ALGORITMA PENENTUAN DAN REKONTRUKSI ARAH KIBLAT TELITI **MENGGUNAKAN DATA GNSS**

(Algorithm of the Determination and Recontruction of the Accurate Qibla Direction using GNSS Data)

Irwan Gumilar¹, Nur Fajar Trihantoro¹, Brian Bramanto¹, Heri Andreas¹, Hasanuddin Z. Abidin^{1,2}, dan Mohamad Gamal¹

> ¹Kelompok Keilmuan Geodesi, Institut Teknologi Bandung, Indonesia ²Badan Informasi Geospasial, Indonesia Labtek IXC Lantai 4, Insititut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha no 10, Bandung E-mail: igumilar@gd.itb.ac.id

> Diterima: 27 Februari 2019, Direvisi: 27 Juni 2019, Disetujui untuk Dipublikasikan: 4 Oktober 2019

ABSTRAK

Kiblat merupakan arah yang dituju umat Muslim ketika melakukan ibadah shalat. Terdapat beberapa dalil baik Al-Quran ataupun As-Sunnah yang mewajibkan ibadah shalat untuk menghadap kiblat. Perkembangan teknologi penentuan posisi dan algoritma pengukuran arah sangat memungkinkan untuk menentukan arah kiblat secara teliti, sekalipun untuk daerah yang tidak memungkinkan untuk melihat Kakbah. Tujuan penelitian ini yaitu menentukan mekanisme perhitungan arah kiblat dan rekonstruksinya menggunakan teknologi GNSS. Metodologi yang dilakukan yaitu dengan menerapkan beberapa metode penentuan posisi menggunakan GNSS untuk menentukan arah kiblat dan perhitungan arah kiblat di atas bidang elipsoid menggunakan metode Vincenty. Rekontruksi arah kiblat dilakukan dengan menerapkan irisan koreksi normal geodesik, koreksi skew normal, dan koreksi defleksi vertikal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode statik, RTK, dan RTPPP GNSS dapat digunakan untuk menentukan arah kiblat. Penerapan metode Vincenty di atas bidang elipsoid untuk penentuan azimut memperlihatkan arah yang tepat ke arah Kakbah. Untuk keperluan rekonstruksi arah kiblat, pemberian koreksi normal geodesik, koreksi skew normal, dan koreksi defleksi vertikal dapat meningkatkan ketelitian sekitar 2 menit. Khusus untuk pengukuran titik backsight dengan RTK, azimut yang didapatkan berbeda sekitar 2 menit dibandingkan dengan metode statik. Perbedaan 2 menit ini menyebabkan arah Kakbah bergeser sekitar 3,6 km, walaupun masih tetap berada di kota Mekah. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan ketelitian yang tinggi untuk pengukuran tepat ke arah kiblat maka harus digunakan metode penentuan posisi statik, menggunakan metode Vincenty di atas elipsoid untuk pengukuran azimutnya, serta menerapkan koreksi irisan normal geodesik, koreksi skew normal, dan koreksi defleksi vertikal untuk rekonstruksinya.

Kata kunci: azimut kiblat, RTK, RTPPP, azimut, Vincenty, reduksi

ABSTRACT

Qibla is the direction that Muslims should be faced during their prayers. There are several propositions in either the Holy Al-Quran or the Sunnah which oblige the Muslims to face the Qibla during their prayers. The current development of positioning technology and the azimuth measurement technology make the determination of the true Qibla is possible. This research aimed to find out the procedure of Qibla determining and its reconstruction using GNSS. The methodology used in this research was by applying several methods in GNSS based point positioning to determine the Qibla direction. The calculation of Qibla direction over the ellipsoid plane was done using the Vincenty method. Thus, the reconstruction of Qibla direction was done by applying a geodesic normal, normal skew, and vertical deflection corrections. The result indicated that the static, RTK, and RTPPP GNSS methods could be used to determine the Qibla direction. For reconstruction purposes, the use of geodesic normal, normal skew, and vertical deflection corrections could improve the accuracy of Qibla direction by about 2 minutes. In backsight azimuth using RTK, it was found that the azimuth differed by about 2 minutes compared to the static method. This deviation would cause shifting of the Kakbah direction by around 3.6 km, though it was still directed to the city of Mecca. Thus, it could be concluded that to obtain higher accuracy of the Qibla direction, the GNSS static positioning method, Vincenty method, and some correctionsof geodesic normal, normal skew and vertical defection should be used.

Keywords: Qibla, RTK, RTPPP, azimuth, Vincenty, reductions

PENDAHULUAN

Shalat merupakan ibadah yang wajib untuk umat muslim di seluruh dunia. Ibadah shalat mewajibkan semua yang melaksanakannya untuk menghadap kiblat. Kiblat adalah suatu arah yang menyatukan arah segenap umat Islam dalam melaksanakan shalat. Adapun titik arah itu sendiri bukanlah objek yang disembah umat muslim melainkan Allah SWT (Brills, 1987). Definisi lain terkait kiblat adalah arah ke Kakbah di mekah pada waktu shalat (Nasional, 2007). (Hambali, 2013) mendefinisikan kiblat sebagai arah menuju Kakbah (Baitullah) melalui jalur terdekat dan menjadi keharusan bagi setiap muslim untuk menghadap ke arah tersebut pada saat melaksanakan shalat, di mana pun berada di belahan dunia ini.

Ada beberapa *nash* yang memerintahkan umat Islam untuk menghadap kiblat dalam shalat baik melalui *nash* Al-Quran ataupun *As-Sunnah*. Adapun nash-nash dalam Al-Quran dapat dilihat dalam Q.S Al-Baqarah/2: 144, 149, dan 150 (Iman, 2017). Adapun salah satu hadis Nabi SAW yang secara tegas menyebutkan kewajiban menghadap kiblat dalam shalat yaitu hadis yang diriwayatkan oleh Imam Bukhari dan Muslim yang artinya: "Dari Abu Hurairrah r.a. Nabi SAW bersabda: bila hendak shalat maka sempurnakanlah berwudlu, lalu menghadap kiblat kemudian takbir (shalat)".

Tanjung (2017) menyimpulkan dari beberapa dalil bahwa kewajiban menghadap Kakbah adalah bagi orang yang mampu melihat Kakbah secara langsung. Akan tetapi, bagi orang yang jauh dari Mekah dan tidak dapat melihat Kakbah secara langsung mayoritas para ulama hanya mewajibkan menghadap ke arah Kakbah (*jihah al-Kakbah*). Dengan kata lain, kiblat bagi orang yang melihat langsung Kakbah adalah 'ainul Kakbah, sedangkan kiblat bagi orang yang tidak dapat melihat langsung Kakbah adalah *jihah al-Kakbah*.

Permasalahan arah kiblat bukan hanya permasalahan di negara berkembang seperti Indonesia, tetapi juga di negara maju seperti Amerika (Saksono, Fulazzaky, & Sari, 2018). Proses geodinamika akibat gempa bumi dan pergerakan lempeng yang terjadi di banyak negara termasuk Indonesia menyebabkan penentuan arah kiblat ini menjadi isu yang banyak didiskusikan. Perkembangan teknologi penentuan menyebabkan penentuan arah/azimut ke arah kiblat semakin teliti, sehingga sangat memungkinkan untuk umat muslim yang berada di wilayah yang tidak dapat melihat Kakbah dapat menghadap ke fisik Kakbah ('ainul Kakbah). Perhitungan arah kiblat umumnya dilakukan dengan menggunakan ilmu ukur segitiga bola (spherical trigonometry) yang mengasumsikan bumi sebagai bola. Arah kiblat bisa ditentukan dengan menghitung azimut kiblat dan dengan mengetahui posisi matahari (rashdul kiblat). Penentuan azimut kiblat biasanya menggunakan

pengamatan matahari atau kompas. Penentuan arah kiblat memerlukan mekanisme perhitungan yang tepat agar menghasilkan arah yang teliti. Beberapa koreksi harus diterapkan baik untuk perhitungan maupun rekonstruksi arah kiblat.

Saat ini telah berkembang sistem penentuan posisi berbasis satelit yang mempunyai ketelitian tinggi yang dikenal dengan *Global Navigation* Satellite System (GNSS), GNSS adalah sistem penentuan posisi berbasis satelit vang terdiri atas satelit seperti, berbagai konstelasi Global Positioning System (GPS) milik Amerika, Beidou Satellite System (BDS) milik China, GLONASS milik Rusia, Galileo milih Uni-Eropa, serta Quasi Zenith System milik Jepang. Satellite Sistem memberikan informasi posisi tiga dimensi, kecepatan, dan waktu semua objek di atas dan dekat dengan permukaan bumi (Bramanto, Gumilar, Abidin, Prijatna, & Adi, 2017; Gumilar, Pamungkas, Abidin, Bramanto, & Adi, 2017; Hoffman-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2007).

Keuntungan dari penggunaan GNSS yaitu dapat digunakan oleh semua orang dalam waktu bersamaan di seluruh dunia, tidak tergantung cuaca dan topografi, lebih cepat dan akurat. Karena dapat memberikan informasi posisi, maka GNSS dapat dipakai untuk menentukan arah, termasuk arah kiblat. Karena GNSS mengacu kepada elipsoid maka pengukuran arah kiblat pun akan mengacu kepada model elipsoid bumi (*ellipsoidal model of the earth*). Pengukuran arah kiblat dengan menggunakan model elipsoid bumi lebih akurat dibandingkan dengan model bumi *spheroid* (Saksono et al., 2018).

Perkembangan teknologi GNSS saat ini mempunyai kecenderungan semakin cepat dan semakin akurat dalam menentukan posisi, serta semakin murah, dan yang terpenting adalah semakin mudah digunakan. Salah satu metode GNSS yang dapat memberikan informasi posisi tiga dimensi langsung saat itu (real time) yaitu metode Real Time Kinematic (RTK) dan Real Time Precise Point Positioning (RTPPP). Keberadaan Continously Operating Reference System (CORS) GNSS yang dikelola oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) dan Badan Pertanahan Nasional (BPN) dapat memberikan koreksi untuk pengukuran RTK, sehingga mempermudah pengukuran arah kiblat dengan metode RTK (Abidin et al., 2010). Tujuan penelitian ini adalah menentukan algoritma perhitungan arah kiblat dan rekonstruksinya menggunakan data GNSS statik dan *real time*. Penelitian diharapkan dapat memberikan alternatif metode untuk penentuan arah kiblat secara cepat dan teliti.

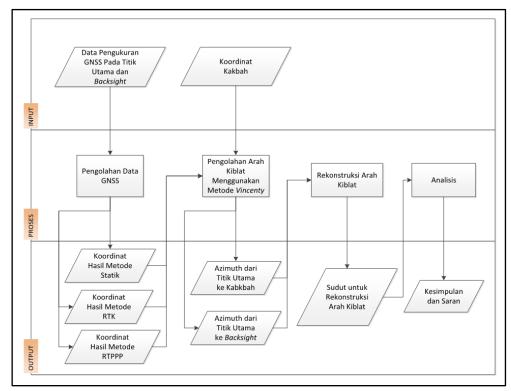
METODE

Penelitian ini dilakukan di Banjaran, Kabupaten Bandung, Jawa Barat (**Gambar 1**). Penelitian dilakukan dengan menggunakan set peralatan GNSS sebagai penentuan koordinat teliti dan set peralatan Total Station (TS) Topcon MS05 dengan ketelitian sudut sebesar 0,5" sebagai alat rekonstruksi arah kiblat. Penentuan arah kiblat dapat dibagi menjadi beberapa tahapan, diawali dengan pengukuran GNSS menggunakan metode

pengamatan GNSS Statik, RTK, dan RTPPP. Selanjutnya dilakukan pengolahan data GNSS, yaitu perhitungan arah kiblat menggunakan metode Vincenty dari posisi yang didapatkan pada tahapan sebelumnya, dan rekonstruksi arah kiblat dengan menerapkan koreksi yang terkait.

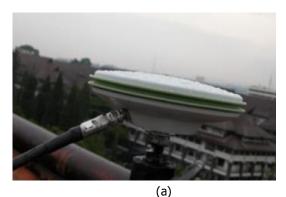


Lokasi penelitian ditunjukkan oleh lingkaran kuning. Gambar 1.



Gambar 2. Sistematika alur penelitian.

Gambar 32 menunjukkan sistematika alur penelitian ini. Pengukuran GNSS dengan metode statik dan RTK dilakukan terikat terhadap titik ITB1 dan CORS GNSS milik BIG yang ditunjukkan pada **Gambar 3**. Jarak *baseline* yaitu kurang dari 10 km dan 20 km untuk masing-masing *baseline* ITB1 dan CORS CANG yang dikelola oleh BIG.





Sumber: <u>srgi.big.go.id</u>

Gambar 3. CORS ITB1 (a) dan CORS CANG (b).

Penentuan Posisi Menggunakan GNSS

Pengukuran jarak menggunakan GNSS dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu *pseudorange* dan *phaserange*. Selama penjalarannya, sinyal GNSS mengalami berbagai hambatan yang menyebabkan adanya kesalahan dalam pengukuran jarak menggunakan GNSS. Penjalaran sinyal GNSS dari *receiver* ke satelit (Xu, 2007) dapat dilihat pada **Persamaan 1** dan **2**.

$$\begin{split} P_i &= \rho + d\rho + d_{trop} + d_{ion} + c(dt - dT) + MP_i + \delta P_i \dots (1) \\ L_i &= \rho + d\rho + d_{trop} + d_{ion} + c(dt - dT) + ML_i + \lambda_i N_i + d_{ion} + d_{i$$

 δL_i(2)

di mana:

P dan L : pseudorange dan phaserange
 subskrip i : frekuensi dan konstelasi satelit

yang digunakan

 ρ : jarak geometris sebenarnya

 $d\rho$: kesalahan orbit

 d_{trop} dan d_{ion} : kesalahan troposfer dan ionosfer

c : kecepatan cahaya

 $dt \, dan \, dT$: kesalahan receiver dan satelit $M \, dan \, \delta$: Kesalahan multipath dan derau

 λ dan N : panjang gelombang dan ambiquitas fase

Pada metode statik dan RTK, pengukuran dilakukan dengan setidaknya dua buah *receiver* yang pada salah satunya telah memiliki koordinat definitif. Metode statik dan RTK menggunakan pengamatan *double difference* untuk mereduksi hingga mengeliminasi kesalahan yang terjadi pada penjalaran sinyal. Pengamatan *double difference* dilakukan dengan mengurangi pengamatan *single difference* antar *receiver* dan satelit. Pengamatan *single difference* pada *phaserange* dapat dilihat pada **Persamaan 3** (Bramanto et al., 2017).

di mana:

 $\Delta_{A,B}$: pengurangan antara $\emph{receiver}$ A

dan B

superskrip *j* : satelit yang diamati

Pada tahapan ini, kesalahan jam satelit dapat tereliminasi, sedangkan kesalahan/bias troposfer dan ionosfer dapat tereliminasi atau tereduksi tergantung berdasarkan panjang *baseline* yang teramati. *Multipath* dan derau diabaikan mengingat kesalahan tersebut tidak dapat dieliminasi (Hoffman-Wellenhof et al., 2007).

Kesalahan jam *receiver* yang tersisa kemudian dieliminasi dengan menerapkan *double difference* atau pengurangan antara dua buah pengamatan *single difference*. Secara matematis, pengamatan *double difference* seperti yang ditunjukkan pada **Persamaan 4.**

$$\Delta \nabla L_{A,B}^{jk} = \Delta \rho_{A,B}^{jk} + \lambda N_{A,B}^{jk}.....(4)$$

di mana superskrip j dan k menunjukkan dua satelit yang berbeda. Dengan menerapkan linierisasi dan *least square*, maka diperoleh parameter berupa dX, dY dan dZ yang merupakan beda posisi antara titik definitif dan titik yang dicari dan N yang merujuk pada ambiguitas fase

Pada metode RTPPP, pengukuran dilakukan dengan satu buah *receiver* saja sehingga pengukuran RTPPP merupakan penentuan posisi dengan metode absolut. Oleh karena itu diperlukan data koreksi tambahan serta penanganan reduksi kesalahan yang berbeda dengan metode statik dan RTK agar diperoleh posisi dengan ketelitian yang tinggi.

Kesalahan ionosfer pada RTPPP direduksi dengan kombinasi linier *ionospheric-free* untuk menghilangkan kesalahan ionosfer orde satu yang terjadi selama penjalaran sinyal GNSS. Kombinasi linier *ionospheric-free* untuk *phaserange* ditunjukkan pada **Persamaan 5** (Gao & Chen, 2004):

$$L_{IF} = \rho + d\rho + d_{trop} + c(dt - dT) + ML_{IF} + \frac{\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2}{f_1^2 - f_2^2} + \\ \delta L_{IF} - \dots$$
 (5) di mana:

 ML_IF dan $\delta \mathit{L}_\mathit{IF}$: merupakan $\mathit{multipath}$ dan

derau akibat kombinasi linier *ionospheric-free*

 f_1 dan f_2 : merupakan frekuensi yang

digunakan

Pada Persamaan 5 terlihat bahwa masih terdapat kesalahan orbit dan kesalahan jam satelit. Kedua kesalahan tersebut harus dihilangkan dengan tambahan data yang lain, yaitu data orbit dan koreksi waktu satelit teliti yang dapat diperoleh organisasi penyedia data melalui International GNSS Service (IGS). Data tersebut dapat diunduh beberapa saat setelah pengukuran berlangsung. Pada RTPPP, data orbit dan satelit teliti diperoleh oleh masing-masing pabrikan yang diunduh secara *real-time* melalui bantuan satelit *L*-Band. Kesalahan troposfer dan kesalahan jam receiver dapat diestimasi, sedangkan kesalahan *multipath* dan derau diabaikan. Kesalahan hydrostatic delay pada kesalahan troposfer dapat dihilangkan dengan model yang ada seperti model Saastamoinen (Saastomoinen, 1972) dan kesalahan wet delay pada kesalahan troposfer dapat diestimasi.

Dengan demikian, secara matematis **Persamaan 5** dapat disederhanakan sebagaimana **Persamaan 6** berikut:

$$L_{IF} = \rho + mf.zwd + c.dt + \frac{\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2}{f_1^2 - f_2^2}$$
....(6)

di mana:

mf : merujuk kepada mapping function

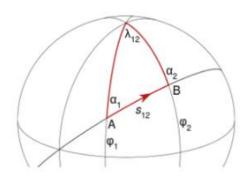
yang digunakan

zwd : wet delay pada kesalahan troposfer

Berbeda dengan hasil parameter pada metode statik dan RTK, pada metode RTPPP didapat hasil parameter berupa X, Y, Z yang merupakan koordinat posisi yang dicari dan zwd, dt, dan N.

Penentuan Azimut dengan Metode Vincenty

Dalam berbagai keperluan di bidang geodesi, metode *Vincenty* banyak digunakan karena tingkat akurasi yang tinggi, terutama untuk menentukan arah dan jarak antara dua titik yang saling berjauhan (Tseng, Guo, & Liu, 2013). Metode *Vincenty* dikembangkan dengan mengasumsikan bentuk bumi yang mendekati elipsoid (**Gambar 4**) (Vincenty, 1975). Penggunaan elipsoid tersebut menyebabkan hasil perhitungan azimut dan jarak dapat lebih mendekati yang sebenarnya daripada menggunakan persamaan segitiga bola.



Gambar 4. Ilustrasi azimut dalam pendekatan Vincenty.

Penentuan azimut menggunakan prinsip inverse problem. Dua set koordinat diperlukan dalam sistem koordinat geodetik (φ, λ) . Penentuan arah dalam metode *Vincenty* didefinisikan sebagaimana **Persamaan 7 s.d. 13** berikut:

di mana:

 σ : jarak busur antara dua titik pada bumi

bulat

 λ : inisiasi awal nilai dari perbedaan dua

bujur ($\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$)

 σ_m : jarak busur dari ekuator terhadap titik

tengah lintasan

F : penggepengan elipsoid

: azimut geodesik di ekuator

 $U_1 \& U_2$: lintang reduksi

Lintang reduksi didefinisikan sebagaimana **Persamaan 14** dan **Persamaan 15** berikut:

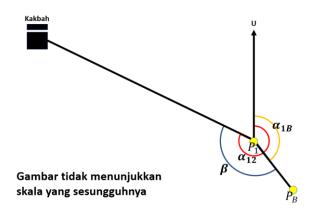
$$U_1 = \arctan((1 - F) \tan \varphi_1)$$
....(14)
 $U_2 = \arctan((1 - F) \tan \varphi_2)$(15)

Perhitungan dilakukan secara iteratif sehingga nilai LL konvergen dengan akurasi 10^{-12} . Kemudian Azimut (α_{AB}) diperoleh melalui **Persamaan 16** berikut:

$$\alpha_{AB} = \arctan\left(\frac{\cos U_2 \sin LL}{\cos U_1 \sin U_2 - \sin U_1 \cos U_2 \cos \lambda}\right).$$
 (16)

Rekonstruksi Arah Kiblat

Rekonstruksi arah kiblat dilakukan dengan TS. Pada dasarnya diperlukan dua buah azimut, yaitu azimut dari titik P_1 ke P_2 (Kakbah) dan titik P_1 ke titik P_B . Hal ini dilakukan karena pada perangkat TS yang diukur adalah beda sudut horizontal antara dua titik, bukan azimut. Pada penelitian ini, ilustrasi rekonstruksi arah kiblat ditunjukkan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Ilustrasi rekonstruksi arah kiblat.

Sudut β yang digunakan untuk rekonstruksi arah kiblat dapat dilihat pada **Persamaan 17**.

$$\beta = \alpha_{12} - \alpha_{1B}....(17)$$

dimana:

 $lpha_{12}$: azimut dari titik P_1 ke Kakbah $lpha_{1B}$: azimut dari titik P_{1B} ke titik P_{1B}

 β : sudut horizontal titik $P_B - P_1 - P_2$ (Kakbah)

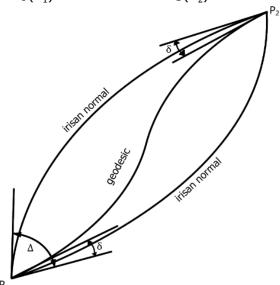
Perlu diperhatikan bahwa sudut β hasil perhitungan metode *Vincenty* masih merupakan hitungan dalam bidang elipsoid, sedangkan rekonstruksi arah kiblat menggunakan TS dilakukan dalam bidang topografi. Beberapa koreksi/reduksi ukuran sudut perlu diterapkan terhadap hasil perhitungan sebelum dapat digunakan dalam proses rekonstruksi arah kiblat. Koreksi tersebut yaitu koreksi irisan normal geodesik, koreksi *skew normal*, dan koreksi efek defleksi vertikal.

Koreksi irisan normal geodesik merupakan koreksi yang diterapkan karena terdapat perbedaan antara seksi normal dan garis geodesik pada permukaan elipsoid (Gambar 6). Koreksi ini berbanding lurus dengan jarak antara kedua buah titik. Mengingat jarak titik P_1 yang jauh dari P_2 Kakbah (8.100 km) maka pengaruh kesalahan irisan normal geodesik untuk azimut dari titik P_1 ke titik P_2 (α_{12}) ini cukup besar sehingga diperhitungkan. Koreksi untuk azimut titik P_1 ke titik backsight $P_B(\alpha_{1B})$ relatif kecil sehingga dapat diabaikan.

Koreksi irisan normal geodesik dapat dilihat pada **Persamaan 18**.

$$\delta g = \frac{e^2 s^2 \cos^2 \varphi_m \sin 2\alpha_{12}}{12N_m^2}....(18)$$

Dalam hal ini jarak geodesik dari titik P_1 (masjid) ke titik P_2 (Kakbah) ditentukan dengan e merupakan eksentrisitas, φ_m merupakan rata-rata dari lintang titik P_1 (φ_1) dan lintang titik P_2 (φ_2), N_m merupakan rata-rata dari radius lengkung normal di titik P_1 (N_1) dan normal di titik P_2 (N_2).



Gambar 6. Ilustrasi koreksi irisan normal geodesik.

Koreksi skew normal merupakan koreksi yang diterapkan karena terdapat perbedaan tinggi antara titik P_1 dan titik P_2 yang menyebabkan garis normal elipsoid pada kedua buah titik berbeda. Perbedaan garis normal ini menyebabkan perbedaan terhadap azimut ukuran dan azimut sebenarnya (**Gambar 7**). Namun umumnya kesalahan ini besarnya minimum sehingga dalam keperluan praktis, kesalahan skew normal sering diabaikan. Tinggi yang digunakan untuk menghitung koreksi skew normal yaitu tinggi titik P_2 (Kakbah) sebesar 282,2016 m dari permukaan elipsoid.

Koreksi *skew* normal dapat dilihat pada **Persamaan 19** berikut:

$$\delta h = \frac{h_2}{M_m} e^2 \sin \alpha_{12} \cos \alpha_{12} \cos^2 \varphi_2....(19)$$

dimana:

 h_2 : tinggi geodetik P_2 (Kakbah)

 M_m : radius lengkung meridian rata-rata dari titik

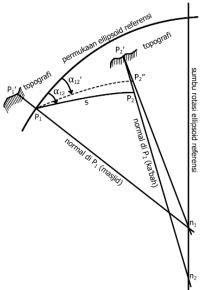
 P_1 dan titik P_2

 α_{12} : azimut dari titik P_1 ke P_2 (yang sudah dikoreksi dengan koreksi irisan normal geodesik dan koreksi efek defleksi vertikal)

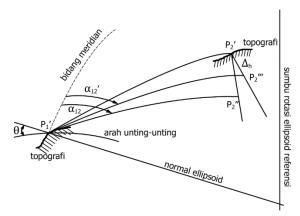
 φ_2 : lintang geodetik di titik P_2

Koreksi efek defleksi vertikal merupakan koreksi yang diterapkan karena terdapat perbedaan antara garis unting-unting (plumbline atau normal gayaberat) dan garis normal elipsoid di titik P_1 dan titik P_2 . Adanya defleksi ini menyebabkan perbedaan antara arah azimut sebenarnya dan azimut ukuran. Ilustrasi koreksi efek defleksi

vertikal ditunjukkan pada **Gambar 8**. Hitungan koreksi ini memerlukan data defleksi vertikal ke arah barat timur (η) dan defleksi vertikal ke arah utara selatan (ξ).



Gambar 7. Ilustrasi koreksi skew normal.



Gambar 8. Ilustrasi koreksi efek defleksi vertikal.

Koreksi efek defleksi vertikal dapat dilihat pada Persamaan 20.

$$\delta\theta = -(\xi_1 \sin \alpha_{12} - \eta_1 \cos \alpha_{12}) \cot z.....(20)$$

dimana:

: defleksi vertikal ke arah barat timur di titik P_1 ξ_1 (masjid)

defleksi vertikal ke arah utara selatan di titik

sudut zenit dari titik P_1 ke arah titik P_2 (Kakbah)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Posisi Menggunakan Teknologi **GNSS**

Pengukuran metode statik dilakukan selama 6 jam dengan dua jenis *baseline*, yaitu jarak pendek (7,2 km) dan baseline jarak sedang (18,6 km).

Baseline dibuat dengan mereferensikan titik yang diukur (P_1 dan P_2) dengan titik referensi CORS. Baseline pendek dibuat dengan mereferensikan titik ukuran ke stasiun CORS milik BIG, stasiun CANG (-7° 01′ 16,58″, 107° 31′ 29,09″) sedangkan baseline panjang dibuat dengan mengikatkan titik ke CORS milik ITB, stasiun ITB1 (-6° 53' 29,50", 107° 36′ 43,23″).

Pengukuran RTK dilakukan dengan titik referensi yang sama dengan pengukuran statik, CORS CANG dan CORS ITB1. Hasil pengukuran RTK dan RTPPP mendapatkan koordinat titik langsung setelah pengukuran, sedangkan pengukuran statik dilakukan post processing dengan perangkat lunak komersil Leica Geo Office. Koordinat hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Koordinat titik P_1

Metode	Lintang (°′″)	Bujur (° ′ ″)	Tinggi (m)
Statik <i>Baseline</i> Pendek	-7 3 23,40409	107 34 45,92060	692,316
Statik <i>Baseline</i> Sedang	-7 3 23,40425	107 34 45,92055	692,299
RTK Jarak Pendek	-7 3 23,40410	107 34 45,92156	692,332
RTK Jarak Sedang	-7 3 23,40423	107 34 45,92146	692,202
RTPPP	-7 3 23,41226	107 34 45,92682	692,411

Tabel 2. Koordinat titik P_B .

	Metode	Lintang (°′″)	Bujur (° ′ ″)	Tinggi (m)
-	Statik <i>Baseline</i> Pendek	-7 3 25,05547	107 34 46,48164	692,990
	Statik <i>Baseline</i> Sedang	-7 3 25,05563	107 34 46,48152	692,979
	RTK Jarak Pendek	-7 3 25,05522	107 34 46,48116	692,981
	RTK Jarak Sedang	-7 3 25,05467	107 34 46,48057	692,963
	RTPPP	-7 3 25,06268	107 34 46,48523	693,113

GNSS Hasil pengukuran menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan antara koordinat geodetik dari dua pengukuran GNSS statik dengan ambiguitas fase yang terpecahkan. Perbedaan tersebut berada dalam tingkatan milimeter untuk komponen horizontal dan sentimeter untuk komponen vertikal. Namun, pada metode RTK,

akurasi yang didapatkan berada dalam tingkatan sentimeter untuk komponen horizontal dan vertikal dibandingkan dengan koordinat pengukuran statik. Hasil pengukuran RTPPP bila dibandingkan dengan metode pengukuran statik terdapat perbedaan pada tingkatan desimeter ke arah tenggara. Hal ini akibat dari penggunaan dinamik dalam pengukuran (Bramanto, Gumilar, & Kutjoro, 2015), sehingga koordinat memiliki posisi pada epoch saat pengukuran, sedangkan metode lain menggunakan datum semi-dinamik SRGI2013 di mana koordinat yang dihasilkan merupakan posisi pada *epoch* 2012.0. Perbedaan nilai koordinat yang diperoleh untuk setiap metode secara detail dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Perbedaan koordinat setiap metode bila dibandingkan dengan koordinat statik *baseline* pendek untuk titik P_1 .

Metode		Easting (cm)	Northing (cm)	Tinggi (cm)
Statik pendek	baseline	0	0	0
Statik sedang	baseline	-2,36	0,01	-1,7
RTK jarak pendek		-5,25	0,06	1,60
RTK jarak sedang		-4,94	-0,46	-11,4
RTPPP		-21,26	25,23	9,54

Tabel 4. Perbedaan koordinat setiap metode bila dibandingkan dengan koordinat statik baseline pendek untuk titik Pa.

Metode		Easting (cm)	Northing (cm)	Tinggi (cm)
Statik Pendek	Baseline	0	0	0
Statik Sedang	Baseline	-2,26	0,26	-1,1
RTK Jarak Pendek		-1,11	0,98	-0.9
RTK Jarak Sedang		0,69	-2,68	-2.70
RTPPP		-13,48	22,02	12.3

Penentuan Azimut Kiblat

Perhitungan azimut dengan metode *Vincenty* menggunakan kumpulan koordinat yang diperoleh pada proses pengolahan data GNSS. Azimut yang dihitung yaitu Azimut dari titik P_1 ke P_2 (Kakbah) dan Azimut dari titik P_1 ke titik P_2 . Koordinat Kakbah yang digunakan adalah 21° 25′ 20,95″, 39° 49′ 34,34″, dan 282,202 m.

Tabel 5 merupakan azimut yang didapatkan untuk setiap metode *Vincenty*.

Tabel 5. Azimut untuk titik P_1 ke P_2 (Kakbah) dan untuk titik P_1 ke P_2 .

Metode	Azimut P_1 ke P_2	Azimut P_1 ke P_B
	(α_{12})	(α_{1B})
Statik <i>Baseline</i> Pendek	295 5 19,47712	161 15 9,21882
Statik Baseline Sedang	295 5 19,47718	161 15 17,05135
RTK Jarak Pendek	295 5 19,47688	161 17 40,52061
RTK Jarak Sedang	295 5 19,47694	161 18 9,592600
RTPPP	295 5 19,47786	161 19 27,26002

Pada jarak yang sangat jauh seperti yang ditunjukkan pada titik P_1 ke titik P_2 (Kakbah) yang mencapai lebih dari 8.000 km, terlihat bahwa azimut yang didapat tidak memiliki perbedaan yang signifikan, dengan perbedaan hanya 4 angka di belakang koma pada komponen detik untuk masing-masing metode. Perhitungan azimut ke titik backsight memiliki rentang kesalahan ukuran sudut hingga 2 menit bila dilakukan perbandingan antara metode RTK dan statik *baseline* pendek, walaupun perbedaan koordinat antara metode RTK dan statik baseline pendek hanya beberapa sentimeter. Hal ini terjadi karena jarak baseline yang relatif pendek dari titik P_1 ke titik *backsight*, sehingga perbedaan dalam sentimeter tingkatan memberikan pengaruh yang besar pada ukuran sudut. Sebaiknya, baseline antara titik P_1 dan titik backsight dibuat sejauh mungkin namun tetap mempertimbangkan tingkat akurasi dari TS yang digunakan untuk rekonstruksi arah kiblat. Metode RTPPP memiliki kesalahan ukuran sudut mencapai 3 menit bila dibandingkan dengan metode statik baseline pendek.

Koreksi dan Rekonstruksi Arah Kiblat

Tahapan ini memerlukan data defleksi vertikal yang diperoleh dari model global EGM2008 dengan ukuran grid 2,5′x2,5′. Defleksi vertikal di titik P_1 didapat dengan interpolasi *bi-linear* dengan nilai $\xi_1=16,6708$ " dan $\eta_1=-5,2751$ ". **Tabel 6** dan **Tabel 7** merupakan rangkuman dari besarnya koreksi yang diterapkan pada masing-masing azimut α_{12} dan α_{1B} . Proses reduksi dari masing-masing azimut tersebut dapat dilakukan dengan **Persamaan 21** dan **Persamaan 22** berikut:

$$\alpha_{12}' = \alpha_{12} - (\delta g_{12} + \delta h_{12} + \delta \theta_{12})$$
(21)

$$\alpha_{1B}' = \alpha_{1B} - (\delta g_{1B} + \delta h_{1B} + \delta \theta_{1B})$$
(22)

Setelah diperoleh $\alpha_{12}{}'$ dan $\alpha_{1B}{}'$ terkoreksi kemudian dihitung sudut β melalui **Persamaan 23**. Sudut β inilah yang dapat direkonstruksi (*stake out*) untuk mendapatkan arah kiblat di lapangan. Tahap rekonstruksi arah kiblat dilakukan dengan perangkat TS.

$$\beta_{12} = \alpha_{12}' - \alpha_{1B}'$$
(23)

Validasi Arah Kiblat

Validasi ditunjukkan dengan visualisasi arah Kakbah dengan penggambaran azimut dari titik ke Kakbah. Namun, perlu diperhatikan bahwa sistem proyeksi yang digunakan dalam proses validasi ini harus dalam sistem proyeksi azimutal, yaitu sistem proyeksi yang mempertahankan arah, bukan menggunakan sistem proyeksi yang umum seperti mercator yang mempertahankan bentuk. Azimut yang digunakan untuk proses validasi merupakan azimut hasil hitungan yang masih di atas bidang elipsoid. Azimut di atas bidang elispoid sama dengan azimut di atas bidang proyeksi pada sistem proveksi azimutal.

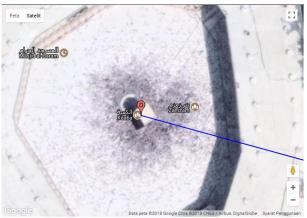
Visualisasi dalam proses validasi ini dilakukan menggunakan bantuan website dengan (geomidpoint.com). Visualisi titik jatuh dari hasil rekonstruksi azimut dan jarak titik P_1 ke P_2 (Kakbah) untuk metode statik ditunjukkan pada Gambar 9.

Tabel 6. Azimut α_{12} beserta koreksi yang diberikan.

Metode	Azimut P_1 ke P_2 hitungan (α_{12})	Koreksi irisan normal geodesik (δg) dalam "	Koreksi <i>skew</i> normal (δh) dalam "	Koreksi defleksi vertikal $(\delta heta)$ dalam "	Azimut P_1 ke P_2 terkoreksi (α_{12} ')
Statik <i>Baseline</i> Pendek	295 5 19,48077	-138,00889	-0,01392	-9,39043	295 7 46,89036
Statik <i>Baseline</i> Sedang	295 5 19,48083	-138,00889	-0,01392	-9,39043	295 7 46,89042
RTK Jarak Pendek	295 5 19,48052	-138,00889	-0,01392	-9,39043	295 7 46,89012
RTK Jarak Sedang	295 5 19,48059	-138,00889	-0,01392	-9,39043	295 7 46,.89018
RTPPP	295 5 19,48151	-138,00890	-0,01392	-9,39043	295 7 46,89111

Tabel 7 Azimut α_{-} beserta koreksi yang diberikan

Metode	Azimut P_1 ke P_B hitungan (α_{1B}) $({}^{\circ}$ $'$ $")$	Koreksi irisan normal geodesik (δg) dalam "	Koreksi <i>skew</i> normal (δh) dalam "	Koreksi defleksi vertikal $(\delta \theta)$ dalam "	Azimut P_1 ke P_B terkoreksi (α_{1B} ')
Statik <i>Baseline</i> Pendek	161 15 9,21882	0	-0,00419	0	161 15 9,22301
Statik <i>Baseline</i> Sedang	161 15 17,05135	0	-0,00419	0	161 15 17,05555
RTK Jarak Pendek	161 17 40,52061	0	-0,00418	0	161 17 40,52480
RTK Jarak Sedang	161 18 9,59260	0	-0,00419	0	161 18 9,59680
RTPPP	161 19 27,26002	0	-0,00418	0	161 19 27,26419



Gambar 9. Titik jatuh dari hasil rekonstruksi azimut dan jarak titik P_1 ke P_2 (Kakbah).

Berdasarkan **Tabel 5**, **Tabel Tabel 6**, dan **Tabel 7**, dapat dilihat bahwa akurasi azimut untuk backsight memiliki rentang kesalahan hingga 2 menit pada metode RTK dan mencapai 3 menit pada metode RTPPP. Kesalahan titik jatuh rekonstruksi arah kiblat melenceng mencapai 3,6 km dari Kakbah untuk kesalahan 2 menit dan 5,4 km untuk kesalahan 3 menit. Jarak tersebut didapat dengan menghitung jarak lurus dari titik jatuh yang didapatkan dengan mempertimbangkan kesalahan 2 hingga 3 menit dengan titik Kakbah. Gambar 10 menunjukkan ilustrasi titik jatuh dari hasil rekonstruksi kiblat arah dengan mempertimbangkan kesalahan sebesar 2 menit.



Gambar 10. Titik jatuh dari hasil rekonstruksi arah kiblat dengan mempertimbangkan kesalahan sebesar 2 menit dan 3 menit (titik merah dengan keterangan metode yang digunakan).

KESIMPULAN

Penentuan arah kiblat yang teliti dan rekonstruksinya memerlukan data posisi yang teliti beserta algoritma perhitungan yang tepat, khususnya untuk di daerah yang sangat jauh dari Kakbah seperti di Indonesia. Hal tersebut dilakukan agar arah Kiblat tepat ke arah Kakbah. Saat ini data posisi tempat berdiri alat untuk keperluan rekonstruksi dan *backsight*-nya dapat diperoleh dari data GNSS dengan metode statik maupun real time (RTK dan RTPPP). Perhitungan azimut menggunakan metode Vincenty di atas bidang elipsoid bumi memberikan hasil yang sangat baik. Perhitungan azimut menggunakan data RTK dan RTPPP memiliki penyimpangan sekitar 2 hingga 3 menit terhadap hasil statik yang ketelitiannya dalam fraksi milimeter untuk komponen horizontal sehingga arah kiblat menyimpang sekitar 3,6 hingga 5,4 km dari Kakbah. Penggunaan metode statik, RTK, dan RTPPP dapat digunakan untuk penentuan arah kiblat karena metode tersebut sesuai dengan apa yang diriwayatkan pada beberapa hadis. Dengan penggunaan metode statik, umat muslim dapat menghadap kakbah secara tepat, sedangkan untuk metode RTK dan RTPPP meskipun memiliki kesalahan hingga 5,4 km, umat muslim masih dapat menghadap Mekkah secara tepat. Pada saat rekonstruksi arah kiblat, hasil perhitungan azimut harus menerapkan irisan koreksi normal geodesik, koreksi skew normal, dan koreksi defleksi vertikal agar tepat ke arah Kakbah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada para *reviewer* yang telah membantu meningkatkan kualitas dari penulisan ini. Penelitian ini didukung oleh Program Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat dan Inovasi ITB (P3MI-ITB) tahun 2019.

DAFTAR PUSTAKA

Abidin, H. Z., Subarya, C., Muslim, B., Adiyanto, F. H., Meilano, I., Andreas, H., & Gumilar, I. (2010). The applications of GPS CORS in Indonesia: status, prospect and limitation. *FIG Congress 2010*. Sydney.

Bramanto, B., Gumilar, I., Abidin, H. Z., Prijatna, K., & Adi, F. S. (2017). Assessment of the BeiDou Data Quality and the Positioning Performance: A Perspective from Bandung, Indonesia. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, 49(3), 191–204.

Bramanto, B., Gumilar, I., & Kutjoro, W. (2015). RT-PPP: Concept and Performance in Indonesia Region. *FIT ISI 2015*. Batu.

Brills, W. K. (1987). Encyclopedia of Islam, Vol. 3.

Gao, Y., & Chen, K. (2004). Performance Analysis of Precise Point Positioning using Real-Time Orbit and Clock Products. *Journal of Global Positioning System*, *3*(1–2), 95–100.

Gumilar, I., Pamungkas, A. I., Abidin, H. Z., Bramanto, B., & Adi, F. S. (2017). Contribution of BeiDou Positioning System for Accuracy Improvement: A Perspective from Bandung, Indonesia. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, 49, 171–184.

Hambali, S. (2013). *Ilmu Falak Arah Kiblat Setiap Saat*.

- Yogyakarta: Pustaka Ilmu Yogyakararta.
- Hoffman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2007). GNSS – Global Navigation Satellite Systems. Wien: Springer-Verlag.
- Iman, I. R. (2017). Peranan Arah Kiblat Terhadap Ibadah Shalat. Jurnal Syari'ah Dan Hukum Diktum, 15(2),
- Nasional, D. P. (2007). Kamus Besar Bahasa Indonesia. Jakarta: Balai Pustaka.
- Saastomoinen, J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. In M. W. Henriksen, A. Mancini, & B. Chovitz (Eds.), The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophys. Monogr. Ser., vol. 15. Washington, D. C.: AGU.
- Saksono, T., Fulazzaky, M. A., & Sari, Z. (2018). Geodetic Analysis of Disputed Accurate Qibla Direction. J.Appl. Geodesy, 1-9.
- Tanjung, D. (2017). Urgensi Kalibrasi Arah Kiblat Dalam Penyempurnaan Ibadah Shalat. Jurnal Kajian Hukum Isalam Al-Manahij, 10(1), 113-132.
- Tseng, W., Guo, J., & Liu, C. (2013). A comparison of great circle, great ellipse, and geodesic sailing. Journal of Marine Science and Technology, 21(3),
- Vincenty, T. (1975). Direct and inverse solutions of geodesic on the ellipsoid with application of nested equation. Survey Review, 23(176), 88-93.
- Xu, G. (2007). GPS Theory, Algorithms and Application. Berlin: Springer.

Halaman ini sengaja kami kosongkan