bagian *delay* akibat komponen udara basah yang dinyatakan oleh *zenith wet delay (ZWD)* dari *ZTD* menggunakan persamaan $ZWD = ZTD - ZHD$, dimana *ZHD* adalah *zenith hydrostatic delay* yang menyatakan *delay* akibat komponen udara kering pada saat atmosfer dalam kondisi setimbang hidrostatis. Variasi nilai *ZWD* ini berkaitan dengan variasi kandungan uap air di troposfer, dimana dalam konteks hidrometeorologi biasanya dinyatakan dalam kuantitas *PWV (precipitable water vapor)*.

Tujuan penelitian dari artikel ini adalah untuk mengetahui karakteristik musiman dari kandungan total uap air di troposfer yang dikaitkan dengan pola karakteristik musiman dari curah hujan dan debit sungai. Dengan mengkaji karakteristik pola temporal dari ketiga kuantitas tersebut maka akan ditinjau apakah kuantitas *ZWD* dapat digunakan sebagai prediktor yang baik bagi pemodelan hidrologi sungai dan prediksi kejadian-kejadian banjir. Tersedianya data *ZWD* secara kontinu sangat berharga untuk studi siklus hidrologi, sehingga siklus air dapat dipantau mulai dari fasa uap air di atmosfer, sebagai curah hujan yang turun, hingga sebagai air permukaan yang mengalir di saluran-saluran sungai. Dalam artikel ini, pola temporal yang dibahas dibatasi pada pola komponen musimannya saja.

DATA DAN METODE ANALISIS

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah: (1) *ZWD* di stasiun *GPS*-Kontinu ITB (6° 53' 29,501" LS, 107° 36' 43,229 BT) yang memiliki elevasi 816,517 m dengan periode pengambilan data 2011-2015. (2) Debit harian sungai Cikapundung stasiun Maribaya (6° 50' 11,000" LS, 107° 39' 23,500" BT) dengan elevasi 1.091 m pada periode pengamatan debit 1971-2016; yang data debit hariannya diperoleh dari PSDA Provinsi Jawa Barat. (3) Data curah hujan harian stasiun BMKG Lembang (6° 49' 35,600 LS, 107° 37' 3,600" BT) dengan elevasi 1.275 m pada periode pengamatan curah hujan 1977-2012. Lokasi dari ketiga stasiun observasi di atas dapat dilihat pada **Gambar 1**. Deret waktu rata-rata harian dari *ZWD* dan debit sungai Cikapundung Maribaya periode 2011-2015 dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Nilai *ZWD* diperoleh dengan cara mengurangkan nilai *delay* troposfer *ZTD* yang didapatkan dari perangkat *GPS* dengan nilai *ZHD*, dimana dalam penelitian ini *ZHD* diestimasi dengan menggunakan model *Saastamoinen* (Kuntjoro, 1999).

$$ZHD = \frac{(2,2779 + 0,0024 (mm))P_s}{1 - 0,00266 \cos 2\varphi - 0,00028 h}$$

dimana:

P_s = tekanan atmosfer permukaan (hPa),

φ = lintang dari posisi *receiver*,

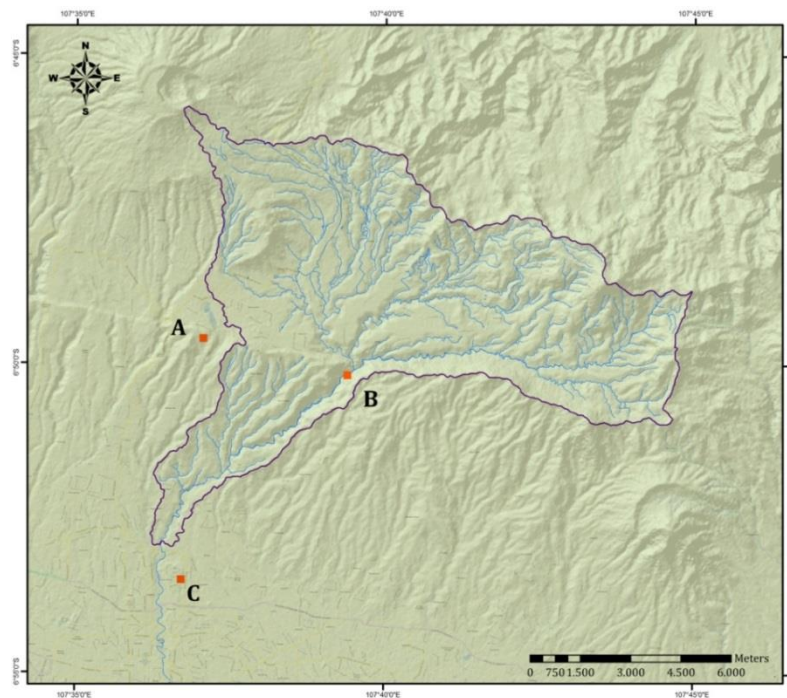
h = ketinggian ellipsoid (km).

Adapun debit sungai Cikapundung di stasiun Maribaya diestimasi berdasarkan persamaan lengkung debit (*rating curve*) $Q_{Mrb} = 8,504(H - 0,223)^{2,422}$. Persamaan ini dibuat berdasarkan rentang pengukuran tinggi muka air sungai H di Maribaya sepanjang 14 tahun, yaitu periode 1997-2010. Parameter-parameter pada persamaan di atas diturunkan berdasarkan proses pencocokan kurva (*curve fitting*).

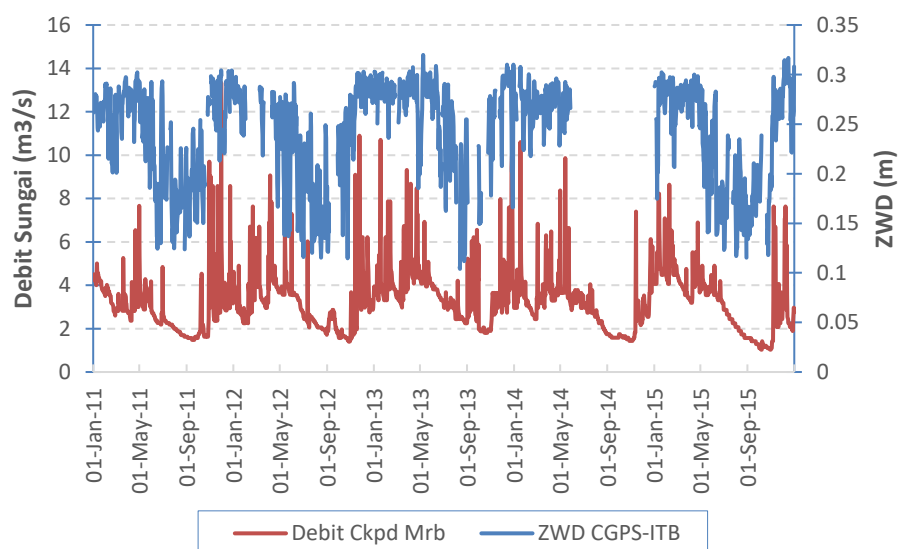
Untuk melihat korelasi musiman antara *ZWD* dan debit sungai, dilakukan estimasi rata-rata *ZWD* dan rata-rata debit sungai periode 2011-2015 berdasarkan rekonstruksi tujuh komponen harmonik

yang dominan (analisis harmonik). Pola rataan harmonik debit sungai periode 2011-2015 (5 tahun) kemudian dibandingkan dengan pola rataan harmonik normal periode panjang 1971-2016 (46 tahun). Untuk data curah hujan Lembang, karena data harian hanya tersedia hingga tahun 2012, maka yang direkonstruksi hanya rataan harmonik normal periode 1977-2012 (36 tahun).

Untuk mengukur kekuatan dan hubungan linier antara *ZWD* dan debit sungai dalam domain waktu, dilakukan uji statistik dengan Korelasi Pearson. Adapun korelasi linier komponen-komponen harmonik yang mengkonstruksi rataan dari kedua variabel tersebut dilakukan dalam domain frekuensi berdasarkan analisis spektrum silang dan koherensi.



Gambar 1. (A) Lokasi stasiun curah hujan Lembang; (B) stasiun debit sungai Cikapundung Maribaya; dan (C) stasiun *GPS*-Kontinu ITB.



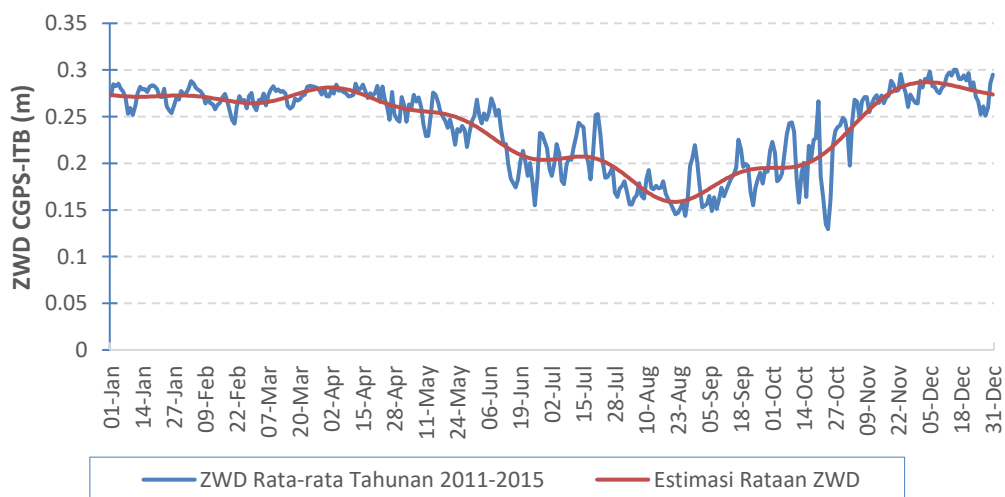
Gambar 2. *ZWD* rata-rata harian di stasiun *CGPS*-ITB, dan debit rata-rata harian sungai Cikapundung di stasiun Maribaya. Periode pengamatan 2011-2015 (5 tahun).

HASIL DAN PEMBAHASAN

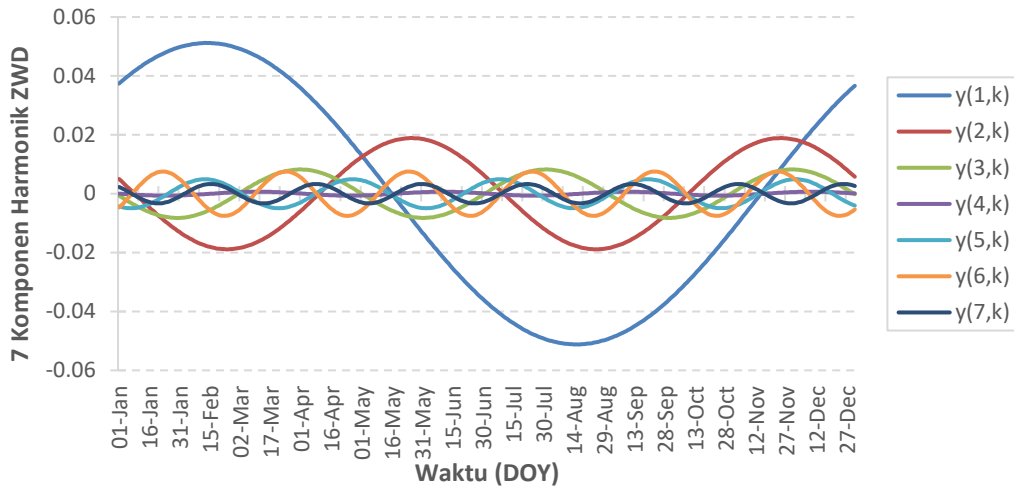
Berdasarkan ekstraksi data *ZTD* dan *ZHD* dari hasil pengolahan data *CGPS*-ITB selama 5 tahun (2011-2015) dengan interval epok pengamatan 30 detik, diperoleh data *ZWD*. Selanjutnya dilakukan

proses perata-rataan harian *ZWD* dengan total 2880 epok, sehingga diperoleh data *ZWD* rata-rata harian. Adanya data yang kosong pada grafik *ZWD*, menunjukkan tidak adanya pengukuran *GPS* pada kurun tersebut. Proses perata-rataan *ZWD* dalam basis data harian dilakukan karena data debit sungai Cikapundung yang tersedia berupa data rata-rata harian yang merupakan hasil perata-rataan dari tiga waktu pengamatan manual tinggi muka air sungai, yaitu jam 07.00, 12.00, dan 17.00 WIB. Hasil perata-rataan debit ini hanya merepresentasikan kondisi debit di siang hari dan karenanya tidak merepresentasikan nilai fluktuasinya pada malam hari, sedangkan data *ZWD* harian merupakan hasil perata-rataan selama 24 jam, yang datanya dapat dilihat pada **Gambar 2**. Data debit sungai diestimasi berdasarkan data tinggi muka air melalui persamaan kurva lengkung debit (*rating curve*). Debit harian sungai Cikapundung yang terukur di stasiun Maribaya merupakan debit *outlet* dari DAS Cikapundung Hulu, mencakup seluruh pola curah hujan yang tertangkap oleh Cekungan "drainase" Lembang, artinya seluruh air permukaan yang mengalir pada kanal-kanal sungai di cekungan ini bermuara di pintu air Maribaya. Karena tidak tersedianya data curah hujan harian yang lengkap di DAS Cikapundung Hulu, maka karakter pola curah hujan harian yang tertangkap oleh Cekungan Lembang didekati oleh data curah hujan di stasiun Lembang yang lokasinya tidak jauh dari batas wilayah DAS tersebut (**Gambar 1**).

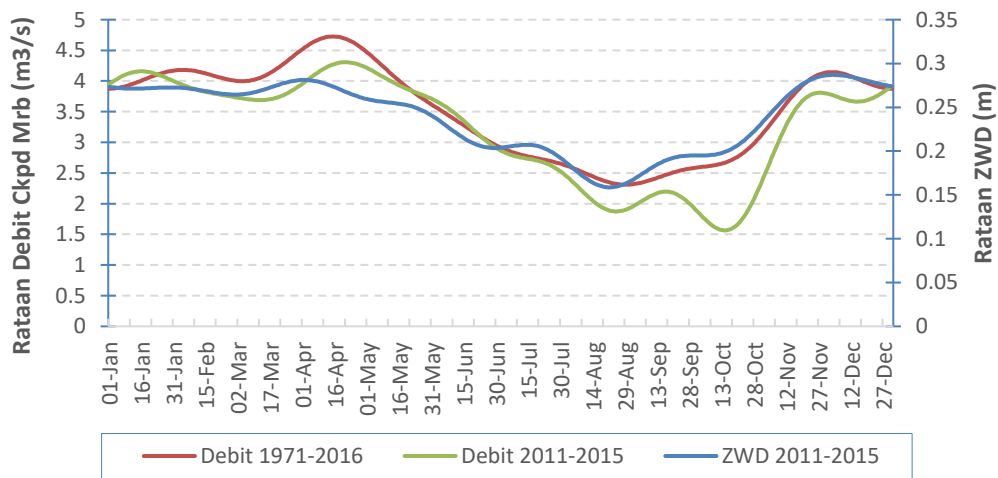
Untuk memperoleh karakteristik musiman dari *ZWD*, debit sungai, dan curah hujan, maka dilakukan proses perata-rataan lintas tahunan pada setiap tanggal yang bersesuaian. Untuk data debit sungai Cikapundung Maribaya, pola musiman yang diperoleh merupakan pola normal hasil perata-rataan sepanjang 46 tahun (1971-2016), sementara pola musiman curah hujan Lembang merupakan pola normal berdasarkan hasil perata-rataan sepanjang 36 tahun (1977-2012). Adapun untuk pola musiman *ZWD*, karena datanya masih terbatas di bawah 30 tahun, maka pola musiman yang diperoleh hanya berdasarkan hasil perata-rataan sepanjang 5 tahun saja (2011-2015); sebagaimana dapat dilihat pada **Gambar 3**. Untuk mengestimasi pola rata-rata dari karakter musiman *ZWD* dilakukan dengan metode Analisis Harmonik. Dengan menggunakan tujuh komponen harmonik yang paling dominan maka estimasi rata-rata musiman dari *ZWD* dapat direkonstruksi, seperti ditunjukkan **Gambar 3**; dan ketujuh komponen harmonik *ZWD* yang berhasil diekstrak pola-pola sinusoidnya dapat dilihat pada **Gambar 4**. Dengan menggunakan metode yang sama, maka diperoleh pola rata-rata musiman untuk debit sungai dan curah hujan. Khusus untuk debit sungai, estimasi rata-rata pola musiman dilakukan baik pada skala populasi (periode 1971-2016) maupun skala sampel (periode 2011-2016).



Gambar 3. *ZWD* rata-rata tahunan periode 2011-2015 dan estimasi rata-rata (*mean*) *ZWD* berdasarkan rekonstruksi tujuh komponen harmonik.



Gambar 4. Tujuh komponen harmonik yang mengkonstruksi rataan ZWD.



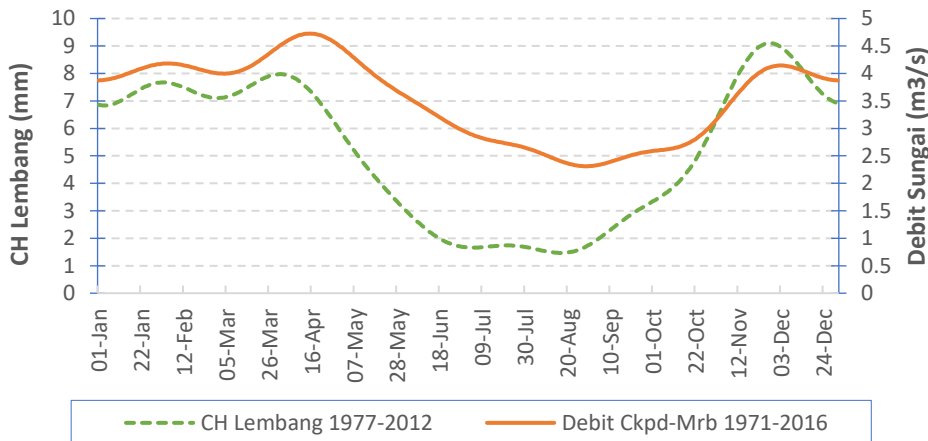
Gambar 5. Rataan ZWD periode 2011-2015, rataa debit sungai periode 2011-2015, dan debit sungai periode 1971-2016.

Karakteristik musiman pola rataa debit Cikapundung Maribaya yang lebih mendekati kondisi populasinya, dinyatakan oleh hasil perata-rataan sampel 1971-2016 (46 tahun) dan bukan oleh sampel 2011-2015 (5 tahun). Karenanya karakteristik musiman rataa ZWD lebih tepat dibandingkan dengan rataa debit 1971-2016. Selain itu terdapat beberapa data ZWD yang kosong pada 2014, sehingga karakteristik musiman dari rataa ZWD dan rataa debit pada periode yang sama tidak dapat dibandingkan secara langsung untuk analisis lebih lanjut. Pada hubungan grafik antara ZWD dan debit sungai dalam skala sampel tampak ada kekurang-selarasan di antara keduanya, khususnya pada sekitar bulan September hingga Oktober (**Gambar 5**).

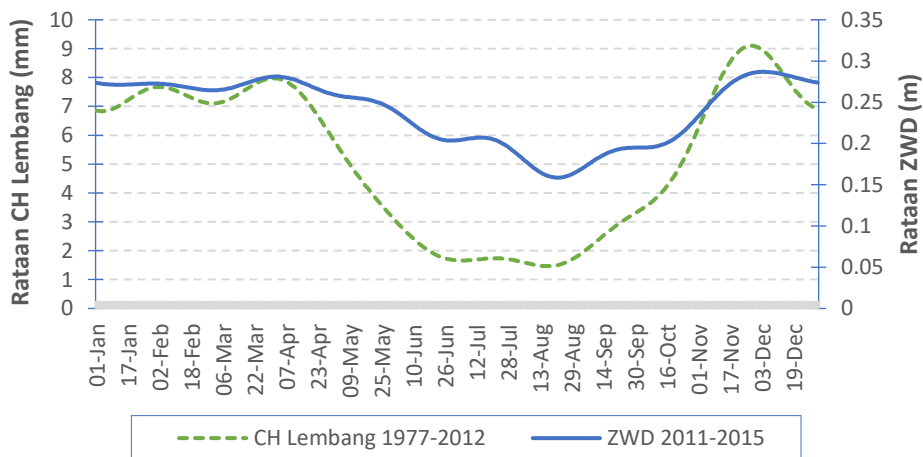
Hasil terpenting dari rekonstruksi rataa ZWD adalah pola karakter musimanya, dimana pola kandungan uap air di troposfer wilayah Bandung Utara sangat dikontrol oleh dinamika sirkulasi angin monsun. Berdasarkan **Gambar 5** tampak bahwa pola rataa ZWD lebih mendekati pola rataa debit sungai yang berdasarkan perata-rataan populasi daripada yang berdasarkan perata-rataan sampel. Keeratan nilai korelasi linier antara rataa ZWD dengan rataa debit populasi dan rataa debit sampel, dinyatakan oleh nilai koefisien korelasi atau koefisien determinasi R^2 yang masing-masing memiliki nilai 0.8956 dan 0.7893. Artinya hampir 90% rataa ZWD sampel berkorelasi dengan rataa debit populasi, bila dibandingkan dengan rataa debit sampel yang hanya berkorelasi sekitar 79%. Hal ini disebabkan karena pada rataa populasi, kondisi-kondisi khusus dari sampel telah tereliminasi. Hubungan antara kedua kuantitas bersifat sangat kuat pada level signifikansi 95%.

Pengukuran ZWD sangat penting dalam studi siklus hidrologi, karena nilai ZWD dapat mengestimasi nilai *PWV* (*precipitable water vapor*), yaitu potensi uap air di troposfer yang dapat diubah menjadi presipitasi yang jatuh ke permukaan bumi, khususnya dalam bentuk curah hujan (Rakhecha & Singh, 2009). Karena curah hujan merupakan unsur iklim penghubung di antara

kandungan uap air troposfer dan debit sungai sebagai aliran air permukaan, maka analisis dilakukan dalam dua bagian: terkait respon debit sungai terhadap curah hujan (**Gambar 6**); dan terkait respon curah hujan terhadap akumulasi uap air di troposfer (**Gambar 7**).



Gambar 6. Grafik rata-rata debit berdasarkan data harian sepanjang 46 tahun (1971-2016), dan rata-rata curah hujan Lembang sepanjang 36 tahun (1977-2012).



Gambar 7. Grafik rata-rata ZWD berdasarkan data harian sepanjang 5 tahun (2011-2015), dan rata-rata curah hujan Lembang sepanjang 36 tahun (1977-2012).

Pertama, tentang respon debit sungai terhadap curah hujan. Debit yang terukur di stasiun Maribaya berasal dari DAS Cikapundung Hulu yang merupakan area tangkapan hujan dengan luas 74,881 km². Berdasarkan rata-rata debit sungai, debit terbesar terjadi pada bulan April dan debit terkecil terjadi pada bulan Agustus. Secara umum, debit maksimum terjadi pada puncak musim penghujan dan debit minimum terjadi pada puncak musim kemarau. Berdasarkan sifat normal curah hujan di stasiun Lembang, puncak hujan terjadi dua kali dalam setahun, yaitu pada bulan November (Monsun Asia) dan bulan April (Monsun Australia), dimana curah hujan yang dibangkitkan oleh Monsun Asia lebih besar daripada Monsun Australia. Dalam kasus debit sungai terjadi sebaliknya, puncak debit sungai yang terjadi lebih besar pada bulan April dibandingkan November. Jika debit sungai ditelusuri dari kondisi resesi terendahnya pada sekitar akhir bulan Agustus, maka debit sungai mengalami kenaikan akibat curah hujan Monsun Asia. Kenaikan debit merespon secara *delay* terhadap kenaikan kurva curah hujan dalam selang satu hingga tujuh hari. Artinya meluapnya debit sungai menunggu waktu pengisian tanah oleh air hujan hingga mencapai kondisi jenuh. Ketika tanah sudah jenuh maka air hujan akan mengalir di permukaan sebagai *runoff* dan limpas masuk ke saluran-saluran sungai hingga menaikkan kuantitas debit. Oleh karena itu puncak debit Cikapundung terjadi pada minggu pertama April, yaitu setelah puncak musim penghujan kedua pada akhir Maret. Walaupun puncak musim penghujan terjadi pada sekitar minggu ketiga November, puncak debit tidak terjadi pada akhir November karena curah hujan yang turun lebih banyak digunakan untuk

menjenuhkan tanah. Ketika terjadi jeda monsun (*monsoon break*) laju resesi debit tidak sedalam laju penurunan curah hujan karena perkolasi air di dalam tanah membutuhkan waktu yang lebih lama. Setelah resesi minor debit pasca Monsun Asia di sekitar akhir Desember dan awal Januari, debit meningkat kembali akibat curah hujan Monsun Australia dan mencapai puncak debit tahunannya setelah tanah terjenuhkan oleh curah hujan Monsun Asia. Debit sungai juga merespon secara *delay* pada kejadian puncak Monsun Australia (**Gambar 6**).

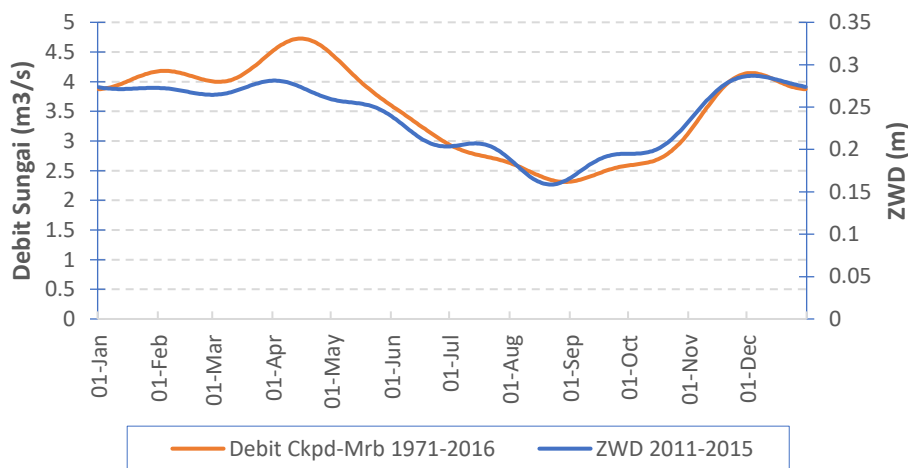
Kedua, tentang respon curah hujan terhadap akumulasi uap air di troposfer. Berdasarkan grafik rataan curah hujan dan ZWD (**Gambar 7**), puncak-puncak curah hujan maksimum dan minimum tampak sefasa dengan kondisi maksimum dan minimum ZWD. Karena ZWD berkaitan dengan PWV maka berdasarkan grafik tersebut tampak bahwa curah hujan merupakan bagian dari realisasi kandungan total uap air di troposfer. Tidak semua kandungan uap air troposfer dikondensasi lebih lanjut menjadi tetes awan dan menjadi hujan; selain itu awan-awan hujan yang terbentuk bersifat lebih acak terhadap ruang dan waktu, sehingga curah hujan yang terekam di satu titik stasiun Lembang tidak merepresentasikan karakter dari keseluruhan curah hujan yang jatuh di area tangkapan hujan Cekungan Lembang. Karena atmosfer bersifat terbuka, maka dalam penelitian ini kondisi kandungan total uap air di atas stasiun curah hujan Lembang dan di atas perangkat CGPS-ITB masih diasumsikan tidak berbeda secara signifikan. Jarak horizontal antara kedua stasiun sekitar 7 km dengan beda ketinggian tempat sekitar 458,5 m.

Kandungan uap air di troposfer berasal dari proses penguapan laut dan permukaan bumi oleh radiasi matahari. Oleh karena itu fluktuasinya secara musiman sangat dikontrol oleh variasi jarak bumi-matahari dan proyeksi pergerakan matahari di atas permukaan bumi dalam satu tahun revolusi. Sejak tanggal 21 Juni (*summer solstice*) ketika proyeksi matahari berada dalam posisi terjauhnya dari belahan bumi selatan hingga tanggal 4 Juli (*aphelion*) pada saat posisi bumi dalam jarak terjauhnya dari matahari, merupakan siklus yang mengawali masuknya musim kemarau di sekitar stasiun Lembang, yang puncaknya terjadi di pertengahan Agustus bertepatan dengan kondisi uap air troposfer yang mencapai minimum.

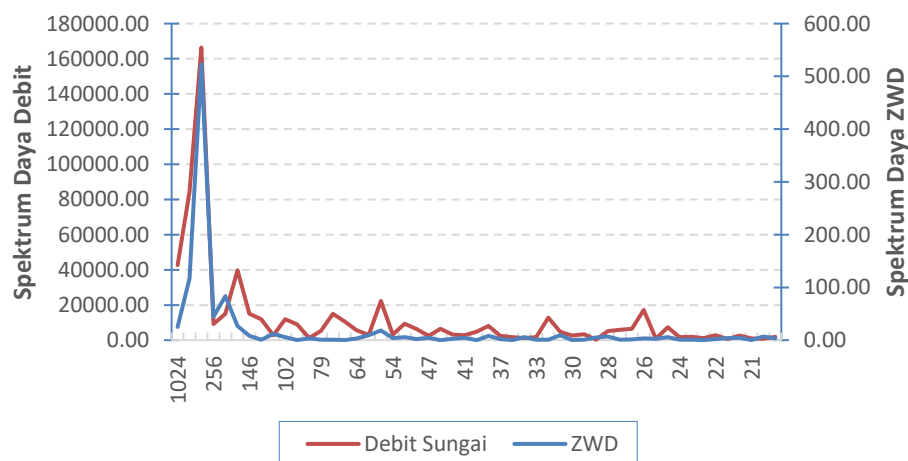
Dalam satu tahun terdapat dua puncak akumulasi uap air dan curah hujan yang dibentuk oleh dua mekanisme monsun yang berbeda. Kedua puncak tersebut terjadi pada bulan November dan April, dimana di antara kedua puncak tersebut terjadi jeda penurunan curah hujan (*monsoon break*) yaitu pada rentang Januari hingga Februari. Musim penghujan di Pulau Jawa secara umum terjadi pada saat posisi semu matahari berada di belahan bumi selatan, di antara *Autumal Equinox* (22 September) dan *Vernal Equinox* (20 Maret). Puncak musim penghujan yang pertama di wilayah Bandung Utara berlangsung pada medio November, yang terjadi sebelum matahari mencapai titik balik selatan (*Winter Soltice*) pada 21 Desember dan sebelum bumi mencapai jarak terdekatnya dengan matahari pada 3 Januari (*perihelion*). Adapun puncak musim penghujan yang kedua terjadi pada minggu pertama April, setelah matahari bergerak ke utara melewati garis ekuator. Musim penghujan pertama dibangkitkan oleh angin pasat baratan (*westerlies*) Monsun Asia, sedangkan musim penghujan kedua dibangkitkan oleh angin pasat timuran (*easterlies*) Monsun Australia. Sabuk tekanan rendah (*monsoon trough*) bermigrasi dalam arah utara-selatan dan mengontrol pergerakan angin pasat (*trade wind*) yang mengalami proses konvergensi pada sabuk ekuator meteorologis (*intertropical convergency zone*), inilah yang mengakumulasi uap air di troposfer dan membangkitkan curah hujan. Migrasi sabuk tekanan rendah ini mengikuti pergerakan semu matahari di atas pulau Jawa. Puncak musim penghujan bukan berlangsung pada saat matahari berada di atas horizon Bandung Utara, yaitu awal Oktober atau awal Maret, akan tetapi terjadi setelah matahari melewati horizon wilayah ini. Itu artinya hujan monsun tidak dibangkitkan secara spontan melalui mekanisme konveksi murni, melainkan ditentukan oleh faktor kecepatan angin yang mengangkat massa udara dan faktor kuantitas uap air yang akan dikondensasi di troposfer.

Puncak musim penghujan pertama (November) terjadi ketika proyeksi matahari sudah bergerak jauh ke selatan Jawa, ketika Jawa dilintasi oleh medan angin yang berasal dari Asia; dimana pergerakan angin ini dikontrol oleh perbedaan temperatur antara kawasan Asia di utara dan Samudera Hindia di selatan. Angin yang masuk ke daratan Jawa membawa uap air yang melimpah, khususnya disuplai oleh Laut Jawa yang mengalami pemanasan radiatif. Melimpahnya uap air dari Laut Jawa dan Selat Karimata diakibatkan oleh pemanasan Paparan Sunda (*Sundaland Craton*) yang dangkal. Secara umum, temperatur permukaan laut dari perairan yang dangkal ini lebih tinggi

daripada temperatur Samudera Hindia yang lebih dalam. Adapun puncak musim penghujan kedua (April) terjadi setelah pergerakan semu matahari melewati titik musim semi (*Vernal Equinox*) pada garis ekuator tanggal 20 Maret. Puncak musim penghujan ini terkait dengan posisi sabuk tekanan rendah di sekitar kawasan utara ekuatorial, dimana massa udara yang bergerak dari Benua Australia yang relatif kering kemudian diperkaya uap air yang disuplai oleh Samudera Hindia sebelum tiba di dataran pulau Jawa. Dengan demikian faktor kecepatan angin pasat sangat mempengaruhi curah hujan monsun di wilayah Bandung Utara. Curah hujan di wilayah ini merupakan produk interaksi antara angin pasat yang membawa uap air dan faktor topografi lokal, dan wilayah Cekungan Bandung dikenal dengan curah hujan yang bertipe lokal. Kandungan uap air troposfer dan curah hujan pada puncak musim penghujan pertama relatif lebih tinggi dari musim penghujan kedua, disebabkan pasokan uap air dari pemanasan Paparan Sunda lebih melimpah daripada pasokan Samudera Hindia.



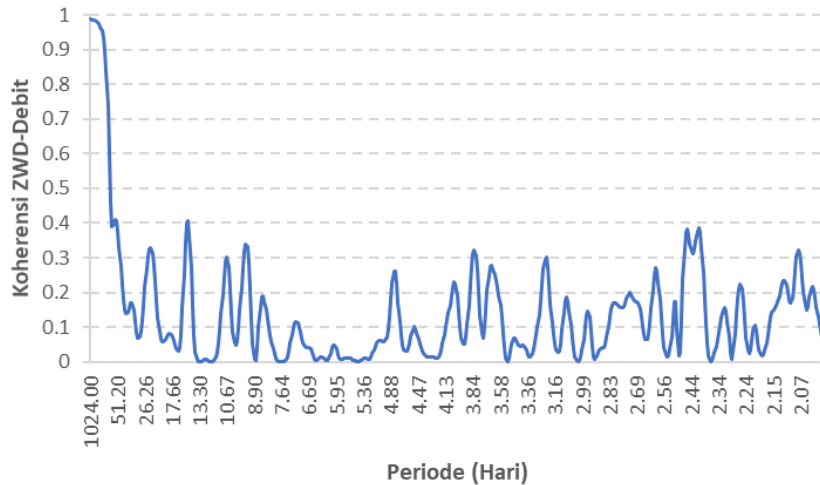
Gambar 8. Grafik rata-rata *ZWD* berdasarkan data harian sepanjang 5 tahun (2011-2015) dan rata-rata debit sungai sepanjang 46 tahun (1971-2016).



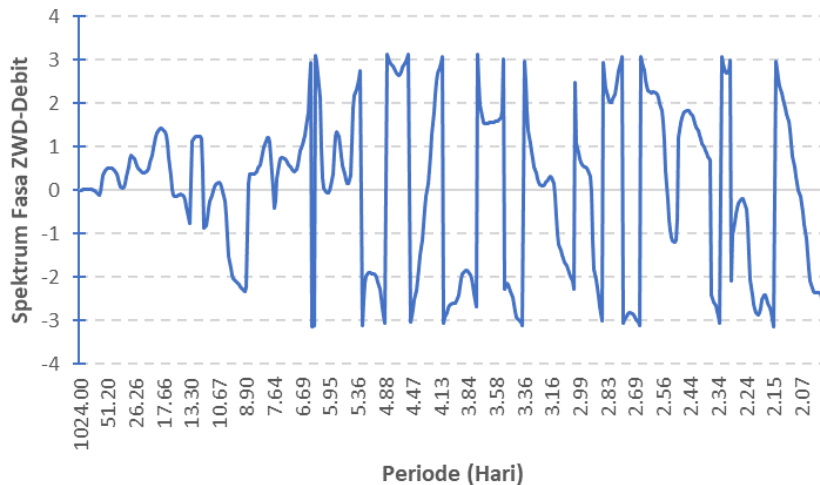
Gambar 9. Spektrum daya *ZWD* dan debit sungai Cikapundung Maribaya.

Gambar 9 menunjukkan grafik rata-rata *ZWD* dan debit sungai, yang secara umum pola temporal keduanya memiliki korelasi yang lebih kuat dibandingkan dengan curah hujan; pengecualian amplifikasi debit terjadi pada musim penghujan kedua ketika tanah sudah mencapai titik jenuh. Dengan demikian, alih-alih menggunakan sampel curah hujan, *ZWD* memiliki potensi untuk menjadi prediktor yang baik bagi sistem hidrologi sungai. Bila curah hujan hanya mewakili satu stasiun observasi saja, debit yang terukur di suatu *outlet* sungai dapat mewakili seluruh curah hujan yang jatuh pada area DAS (*watershed*) sungai tersebut. Mengingat luas area suatu DAS mencakup luas atmosfer di atasnya, maka semua kemungkinan kejadian kondensasi dan presipitasi akan masuk ke dalam area DAS di bawahnya.

Berdasarkan spektrum daya *ZWD* dan debit sungai (**Gambar 9**), kedua kuantitas tersebut didominasi oleh komponen siklus monsun satu tahunan (11,22 bulanan), adapun debit sungai mengandung komponen tambahan tengah tahunan (6,70 bulanan). Karena kedua spektrum tersebut diproses berdasarkan basis data harian yang terbatas pada sampel data lima tahun (2011-2015), maka sinyal-sinyal musimannya jatuh pada area spektral resolusi rendah. Adapun berdasarkan rentang data 46 tahun (1971-2016) terungkap beberapa siklus penting lainnya dengan nilai perioda yang lebih akurat. Dengan sampel yang lebih panjang diperoleh siklus debit sungai 11,91 (*annual*), 6,02 (*semi-annual*), 4 bulanan. Ketiga siklus ini merupakan generator-generator curah hujan utama yang membangkitkan pola musiman curah hujan dan debit sungai di wilayah Bandung Utara (Tanuwijaya dkk., 2018). Namun demikian, berdasarkan pengamatan yang ada, tidak semua stasiun curah hujan di Jawa memiliki komponen tengah tahunan dan 4 bulanan, terutama stasiun-stasiun yang terletak di wilayah pesisir (Tanuwijaya & Liong, 2002).



Gambar 10. Spektrum koherensi *ZWD* dan debit Cikapundung Maribaya.



Gambar 11. Spektrum perbedaan fasa *ZWD* dan debit Cikapundung Maribaya.

Karena panjang data *ZWD* masih terbatas pengamatannya, selain juga terdapat beberapa data yang kosong, maka belum dapat dikonfirmasi tentang keberadaan siklus tengah tahunan dan 4 bulanan pada kandungan uap air di troposfer. Namun untuk siklus dominan satu tahunan dapat dikonfirmasi bahwa antara pola musiman *ZWD* dengan debit sungai relatif tidak ada perbedaan fasa, sebagaimana secara visual ditunjukkan oleh pola temporal keduanya pada **Gambar 8**; dan kedua kuantitas ini memiliki nilai periode spektrum dominan yang sama, yaitu 341,33 harian, seperti ditunjukkan **Gambar 9**. Hal ini ditunjang nilai koherensi, atau korelasi linier, dalam domain frekuensi yang mendekati 1 (yaitu 0,985) seperti ditunjukkan **Gambar 10**; serta nilai perbedaan fasa siklus yang mendekati nol (yaitu 0,0084) seperti ditunjukkan **Gambar 11**.

KESIMPULAN

Besarnya *ZWD* pada data *CGPS*-ITB periode tahun 2011-2015 adalah antara 10-35 cm pada setiap tahunnya. Rataan harmonik dari rata-rata harian *ZWD* berkorelasi sangat baik dengan rataan harmonik dari rata-rata harian debit sungai Cikapundung di stasiun Maribaya, sekalipun terdapat jarak horizontal sejauh 7 km dan perbedaan ketinggian sebesar 458,5 m. Terkait rataan *ZWD* sampel (2011-2015), ia berkorelasi lebih baik terhadap rataan debit dari rentang data yang panjang (1971-2016) dibandingkan dengan rataan debit dari rentang data yang sama (2011-2015), masing-masing berkorelasi sekitar 90% dan 78%. Mengingat sifat datanya yang lebih kontinu, data *ZWD* memiliki potensi sebagai prediktor yang sangat baik bagi sistem hidrologi sungai dibandingkan dengan data curah hujan dari sebuah stasiun tunggal.

Sebagaimana curah hujan dan debit sungai, *ZWD* sebagai kuantitas yang terkait dengan kandungan uap air troposfer wilayah Bandung Utara dikontrol oleh dinamika pertukaran Monsun Asia dan Monsun Australia; dan ketiganya memiliki komponen siklus satu tahunan (*annual*) yang sama sebagai komponen yang paling dominan. Terakhir, data *ZWD* harian dalam rentang sampel 5 tahun (2011-2015) belum dapat memunculkan siklus tengah tahunan (*semi-annual*) dan 4 bulanan sebagaimana bisa diperoleh dari dari curah hujan dan data debit sungai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada seluruh civitas Program Studi Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, ITB, yang senantiasa mendukung kegiatan penelitian kami; khususnya Ketua Program Sarjana serta Ketua Program Magister dan Doktor, bapak Dr. Ir. Agustinus Bambang Setyadji, M.Si. dan bapak Dr. Ir. Dwi Wisayantono, MT. Tidak lupa kami ingin mengucapkan terima kasih kepada seluruh kolega pada Kelompok Keahlian Geodesi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan ITB, tempat kami bertukar pikiran dan saling mendukung dalam berbagai penelitian sehingga kami dapat mewujudkan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H.Z. (2006). *Penentuan Posisi Dengan GPS dan Aplikasinya*. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Bohm, J., and H. Schuh eds. (2013). *Atmospheric Effects in Space Geodesy*. Springer-Verlag, Berlin.
- Charlton, R. 2008. *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. Routledge, New York.
- Kuntjoro, W. (1999). *New Approaches of Tropospheric Delay Determination Using GPS Observation*. Doctorate of Science Thesis the Earth and Planetary Science Division, Kyoto University. Kyoto, Jepang.
- Rakhecha, P.R. and V.P. Singh (2009). *Applied Hydrometeorology*. Springer-Verlag, Berlin.
- Shelton, M.L. (2009). *Hydroclimatology, Perspectives and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Tanuwijaya, Z.A.J. dan T.H. Liong (2002). Analisis faktor dan spektral frekuensi anomali curah hujan Pulau Jawa. *Prosiding Seminar Nasional Statistika*, IPB, 28 September. Bogor.
- Tanuwijaya, Z.A.J, Hendarmawan, A. Sudradjat, dan W. Kuntjoro (2018). *Karakteristik musiman debit sungai Cikapundung di Kawasan Bandung Utara, Jawa Barat*. *Bulletin of Scientific Contributions*, Vol. 16, No. 1, 39-46.
- Wijaya, D.D. (2009). *Atmospheric Correction Formulae for Space Geodetic Techniques*. Doctorate of Technical Sciences Thesis the Faculty of Technical Mathematics and Technical Physics, the Graz University of Technology. Graz, Austria.