

## RESUME KOMPREHENSIF MENGENAI TEKNIK GEOSENTRIS DAN TOPOSENTRIS

Penentuan posisi benda langit, khususnya tinggi hilal (bulan sabit muda) dan Matahari, merupakan aspek sentral dalam Ilmu Falak. Akurasi dalam perhitungan ini penting tidak hanya untuk penelitian astronomi tetapi juga memiliki implikasi praktis signifikan dalam konteks ibadah umat Islam, seperti penentuan awal bulan Qamariyah (misalnya, Ramadan, Syawal, Zulhijah) dan waktu shalat. Kriteria visibilitas hilal modern, seperti MABIMS dan Neo MABIMS, mensyaratkan perhitungan posisi yang presisi, umumnya dalam sistem toposentris.

### Konsep Dasar: Geosentris vs. Toposentris

Perbedaan fundamental antara pendekatan toposentris dan geosentris terletak pada lokasi titik asalnya atau kerangka acuannya.

- **Sistem Geosentris:** Menggunakan **pusat massa Bumi** sebagai titik asal atau referensi. Penggunaan istilah ini dalam astronomi modern merujuk pada titik acuan koordinat, bukan model kosmologi kuno yang menempatkan Bumi di pusat alam semesta. Dalam sistem ini, posisi benda langit sering dinyatakan dalam koordinat bola seperti Deklinasi dan Asensio rekta (Sistem Ekuatorial Geosentris) atau Lintang dan Bujur Ekliptika (Sistem Ekliptika Geosentris). Data posisi fundamental dalam ephemeris astronomi sering disajikan dalam koordinat geosentris. Ketinggian yang dihitung dari pusat Bumi disebut tinggi hakiki atau ketinggian geometris. Sistem geosentris cocok untuk perhitungan global yang tidak terpengaruh oleh lokasi pengamat. Ini relevan dalam studi dinamika galaksi dan distribusi materi gelap, menggunakan kerangka acuan Galactocentric yang berpusat pada pusat massa galaksi Bima Sakti.
- **Sistem Toposentris:** Menggunakan **lokasi spesifik pengamat di permukaan Bumi** atau objek lainnya sebagai titik asal. Sistem ini menggambarkan lokasi benda langit relatif terhadap pengamat tertentu, memungkinkan prediksi toposentrik yang akurat seperti azimuth dan elevasi. Untuk perhitungan toposentris, informasi lintang dan bujur geografis pengamat sangat penting. Ketinggian yang diperoleh dari perhitungan toposentris, setelah memperhitungkan semua koreksi, disebut tinggi mar'i atau ketinggian tampak. Teknik toposentris sangat berguna untuk aplikasi praktis dalam astronomi modern hingga tahun 2025, seperti pelacakan satelit, pesawat ruang angkasa, dan fenomena astronomi lokal. Dalam misi eksplorasi Mars, data toposentris digunakan untuk menghitung posisi pesawat ruang angkasa relatif terhadap pengamat di Bumi guna memastikan komunikasi dan navigasi.

### Sejarah dan Perkembangan

Sejarah teknik geosentris berawal dari model kosmologi Claudius Ptolemy pada abad ke-2 Masehi. Meskipun dominan selama lebih dari seribu tahun, model ini akhirnya digantikan oleh teori heliosentris Copernicus pada abad ke-16. Evolusi ke model heliosentris melibatkan

perdebatan panjang dan temuan baru, seperti komet di luar orbit Bulan dan observasi fase Venus oleh Galileo. Model Tychonic semi-geosentris juga muncul sebagai alternatif. Model heliosentris Kepler akhirnya mendominasi setelah publikasi hukum Kepler dan tabel Rudolphine.

Teknik toposentris modern berkembang melalui sistem referensi koordinat yang lebih akurat seperti International Celestial Reference System (ICRS), yang berbasis pada sumber radio ekstragalaksi dan diamati menggunakan Very Long Baseline Interferometry (VLBI). ICRS, yang mulai digunakan pada tahun 1998, mengatasi keterbatasan sistem sebelumnya seperti FK4 dan FK5. Perkembangan ini terus meningkatkan presisi pengamatan astronomi.

### **Perbedaan Hasil Perhitungan dan Koreksi**

Perbedaan mendasar pada titik asal memengaruhi hasil perhitungan tinggi hilal dan Matahari karena efek rotasi Bumi dan lokasi pengamat. Rotasi Bumi menyebabkan perubahan posisi relatif benda langit yang diamati dari permukaan. Pendekatan toposentris memberikan koreksi yang lebih akurat untuk pengamatan lokal.

Untuk mentransformasikan ketinggian geosentris (hgeo) menjadi ketinggian toposentris (htopo), serangkaian koreksi krusial harus diterapkan:

1. **Paralaks Diurnal (P):** Perbedaan arah tampak benda langit antara pengamat di permukaan Bumi dan pusat Bumi. Disebabkan oleh jarak pengamat dari pusat Bumi relatif terhadap jarak benda langit. **Paralaks menyebabkan benda langit tampak lebih rendah di langit dibandingkan posisi geosentrisnya.**
  - **Paralaks Horizontal (HP):** Paralaks maksimum saat benda langit di horizon. Untuk Bulan, HP bisa mencapai  $\sim 1^\circ$  (60 menit busur), sangat signifikan. Untuk Matahari, HP jauh lebih kecil, sekitar 8.8 detik busur ( $\sim 0.15$  menit busur). Untuk objek sangat jauh seperti bintang, paralaks diurnal dapat diabaikan.
  - Koreksi paralaks (Pkoreksi) di ketinggian diaproksimasi dengan  $HP \cdot \cos(\text{ketinggian awal})$ .
2. **Refraksi Atmosfer (R):** Pembelokan cahaya benda langit saat melewati atmosfer Bumi. **Refraksi menyebabkan benda langit tampak lebih tinggi dari posisi geometrisnya.** Efek ini paling besar di dekat horizon, sekitar 34-35 menit busur, dan berkurang menjadi nol di zenit. Rumus empiris digunakan untuk menghitung besarnya refraksi. Refraksi bekerja berlawanan dengan paralaks terhadap ketinggian tampak.
3. **Semi-diameter Benda Langit (SD):** Setengah diameter sudut piringan benda langit. Penting jika menentukan posisi tepi atas atau bawah piringan, bukan pusatnya. Konsistensi titik referensi (pusat/tepi) penting.
4. **Dip Horizon (D):** Sudut antara horizon geometris dan horizon tampak akibat ketinggian pengamat di atas permukaan laut. **Dip menyebabkan ketinggian benda langit tampak**

**sedikit lebih tinggi relatif terhadap horizon tampak.** Efek ini signifikan untuk pengamat di lokasi tinggi.

Rumus ringkas untuk ketinggian toposentris ( $h_{\text{topo}}$ ) dari geosentris ( $h_{\text{geo}}$ ), mengasumsikan acuan pusat dan  $D$  sebagai penambah ketinggian, adalah:  **$h_{\text{topo}} \approx h_{\text{geo}} - P + D + R$ .**

### **Apakah Hasil Geosentris Selalu Lebih Besar dari Toposentris?**

Berdasarkan analisis sumber, **hasil hitungan geosentris tidak selalu lebih besar daripada hasil toposentris.** Hubungan antara  $h_{\text{geo}}$  dan  $h_{\text{topo}}$  bergantung pada perbandingan antara magnitudo Paralaks ( $P$ ) dan jumlah Refraksi ( $R$ ) + Dip ( $D$ ).

- **Untuk Bulan:** Paralaks ( $P$ ) untuk Bulan sangat signifikan (sekitar 50-60 menit busur di horizon). Sementara itu, Refraksi ( $R$ ) di horizon sekitar 34-35 menit busur, dan Dip ( $D$ ) biasanya hanya beberapa menit busur. Karena  $P$  umumnya lebih besar dari  $R+D$  untuk Bulan di dekat horizon (misal,  $P \approx 55'$ ,  $R+D \approx 39'$ ), maka  $h_{\text{topo}} \approx h_{\text{geo}} - (P - (D+R))$ , yang berarti  $P-(D+R)$  bernilai positif (misal,  $55'-39'=16'$ ) dan dikurangkan dari  $h_{\text{geo}}$ . **Sehingga, untuk Bulan di dekat horizon,  $h_{\text{topo}} < h_{\text{geo}}$ .** Kesalahpahaman bahwa  $h_{\text{geo}}$  selalu lebih besar mungkin timbul dari fokus pada efek paralaks Bulan yang dominan mengurangi ketinggian.
- **Untuk Matahari:** Paralaks ( $P$ ) untuk Matahari sangat kecil (sekitar 0.15 menit busur). Refraksi ( $R$ ) di horizon tetap sekitar 34-35 menit busur, dan Dip ( $D$ ) sama, sekitar beberapa menit busur. Karena  $R+D$  jauh lebih besar dari  $P$  untuk Matahari di dekat horizon (misal,  $P \approx 0.15'$ ,  $R+D \approx 39'$ ), maka  $h_{\text{topo}} \approx h_{\text{geo}} + (R+D - P)$ , yang berarti  $R+D-P$  bernilai positif (misal,  $39'-0.15'=38.85'$ ) dan ditambahkan ke  $h_{\text{geo}}$ . **Sehingga, untuk Matahari di dekat horizon,  $h_{\text{topo}} > h_{\text{geo}}$ .**

Studi kasus hipotetis menunjukkan bahwa untuk hilal,  $h_{\text{topo}}$  bisa lebih kecil dari  $h_{\text{geo}}$ , sementara untuk Matahari,  $h_{\text{topo}}$  bisa lebih besar dari  $h_{\text{geo}}$ , menguatkan kesimpulan bahwa  $h_{\text{geo}}$  tidak selalu lebih besar.

### **Matematika dan Metodologi**

Rumus matematika dalam teknik toposentris melibatkan transformasi koordinat dari sistem inersial ke sistem tetap pada pengamat, sering menggunakan rotasi Euler. Utilitas SPICE toolkit menyediakan fungsi seperti RECLAT dan LATREC untuk konversi antara koordinat persegi panjang dan bola (azimuth, elevasi, jarak), dan SPKEZ untuk menghasilkan vektor keadaan. Validitas rumus telah diverifikasi dalam perangkat lunak SPICE. Metode interpolasi numerik digunakan untuk presisi tinggi dalam perhitungan konjungsi planet.

Teknik geosentris mencakup penggunaan elemen orbit yang dirujuk ke ekuinoks standar dan koreksi Waktu Ephemeris (ET) dan Waktu Universal (UT) menggunakan  $\Delta T$ .

Implementasi praktis dapat menggunakan alat seperti pipa perintah cct untuk konversi antara koordinat geografis dan toposentrik (sistem kartesian geosentris X,Y,Z ke toposentrik E/N/U).

Metode non-iteratif baru juga meningkatkan akurasi perhitungan koordinat geodetik dari kartesian geosentrik.

### **Relevansi Modern dan Tantangan**

Kedua teknik ini relevan dalam penelitian astronomi modern. Toposentris penting untuk presisi tinggi pada skala lokal (pelacakan satelit, pesawat ruang angkasa, pengamatan hilal). Geosentris relevan untuk studi global (dinamika galaksi, materi gelap). Validasi silang antara kedua teknik meningkatkan akurasi pengukuran dan memberikan wawasan baru. SPICE toolkit mendukung transformasi dan validasi ini.

Faktor lain yang memengaruhi hasil termasuk perturbasi orbit Bulan (Evection, Variation, Yearly Equation), yang dapat menyebabkan variasi posisi Bulan hingga 2 derajat. Perubahan iklim yang menyebabkan redistribusi massa global (pencairan es) memengaruhi rotasi Bumi (polar motion), yang berdampak pada lokasi pengamat relatif terhadap sumbu rotasi dan memengaruhi pengukuran posisi benda langit secara lokal dalam model toposentris. Model toposentris perlu diperbarui secara berkala untuk memperhitungkan perubahan ini.

Tantangan teknis dalam implementasi toposentris meliputi potensi kesalahan dalam rumus matematika (misal, konversi derajat ke radian). Penggunaan alat komputasi dan validasi silang diperlukan untuk mengatasi kompleksitas ini.

### **Kesimpulan Utama**

Secara keseluruhan, perbandingan teknik geosentris dan toposentris menunjukkan bahwa perbedaan hasil hitungan dipengaruhi oleh lokasi pengamat, efek rotasi Bumi, dan koreksi paralaks diurnal. **Meskipun geosentris sering memberikan hasil yang secara nominal "lebih besar" sebelum semua koreksi toposentris diterapkan (khususnya hanya mempertimbangkan efek paralaks), ketinggian toposentris final yang akurat, yang mencakup paralaks (menurunkan), refraksi (menaikkan), dan dip (menaikkan), dapat lebih besar atau lebih kecil dari ketinggian geosentris, bergantung pada objek langit (Bulan vs Matahari) dan lokasi pengamat.** Pemahaman yang akurat tentang semua koreksi dan penerapannya sangat fundamental untuk presisi dalam Ilmu Falak dan aplikasi praktis seperti penentuan awal bulan Qamariyah. Integrasi kedua teknik dan pengembangan model komputasi yang canggih adalah langkah penting menuju pemahaman astronomi yang lebih komprehensif.