

# BELAJAR FALAK DASAR



**KASMUI**

# BELAJAR FALAK DASAR



## **BELAJAR FALAK DASAR**

### **Penulis:**

Kasmui

### **Desain Sampul & Penata Letak:**

Kasmui / Tim Artistik Penerbit

### **Penerbit:**

Jaten & Siblings

Patemon, Gunungpati, Semarang

### **Cetakan:**

Cetakan I, Edisi Tahun 2026

---

Hak Cipta 2026 pada Penulis.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang. Dilarang mengutip, memperbanyak, atau menerjemahkan sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit, kecuali untuk kepentingan tinjauan pustaka atau resensi.

---

### **Perpustakaan Nasional RI: Katalog Dalam Terbitan (KDT)**

Kasmui

Belajar Falak Dasar / Kasmui. — Edisi I. — Semarang : Jaten & Siblings, 2026.

viii + 88 hlm; 21 x 29,7 cm

ISBN 978-623-XXXX-XX-X

1. Ilmu Falak. 2. Astronomi Islam. 3. Hisab Rukyat.  
DDC 520 (atau 297.265 untuk Astronomi dalam Islam)
- 

Dicetak oleh Jaten Press

## KATA PENGANTAR (IFTITAH)

### *Bismillaahirrahmaanirrahiim*

Segala puji bagi Allah SWT, Sang Arsitek Agung Alam Semesta, yang telah menghamparkan langit dengan penuh keteraturan dan menetapkan garis edar bagi setiap benda langit sebagai tanda-tanda kekuasaan-Nya. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Baginda Nabi Muhammad SAW, sosok yang membawa cahaya kebenaran dan mengajarkan umatnya untuk senantiasa mentadabburi ayat-ayat *kauniyah* demi memperkokoh iman dan ketakwaan.

Buku berjudul "**Belajar Falak Dasar: Pendekatan Komprehensif dari Tradisi Turats hingga Komputasi Astronomi Modern**" ini lahir dari sebuah kesadaran mendalam akan pentingnya integrasi antara khazanah keislaman klasik dan kemajuan sains modern. Ilmu Falak, atau astronomi Islam, bukan sekadar warisan peradaban masa lalu yang terjebak dalam tabel-tabel angka statis. Ia adalah disiplin ilmu yang hidup, dinamis, dan krusial karena mengawal ritme ibadah umat Islam—mulai dari penentuan arah kiblat, waktu shalat, hingga kepastian kalender Hijriah.

Selama ini, terdapat sebuah celah (gap) yang cukup lebar dalam literatur falak di tanah air. Di satu sisi, banyak karya yang berfokus pada metode *Hisab Taqribi* (perkiraan) yang sederhana namun mulai tertinggal oleh akurasi data astronomi terkini. Di sisi lain, literatur astrometri modern sering kali terasa asing bagi penuntut ilmu agama karena minimnya sentuhan teologis dan fikih. Buku ini hadir untuk menjembatani jurang tersebut.

Kebaruan ide yang ditawarkan dalam buku ini terletak pada konsep "**Falak 5.0**". Penulis tidak hanya mengajak pembaca membedah kitab-kitab *turats* karya ulama Nusantara, tetapi juga melakukan *deep-dive* ke dalam standar riset internasional. Buku ini mengintegrasikan penggunaan *dataset* ephemeris NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) DE441 yang menjangkau presisi ribuan tahun, serta menekankan pentingnya transisi dari koordinat geometris murni menuju **geocentric-apparent altitude**—sebuah parameter mutlak yang memastikan hasil hisab selaras dengan realitas visual di ufuk.

Lebih dari sekadar teori, buku ini juga merambah ranah praktis dengan memperkenalkan logika pemrograman aplikasi falak (Python dan Android) serta pemanfaatan teknologi *image processing* dalam observasi hilal. Hal ini bertujuan agar para penuntut ilmu falak generasi baru tidak hanya menjadi pengguna teknologi, tetapi juga mampu merancang solusi digital yang berintegritas.

Tersusunnya buku ini tentu tidak lepas dari dukungan berbagai pihak. Penulis menyampaikan apresiasi setinggi-tingginya kepada para guru, kolega peneliti, dan praktisi falak yang telah berbagi inspirasi dalam diskursus-diskursus saintifik. Harapan besar penulis, buku ini dapat menjadi

referensi otoritatif bagi mahasiswa, dosen, praktisi falak, maupun masyarakat umum yang ingin menyelami samudera langit dengan kacamata iman dan nalar yang tajam.

Akhirnya, kesempurnaan hanyalah milik Allah SWT. Penulis menyadari bahwa di balik upaya maksimal ini, tentu masih terdapat ruang untuk perbaikan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang konstruktif sangat diharapkan demi penyempurnaan karya ini di masa depan. Semoga buku ini menjadi amal jariyah yang bermanfaat dan menjadi wasilah bagi kita semua untuk semakin mengenal kebesaran Sang Pencipta melalui keteraturan semesta.

*Wallaahu a'lam bish-shawaab.*

Semarang, Mei 2026

**Penulis**

***KASMUI***

## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR (IFTITAH) .....	4
DAFTAR ISI .....	6
<b>BAB 1: KAJIAN DASAR DAN EPISTEMOLOGI ILMU FALAK</b> .....	8
1.1. Definisi, Sejarah, dan Urgensi Ilmu Falak dalam Syariat Islam .....	8
1.2. Integrasi Teks Suci dan Sains: Analisis Dalil Al-Qur'an dan Hadits terkait Kosmografi .....	11
1.3. Falak Heritage: Kajian Literatur dan Metodologi Kitab Falak Karya Ulama Nusantara.....	14
DAFTAR PUSTAKA BAB 1 .....	16
<b>BAB 2: ASTRONOMI BOLA DAN DINAMIKA KOORDINAT LANGIT</b> .....	18
2.1. Anatomi Bola Langit: Horizon, Ekuator, dan Ekliptika .....	18
2.3. Fenomena Presesi, Nutasi, dan Refraksi Atmosfer .....	24
2.4. Koreksi Observasional: Transisi dari Koordinat Geometris Geosentris ke Geocentric-Apparent Altitude .....	27
DAFTAR PUSTAKA BAB 2 .....	29
<b>BAB 3: ALGORITMA DAN AKURASI PENENTUAN ARAH KIBLAT</b> .....	30
3.1. Dasar-dasar Trigonometri Bola ( <i>Spherical Trigonometry</i> ) pada Permukaan Bumi .....	30
3.2. Formulasi Matematis Azimuth Kiblat Berbagai Wilayah Universal .....	32
3.3. Dinamika <i>Rashdul Qiblah</i> (Bayang-Bayang Kiblat) Harian dan Tahunan .....	35
3.4. Praktikum Resolusi Tinggi: Pengukuran Arah Kiblat Berbasis Integrasi <i>Software</i> Astronomi ..	38
DAFTAR PUSTAKA BAB 3 .....	41
<b>BAB 4: GERAK SEMU MATAHARI DAN PRESISI JADWAL IBADAH</b> .....	42
4.1. Apparent Solar Time vs. Mean Solar Time dan Perhitungan Equation of Time.....	42
4.2. Koreksi Ketinggian Tempat ( <i>Dip of Horizon</i> ) dan Sudut Waktu Matahari .....	44
4.3. Analisis Matematis Penentuan Awal Waktu Shalat (Subuh, Dzuhur, Ashar, Maghrib, Isya) .	47
4.4. Parameter Syuruq, Dhuha, dan Penentuan Zona Waktu Terlarang Ibadah .....	50
DAFTAR PUSTAKA BAB 4 .....	52
<b>BAB 5: SISTEM KALENDER HIJRIAH, FASE BULAN, DAN VISIBILITAS HILAL</b> .....	53
5.1. Sejarah, Anatomi, dan Rekonstruksi Sistem Kalender Hijriah.....	53
5.2. Mekanika Orbit Bulan: Konjungsi (Ijtima') dan Kalkulasi Siklus Sinodis .....	56
5.3. Macam-Macam Kriteria Penetapan Awal Bulan: Urfi, Hakiki, Imkanur Rukyat, dan MABIMS Baru.....	58
5.4. Dinamika Sidang Isbat: Fikih, Kepastian Hukum, dan Sinkronisasi Sosial.....	61

DAFTAR PUSTAKA BAB 5 .....	63
<b>BAB 6: INSTRUMENTASI, PEMROSESAN CITRA, DAN PEMROGRAMAN FALAK (FALAK TECH).....</b>	<b>64</b>
6.1. Persiapan Rukyat: Pengenalan dan Kalibrasi Optik Teleskop .....	64
6.2. Pemanfaatan Gadget dan Teknologi <i>Image Processing</i> dalam Deteksi Hilal.....	67
6.3. Eksplorasi <i>Dataset</i> Tingkat Lanjut: Integrasi Ephemeris NASA (DE441) dalam Akurasi Prediksi .....	69
6.4. Falak 5.0: Arsitektur dan Logika Dasar <i>Coding</i> Aplikasi Falak (Desktop & Android) .....	72
DAFTAR PUSTAKA BAB 6.....	75
<b>EPILOG: SINTESIS, REFLEKSI, DAN TANTANGAN KONTEMPORER ILMU FALAK .....</b>	<b>77</b>
DAFTAR PUSTAKA EPILOG.....	79
DAFTAR PUSTAKA.....	80
GLOSARIUM.....	82
LAMPIRAN 1: TABEL, GRAFIK, DAN DIAGRAM TEKNIS .....	84

## BAB 1: KAJIAN DASAR DAN EPISTEMOLOGI ILMU FALAK

### 1.1. Definisi, Sejarah, dan Urgensi Ilmu Falak dalam Syariat Islam

**A. Konstruksi Epistemologis dan Definisi Ilmu Falak** Secara etimologis, kata *falak* (jamak: *aflak*) dalam bahasa Arab berakar dari makna lintasan, orbit, atau lengkungan benda-benda langit. Secara terminologis, dalam tradisi keilmuan Islam, Ilmu Falak didefinisikan sebagai disiplin sains yang mengkaji pergerakan, posisi, dan dinamika benda-benda langit—khususnya Bumi, Bulan, dan Matahari—pada orbitnya masing-masing untuk tujuan memformulasikan waktu dan posisi benda langit tersebut dari sudut pandang pengamat di permukaan Bumi. Dalam diskursus akademik internasional, ilmu ini bersinonim dengan astronomi posisional (astrometri) dan mekanika benda langit (celestial mechanics).



**Gambar 1.1.1: Instrumen Falak Klasik (Rubu' Mujayyab)**

Ilustrasi kuadran sinus yang digunakan oleh ulama falak klasik untuk menghitung fungsi trigonometri dan waktu shalat secara manual sebelum era kalkulator digital.

Penting untuk memberikan demarkasi epistemologis yang tegas antara *Ilmu Falak* (astronomi empiris-matematis) dan *Ilmu Tanjim* (astrologi). Para cendekiawan muslim klasik seperti Al-Biruni dan Ibnu Khaldun telah secara kritis memisahkan keduanya. Ilmu Falak bertumpu pada observasi (rukyat) empiris dan kalkulasi matematis (hisab) yang rigor, bebas dari klaim-klaim metafisik mengenai pengaruh benda langit terhadap takdir manusia. Astronomi Islam pada hakikatnya adalah sains terapan yang lahir dari rahim kebutuhan teologis-normatif (fiqh), menjadikannya unik karena ia merupakan fusi antara observasi rasional (*burhani*) dan ketundukan pada teks suci (*bayani*).

Dalam perkembangannya hingga era modern, definisi ini mengalami perluasan. Ilmu Falak kontemporer tidak sekadar mengandalkan trigonometri bola klasik (*spherical trigonometry*), melainkan telah terintegrasi dengan pemodelan numerik ephemeris tingkat tinggi, seperti penggunaan *dataset* NASA Jet Propulsion Laboratory (misalnya DE441), yang memungkinkan komputasi dengan tingkat presisi fraksi detik busur. Pergeseran ini menuntut transisi pemahaman dari sekadar koordinat geometris geosentris menuju kalkulasi *geocentric-apparent altitude* yang mengikutsertakan koreksi refraksi atmosfer, paralaks, serta aberasi cahaya.

**B. Landasan Teologis: Dalil Al-Qur'an dan Hadits** Sains falak dalam Islam tidak lahir dalam ruang vakum sosiologis, melainkan diinisiasi oleh perintah langsung dari Al-Qur'an yang memerintahkan manusia untuk merenungi keteraturan kosmos. Keteraturan mekanika langit ini dipandang sebagai *sunnatullah* (hukum alam) yang dapat diukur dan dikalkulasi secara presisi.

Firman Allah SWT mengenai fungsi matahari dan bulan sebagai parameter penentu waktu dan hisab:

هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسَ ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَرَهُ مَنَازِلَ لِتَعْلَمُوا عَدَدَ السِّنِّينَ وَالْجِسَابَ ۗ مَا خَلَقَ اللَّهُ ذَلِكَ إِلَّا بِالْحَقِّ ۗ يُفَصِّلُ  
الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ

*Artinya: "Dialah yang menjadikan matahari bersinar dan bulan bercahaya dan ditetapkan-Nya manzilah-manzilah (tempat-tempat) bagi perjalanan bulan itu, supaya kamu mengetahui bilangan tahun dan perhitungan (waktu). Allah tidak menciptakan yang demikian itu melainkan dengan hak. Dia menjelaskan tanda-tanda (kebesaran-Nya) kepada orang-orang yang mengetahui." (QS. Yunus [10]: 5)*

Terkait dinamika orbit benda langit, Al-Qur'an secara eksplisit menggunakan istilah *falak*:

وَهُوَ الَّذِي خَلَقَ اللَّيْلَ وَالنَّهَارَ وَالشَّمْسَ وَالْقَمَرَ ۗ كُلٌّ فِي فَلَكٍ يَسْبَحُونَ

*Artinya: "Dan Dialah yang telah menciptakan malam dan siang, matahari dan bulan. Masing-masing dari keduanya itu beredar di dalam garis edarnya (orbitnya)." (QS. Al-Anbiya [21]: 33)*

Selain ayat-ayat Al-Qur'an, Hadits Nabi Muhammad SAW juga meletakkan fondasi operasional terkait observasi astronomi, khususnya dalam penentuan awal bulan kamariah:

صُومُوا لِرُؤُوسِهِ وَأَفْطَرُوا لِرُؤُوسِهِ، فَإِنْ غَمَّ عَلَيْكُمْ فَأَكْمِلُوا عِدَّةَ شَعْبَانَ ثَلَاثِينَ

*Artinya: "Berpuasalah kalian karena melihat hilal dan berbukalah (berhari raya) karena melihatnya. Jika hilal tertutup awan dari pandangan kalian, maka sempurnakanlah hitungan bulan Sya'ban menjadi tiga puluh hari." (HR. Bukhari no. 1909 dan Muslim no. 1081).*

Dalil-dalil tersebut mendelegitimasi pandangan kosmos yang statis, dan memvalidasi bahwa alam semesta ini bergerak berdasarkan *taqdir* (ketetapan matematis/fisik) yang eksak, yang menginspirasi para sarjana Muslim untuk mengembangkan instrumen observasi dan algoritma hisab.

**C. Evolusi Historis: Dari Tradisi Helenistik menuju *Golden Age* Islam dan Komputasi Modern** Sejarah perkembangan ilmu falak menunjukkan proses apropriasi, asimilasi, dan revolusi saintifik yang panjang. Pada fase awal (abad ke-8 hingga ke-9 M), peradaban Islam melalui gerakan penerjemahan di *Bayt al-Hikmah* (House of Wisdom) Baghdad mengadopsi literatur astronomi dari peradaban Helenistik-Yunani (karya agung Claudius Ptolemaeus, *Almagest*), peradaban India (Siddhanta), dan Persia (Zij-i Shah).

Namun, para ilmuwan Muslim tidak sekadar menjadi penyalin pasif. Muncul fase kritik dan inovasi yang dikenal sebagai "Revolusi Maragha" (abad ke-13 hingga ke-14 M). Observatorium Maragha yang dipimpin oleh Nasir al-Din al-Tusi dan kemudian dilanjutkan oleh Ibnu al-Shatir di Damaskus, membongkar kelemahan krusial dalam model ekual Ptolemeus. Mereka memperkenalkan teorema matematis baru seperti *Tusi Couple* (pasangan Tusi)—sebuah model geometri yang mengkonversi gerak melingkar menjadi gerak linear osilasi—untuk memecahkan anomali gerak planet. Model-model non-Ptolemeus karya Ibnu al-Shatir ini, berabad-abad kemudian, terbukti secara matematis identik dengan model heliosentris awal yang digunakan oleh Nicolaus Copernicus (Saliba, 2007; King, 1993).

Dalam tradisi intelektual Nusantara, transmisi ilmu ini berlanjut melalui para ulama Jawi yang belajar di Mekkah pada abad ke-19 dan awal abad ke-20. Tokoh-tokoh seperti Syeikh Ahmad Khatib al-Minangkabawi dan Syeikh Tahir Jalaluddin memelopori modernisasi ilmu falak di Asia Tenggara dengan membawa tabel-tabel logaritma trigonometri, yang menggantikan hisab perkiraan (*taqribi*) menjadi hisab yang lebih presisi (*tahqiqi*). Saat ini, epistemologi sejarah tersebut bertransformasi ke era "Falak 5.0", di mana penggunaan data *Zij* klasik digantikan oleh pustaka pemrograman modern seperti Python (dengan modul *Skyfield* atau sejenisnya) untuk melakukan *query* langsung ke *dataset* efemeris numerik, menyajikan akurasi data dalam orde sub-detik busur.

**D. Urgensi dan Fungsionalitas Ilmu Falak dalam Fikih Islam** Urgensi ilmu falak tidak terlepas dari interaksinya yang sangat intens dengan ibadah-ibadah *mahdhah* dalam Islam. Ibadah-ibadah fundamental secara fungsional terikat dengan mekanika ruang dan waktu kosmis. Ada empat ranah utama yang menjadikan ilmu falak sebuah keniscayaan (fardhu kifayah) secara hukum syar'i:

1. **Penentuan Arah Kiblat (Astrometri dan Geodesi):** Menghadap Ka'bah merupakan syarat sah shalat. Secara geografis, posisi Ka'bah relatif terhadap setiap titik di permukaan Bumi membutuhkan kalkulasi trigonometri bola yang rigoros. Persamaan dasar yang digunakan mengacu pada penyelesaian segitiga bola:  $\cot(A) = (\sin(\phi)) * \cos(L) - \cos(\phi)$

\*  $\tan(\phi_k) / \sin(L)$  (di mana  $A$  adalah azimuth kiblat,  $\phi$  adalah lintang tempat,  $L$  adalah selisih bujur, dan  $\phi_k$  adalah lintang Ka'bah). Falak memastikan presisi ini, tidak hanya melalui perhitungan koordinat ekuatorial, tetapi juga melalui penentuan *Rashdul Qiblah* (bayang-bayang kiblat) yang memanfaatkan deklinasi Matahari.

2. **Jadwal Waktu Shalat (Dinamika Rotasi Bumi):** Waktu-waktu shalat ditentukan oleh posisi zenit dan sudut waktu (*hour angle*) Matahari. Kalkulasi ini memerlukan pemahaman mendalam tentang *Equation of Time* (selisih antara waktu surya sejati dengan waktu surya rata-rata akibat eksentrisitas orbit Bumi dan kemiringan ekliptika). Selain itu, penentuan awal waktu Subuh dan Isya membutuhkan parameter kedalaman Matahari di bawah ufuk (*astronomical twilight*), di mana pemodelan refraksi atmosfer lokal menjadi faktor penentu akurasi jadwal ibadah harian.
3. **Penentuan Awal Bulan Hijriah (Kinematika Bulan):** Konstruksi kalender komunal umat Islam bergantung pada fase Bulan, secara spesifik fenomena Ijtima' (konjungsi) dan visibilitas hilal (bulan sabit pertama) pasca konjungsi saat Matahari terbenam. Kalkulasi ini sangat kompleks karena orbit Bulan sangat dipengaruhi oleh perturbasi gravitasi Matahari dan planet-planet lain. Falak menjembatani gap antara kriteria teoretis (Hisab Imkanur Rukyat) dengan batasan visibilitas optis manusia atau teleskop.
4. **Prediksi Gerhana Matahari dan Bulan (Khusuf dan Kusuf):** Penyelenggaraan shalat sunnah gerhana mensyaratkan adanya kepastian astronomis mengenai terjadinya fase kontak gerhana. Perhitungan titik simpul (*node* orbit Bulan terhadap Ekliptika) serta syzygy Bumi-Bulan-Matahari dihitung dengan probabilitas presisi absolut, menunjukkan validitas empiris dari hisab falak kontemporer.

Melalui integrasi antara epistemologi sejarah, justifikasi teologis, dan aplikasi komputasi, Ilmu Falak menempati posisi sentral tidak hanya sebagai penjaga ritme ibadah umat Islam, tetapi juga sebagai bukti vitalitas dialog antara agama dan sains (sains Islam) di sepanjang sejarah peradaban.

## 1.2. Integrasi Teks Suci dan Sains: Analisis Dalil Al-Qur'an dan Hadits terkait Kosmografi

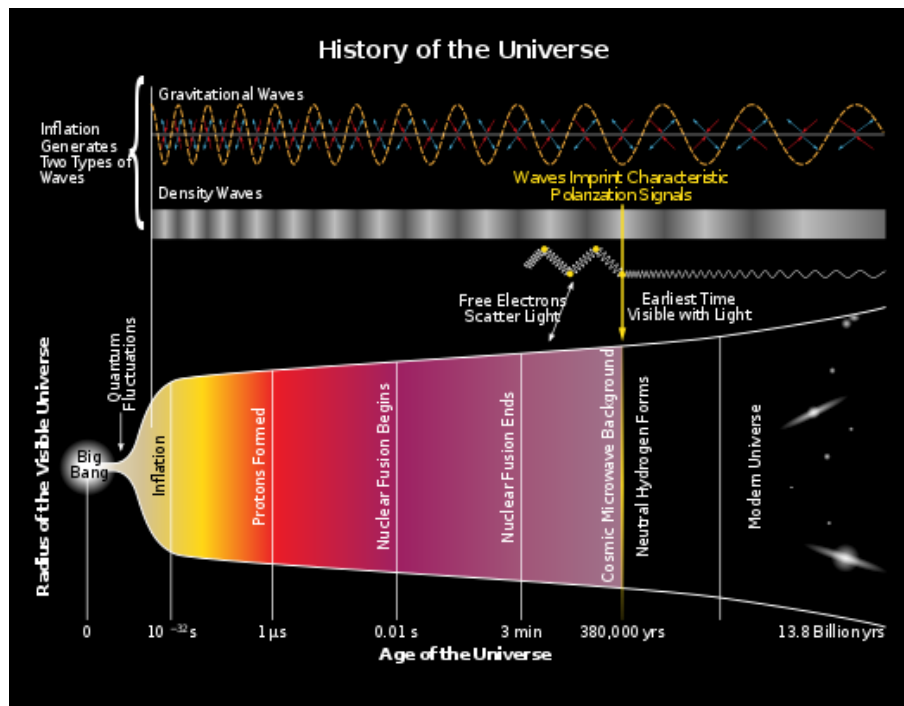
**A. Kosmogogenesis: Singularitas Awal dan Ekspansi Alam Semesta** Diskursus kosmografi dalam Islam tidak dapat dilepaskan dari narasi penciptaan alam semesta (kosmogogenesis). Al-Qur'an menyajikan postulat yang secara mencengangkan sejalan dengan model kosmologi fisis modern, khususnya Teori Dentuman Besar (*Big Bang Theory*).

Firman Allah SWT mengenai fase awal penciptaan:

أَوَلَمْ يَرَ الَّذِينَ كَفَرُوا أَنَّ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضَ كَانَتَا رَتْقًا فَفَتَقْنَاهُمَا وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلَا يُؤْمِنُونَ

*Artinya: "Dan apakah orang-orang yang kafir tidak mengetahui bahwasanya langit dan bumi itu keduanya dahulu adalah suatu yang padu (rataq), kemudian Kami pisahkan antara keduanya*

(fataq). Dan dari air Kami jadikan segala sesuatu yang hidup. Maka mengapakah mereka tiada juga beriman?" [QS. Al-Anbiya: 30].



**Gambar 1.2.1: Ekspansi Alam Semesta (Metric Expansion of Space)**

Visualisasi proses pengembangan ruang-waktu pasca-Big Bang yang selaras dengan isyarat *lamusi'un* dalam QS. Adz-Dzariyat: 47.

Secara filologis, Imam Fakhruddin Ar-Razi dalam *Mafatih al-Ghaib* menjelaskan bahwa kata *rataq* bermakna sesuatu yang menyatu, padat, dan tidak dapat ditembus, sedangkan *fataq* bermakna pemisahan, pemecahan, atau pembentangan (Ar-Razi, 1981). Dalam terminologi astrofisika kontemporer, *rataq* merepresentasikan keadaan singularitas awal (*initial singularity*)—sebuah titik dengan densitas dan temperatur tak terhingga di mana hukum fisika klasik runtuh. Adapun *fataq* merepresentasikan inflasi kosmik dan ekspansi ruang-waktu pasca-Big Bang (Bucaille, 1976; Najjar, 2006).

Lebih jauh, konsep ekspansi ruang (*metric expansion of space*) yang dibuktikan oleh Edwin Hubble pada tahun 1929 melalui pergeseran merah (*redshift*) galaksi-galaksi jauh, telah diisyaratkan secara eksplisit dalam teks suci:

وَالسَّمَاءَ بَدَّلْنَاهَا بِأَيْدٍ وَإِنَّا لَمُوسِعُونَ

Artinya: "Dan langit itu Kami bangun dengan kekuasaan (Kami) dan sesungguhnya Kami benar-benar meluaskannya." [QS. Adz-Dzariyat: 47].

Kata *lamusi'un* berasal dari akar kata *ausa'a* yang berbentuk *isim fa'il* (partisip aktif), menunjukkan sebuah proses yang sedang dan terus berlangsung (*continuous expansion*). Analisis linguistik-saintifik ini menolak gagasan alam semesta yang statis (*steady-state universe*) yang sempat diyakini oleh para fisikawan awal abad ke-20, dan mengukuhkan kebenaran empiris bahwa kosmos kita terus mengembang dan mendingin.

**B. Kinematika Benda Langit: Orbit, Rotasi, dan Gerak Translasi** Dalam tinjauan mekanika benda langit (*celestial mechanics*), Al-Qur'an secara spesifik menggunakan diksi yang sangat presisi untuk mendeskripsikan pergerakan dinamis Matahari dan Bulan. Selama berabad-abad, perdebatan geosentrisme dan heliosentrisme mendominasi filsafat alam. Al-Qur'an memotong perdebatan ini dengan menyatakan bahwa seluruh benda langit bergerak pada orbitnya masing-masing tanpa friksi.

وَالشَّمْسُ تَجْرِي لِمُسْتَقَرٍّ لَهَا ۚ ذَٰلِكَ تَقْدِيرُ الْعَزِيزِ الْعَلِيمِ

*Artinya: "Dan matahari berjalan di tempat peredarannya. Demikianlah ketetapan Yang Maha Perkasa lagi Maha Mengetahui." [QS. Yasin: 38].*

لَا الشَّمْسُ يَنْبَغِي لَهَا أَنْ تُدْرِكَ الْقَمَرَ وَلَا اللَّيْلُ سَابِقُ النَّهَارِ ۗ وَكُلٌّ فِي فَلَكٍ يَسْبَحُونَ

*Artinya: "Tidaklah mungkin bagi matahari mendapatkan bulan dan malampun tidak dapat mendahului siang. Dan masing-masing beredar pada garis edarnya." [QS. Yasin: 40].*

Kata *tajri* (berjalan/mengalir) dan *yasbahun* (berenang/mengambang) memiliki implikasi fisika yang mendalam. Dalam medium vakum ruang angkasa yang nyaris tanpa hambatan aerodinamis, benda langit tidak "bergerak" seperti kendaraan di atas jalan, melainkan "melayang" atau "berenang" mengikuti kelengkungan ruang-waktu akibat gaya gravitasi. Istilah *mustaqarr* (tempat perhentian atau titik tujuan) pada ayat 38 di atas, secara astronomis merujuk pada *Solar Apex*, yakni titik imajiner di konstelasi Hercules yang menjadi arah tujuan tata surya kita bergerak mengelilingi pusat galaksi Bimasakti dengan kecepatan sekitar 220 km/detik (Purwanto, 2012; Djamaluddin, 2011). Ini membuktikan bahwa Matahari tidak diam secara absolut dalam kerangka acuan galaktik.

**C. Relativitas Waktu dan Dinamika Kosmik** Salah satu pilar fisika modern adalah Teori Relativitas Khusus dan Umum Albert Einstein, yang meruntuhkan konsep waktu absolut Newtonian. Waktu ternyata bersifat relatif, bergantung pada kecepatan pengamat (dilatasi waktu) dan intensitas medan gravitasi. Jauh sebelum formulasi persamaan transformasi Lorentz, isyarat relativitas waktu telah terukir dalam Al-Qur'an:

يُدَبِّرُ الْأَمْرَ مِنَ السَّمَاءِ إِلَى الْأَرْضِ ثُمَّ يَعْرُجُ إِلَيْهِ فِي يَوْمٍ كَانَ مِقْدَارُهُ أَلْفَ سَنَةٍ مِمَّا تَعُدُّونَ

*Artinya: "Dia mengatur urusan dari langit ke bumi, kemudian (urusan) itu naik kepada-Nya dalam satu hari yang kadarnya adalah seribu tahun menurut perhitunganmu." [QS. As-Sajdah: 5].*

Komparasi 1 hari kosmik berbanding 1.000 tahun waktu Bumi (berdasarkan revolusi Bulan mengelilingi Bumi) dapat dikalkulasi secara matematis untuk menurunkan nilai kecepatan konstan universal kosmos. Menggunakan jarak tempuh Bulan selama 1.000 tahun kamariah vis-à-vis waktu tempuh 1 hari, sejumlah fisikawan muslim seperti Mansour Hassab-Elnaby (1990) mendemonstrasikan bahwa hasil bagi jarak dan waktu dari ayat ini menunjuk pada angka yang sangat mendekati kecepatan cahaya dalam ruang hampa, yaitu 299.792,5 kilometer per detik. Pendekatan ini menunjukkan harmoni luar biasa antara hermeneutika teks dan kalkulasi fisika teoretis.

**D. Kesimpulan Integratif** Integrasi antara nas syar'i dan observasi saintifik dalam ilmu falak tidak boleh jatuh pada *apologetika* (pencocok-cocokan/pseudosains). Al-Qur'an bukanlah buku teks astronomi, melainkan *Kitab Hidayah* (buku petunjuk). Namun, ketika Al-Qur'an berbicara mengenai fenomena alam (*ayat kauniyah*), ia menyajikan kerangka fundamental yang terbukti imun terhadap falsifikasi sains modern. Dalil-dalil kosmografi ini berfungsi sebagai fondasi epistemologis yang mendorong umat Islam untuk melakukan riset mendalam, menghitung ephemeris, mengkalibrasi instrumen optik, hingga memformulasikan algoritma pergerakan *geocentric-apparent*—semuanya bermuara pada kepastian waktu beribadah dan peneguhan tauhid di hadapan arsitektur semesta yang presisi.

### 1.3. Falak Heritage: Kajian Literatur dan Metodologi Kitab Falak Karya Ulama Nusantara

**A. Genealogi dan Transmisi Epistemologis Ilmu Falak di Nusantara** Diskursus ilmu falak di kepulauan Nusantara (Indonesia, Malaysia, Brunei, dan sekitarnya) memiliki akar sosiologis dan intelektual yang sangat kuat, terhubung langsung dengan pusat keilmuan Islam di Timur Tengah, khususnya Makkah dan Mesir. Transmisi keilmuan ini mencapai puncaknya pada akhir abad ke-19 hingga pertengahan abad ke-20 Masehi, ketika para cendekiawan Jawi (sebutan untuk ulama Asia Tenggara di Makkah) kembali ke tanah air dengan membawa literatur astronomi klasik (*Zij*) dan perangkat observasi seperti rubu' mujayyab (kuadran sinus).

Secara genealogis, sanad keilmuan falak Nusantara banyak berhulu pada tokoh-tokoh besar seperti Syeikh Ahmad Khatib al-Minangkabawi (w. 1916 M) yang menulis *Alam al-Hussab fi Ilm al-Hisab* dan *Natijat al-Miqat*, serta murid-muridnya seperti Syeikh Muhammad Jamil Jambek, Syeikh Tahir Jalaluddin, dan KH. Ahmad Dahlan (pendiri Muhammadiyah). Syeikh Tahir Jalaluddin (w. 1956 M) melalui karyanya *Natijatul Umar* membawa pembaruan radikal dengan memperkenalkan logaritma trigonometri ke dalam hisab falak Nusantara, yang memfasilitasi transisi dari sekadar perkiraan matematis kasar menuju kalkulasi astronomi bola yang lebih presisi (Azhari, 2007).

**B. Tipologi dan Klasifikasi Metodologi Hisab Klasik** Dalam literatur falak warisan ulama Nusantara (*Falak Heritage*), metodologi komputasi astronomi secara akademis diklasifikasikan ke dalam beberapa tingkatan berdasarkan tingkat akurasi dan kompleksitas algoritma matematis yang digunakan. Klasifikasi ini mencerminkan evolusi pemikiran saintifik dalam merespons kebutuhan akurasi ibadah:

1. **Hisab Taqribi (Aproksimasi/Perkiraan):** Metode ini menggunakan konstanta matematis sederhana dan siklus rata-rata pergerakan Bulan dan Matahari tanpa memperhitungkan anomali orbit (seperti *evection*, *variation*, dan *annual equation* dari Bulan). Kitab representatif dari aliran ini adalah *Sullam an-Nayyirain* karya KH. Muhammad Manshur al-Batawi. Pendekatan *taqribi* sering kali mengabaikan koreksi eliptisitas orbit dan hanya memproyeksikan koordinat secara linear. Oleh karena itu, deviasi kesalahan dalam penentuan *ijtima'* (konjungsi) bisa mencapai orde jam, sehingga kini jarang digunakan untuk penentuan awal bulan yang krusial, namun tetap berharga sebagai artefak sejarah logika matematika.
2. **Hisab Hakiki Tahqiqi (Kalkulasi Presisi Geometris):** Metodologi ini merupakan lompatan kuantum dalam tradisi intelektual ulama Nusantara. Hisab ini telah menggunakan kaidah trigonometri bola (*spherical trigonometry*) dan data astronomi dari tabel (*Zij*) ephemeris yang lebih akurat, seperti karya Ulugh Beg atau data dari *Nautical Almanac*. Salah satu *masterpiece* (kitab babon) dalam kategori ini adalah *Al-Khulashah al-Wafiyah* karya KH. Zubair Umar al-Jailani (Salatiga) dan *Badi'atul Mitsal* karya KH. Maksum bin Ali (Jombang). Kitab *Al-Khulashah al-Wafiyah* mendemonstrasikan keahlian ulama dalam melakukan interpolasi matematis dari tabel logaritma untuk menentukan posisi geosentris benda langit dengan akurasi hingga orde menit busur (Anwar, 2011).
3. **Hisab Kontemporer (Algoritma Modern):** Fase ini merupakan sintesis antara *turats* (warisan klasik) dengan sains komputasi modern. Kitab-kitab seperti *Ephemeris Hisab Rukyat* yang difasilitasi oleh Kementerian Agama RI mengadopsi algoritma dari Jean Meeus (*Astronomical Algorithms*) dan Simon Newcomb. Pada fase ini, perhitungan manual perlahan ditinggalkan.

**C. Transformasi Falak Nusantara: Dari *Turats* Menuju Komputasi Modern** Evolusi metodologi falak di Nusantara saat ini telah melampaui pembacaan manual kitab-kitab kuning. Riset-riset mutakhir yang dikembangkan oleh para pakar falak dan *developer* perangkat lunak astronomi Islam di Indonesia menunjukkan adopsi standar astrometri internasional. Metodologi falak kontemporer kini dikembangkan menjadi modul komputasi astronomi yang kompleks.

Perkembangan mutakhir dalam arsitektur perangkat lunak falak menunjukkan adanya modifikasi logika peralihan ephemeris (*ephemeris switching logic*). Logika komputasi ini dirancang untuk memprioritaskan *file* data berakurasi tinggi untuk rentang tahun spesifik, mengintegrasikan *dataset* canggih dari NASA Jet Propulsion Laboratory. Sebagai contoh, penggunaan *dataset* DE441 secara khusus dialokasikan dan diprioritaskan untuk perhitungan pada epos 0 hingga 3000 Masehi guna

memastikan stabilitas numerik dan presisi sub-detik busur dalam memprediksi konjungsi dan gerhana.

Lebih jauh, formulasi matematika dalam tradisi *Falak Heritage* yang awalnya hanya mengandalkan perhitungan koordinat geometris geosentris murni (*pure geocenter geometric coordinates*), kini telah mengalami koreksi fundamental. Modul pemindaian koordinat (*coordinate scanning*) modern secara standar wajib memperhitungkan *geocentric-apparent altitude*. Parameter *apparent* ini sangat krusial karena ia mengkompensasi efek refraksi atmosfer secara dinamis berdasarkan suhu dan tekanan udara lokal, efek paralaks diurnal, serta aberasi cahaya, sehingga posisi ufuk mar'i (horizon visual) tempat jatuhnya hilal dapat dipetakan secara absolut, menjembatani secara sempurna antara teori hisab *tahqiqi* peninggalan ulama Nusantara dengan realitas rukyatul hilal optis di lapangan.

Firman Allah SWT mengafirmasi pentingnya ketelitian dalam perhitungan:

الشَّمْسُ وَالْقَمَرُ بِحُسْبَانٍ

Artinya: "Matahari dan bulan (beredar) menurut perhitungan." (QS. Ar-Rahman [55]: 5)

Ayat ini (dengan kata *husban*, yang merupakan bentuk *mashdar* yang bermakna perhitungan yang sangat teliti/kompleks) menjadi justifikasi teologis mengapa transformasi dari hisab *taqribi* menuju komputasi presisi tinggi dengan koreksi *geocentric-apparent* adalah sebuah keniscayaan akademik sekaligus ibadah bagi para astronom Muslim.

## DAFTAR PUSTAKA BAB 1

Anwar, S. (2011). *Hari Raya dan Problematika Hisab Rukyat*. Yogyakarta: Suara Muhammadiyah.

Ar-Razi, F. (1981). *Mafatih al-Ghaib (Tafsir Al-Kabir)*. Beirut: Dar al-Fikr.

Azhari, S. (2007). *Ilmu Falak: Perjumpaan Khazanah Islam dan Sains Modern*. Yogyakarta: Suara Muhammadiyah.

Bucaille, M. (1976). *The Bible, The Qur'an and Science: The Holy Scriptures Examined in the Light of Modern Knowledge*. Paris: Seghers.

Djamaluddin, T. (2011). *Astronomi Memberi Solusi Penyatuan Ummat*. Jakarta: LAPAN.

King, D. A. (1993). *Astronomy in the Service of Islam*. Aldershot: Variorum.

Najjar, Z. (2006). *Tafsir al-Ayat al-Kawuniyah fi al-Qur'an al-Karim*. Kairo: Maktabah as-Syuruq ad-Dawliyah.

Purwanto, A. (2012). *Nalar Ayat-Ayat Semesta: Menjadikan Al-Qur'an sebagai Basis Konstruksi Ilmu Pengetahuan*. Bandung: Mizan.

Saksono, T. (2007). *Mengkompromikan Rukyat dan Hisab*. Jakarta: Amythas Publicita.

Saliba, G. (2007). *Islamic Science and the Making of the European Renaissance*. Cambridge, MA: MIT Press.

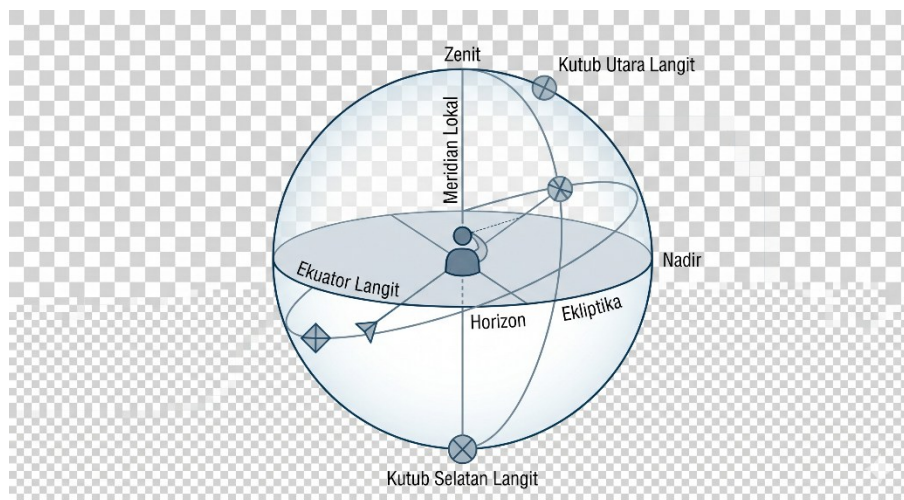
Az-Zindani, A. M. (1990). *Al-Mu'jizat al-Ilmiyyah fi al-Qur'an wa as-Sunnah*. Kairo: Dar al-Ma'arif.

Jauhari, T. (1930). *Al-Jawahir fi Tafsir al-Qur'an al-Karim*. Kairo: Mustafa al-Babi al-Halabi.

## BAB 2: ASTRONOMI BOLA DAN DINAMIKA KOORDINAT LANGIT

### 2.1. Anatomi Bola Langit: Horizon, Ekuator, dan Eklptika

**A. Konseptualisasi Bola Langit (*Celestial Sphere*) dalam Astrometri** Dalam kajian ilmu falak dan astrometri fisis, pemahaman spasial terhadap alam semesta disederhanakan melalui konstruksi matematis yang disebut Bola Langit (*Celestial Sphere* / *Al-Qubbaḥ As-Samawiyyah*). Secara teoretis, bola langit adalah sebuah bola imajiner dengan radius tak terhingga yang konsentris (memiliki pusat yang sama) dengan Bumi. Seluruh benda langit—mulai dari Matahari, Bulan, planet, hingga bintang-bintang di luar galaksi—diproyeksikan berada pada permukaan bagian dalam bola imajiner tersebut.



**Gambar 2.1 Anatomi Bola Langit Dasar**

Diagram geometris yang bersih ini memvisualisasikan komponen utama bola langit (Ekuator, Eklptika, Horizon, Meridian) menggunakan label bahasa Indonesia yang jelas, setara dengan bagan sains standar.

Pendekatan ini mengabaikan jarak linear yang sebenarnya antara pengamat dan objek langit, dan memfokuskan komputasi secara eksklusif pada arah pandang (*line of sight*). Oleh karena itu, geometri yang digunakan bukanlah geometri Euklides datar (planimetri), melainkan trigonometri bola (*spherical trigonometry*), di mana jarak antar dua objek diukur bukan dalam satuan metrik (kilometer atau tahun cahaya), melainkan dalam besaran sudut (derajat, menit busur, dan detik busur).

Al-Qur'an mengisyaratkan arsitektur ruang langit yang dipenuhi dengan tata letak konstelasi yang presisi, yang dalam terminologi astronomi menjadi kerangka referensi posisi (sistem koordinat). Allah SWT berfirman:

تَبَارَكَ الَّذِي جَعَلَ فِي السَّمَاءِ بُرُوجًا وَجَعَلَ فِيهَا سِرَاجًا وَقَمَرًا مُنِيرًا

*Artinya: "Maha Suci Allah yang menjadikan di langit gugusan-gugusan bintang (buruj) dan Dia menjadikan juga padanya matahari (siraj) dan bulan yang bercahaya." (QS. Al-Furqan [25]: 61)*

Kata *buruj* (jamak dari *burj*) secara harfiah bermakna menara atau benteng tinggi, yang dalam konteks kosmografi merujuk pada konstelasi zodiak di sepanjang garis ekliptika. Untuk memetakan *buruj*, matahari, dan bulan secara akurat, astronomi bola mendefinisikan anatomi langit melalui tiga bidang referensi fundamental (fundamental planes): Horizon, Ekuator, dan Ekliptika.

**B. Sistem Horizon (Ufuk)** Sistem Horizon adalah kerangka referensi yang paling intuitif karena bersifat *toposentris* (berpusat pada pengamat di permukaan Bumi). Bidang fundamentalnya adalah *True Horizon* (Ufuk Hakiki), yaitu bidang datar imajiner yang menembus pusat Bumi dan tegak lurus terhadap vektor gravitasi lokal.

Anatomi utama dalam sistem ini meliputi:

1. **Zenith (*Samt ar-Ra's*):** Titik kutub bola langit yang berada tepat 90 derajat di atas kepala pengamat.
2. **Nadir (*Samt al-Qadam*):** Titik kutub yang berada tepat 90 derajat di bawah kaki pengamat, berlawanan dengan Zenith.
3. **Meridian Langit:** Lingkaran besar yang melewati Titik Utara, Zenith, Titik Selatan, dan Nadir. Meridian ini membagi langit menjadi belahan timur dan barat.

Dalam sistem ini, posisi benda langit ditentukan oleh dua koordinat:

- **Altitude / Ketinggian (*h / Irtifa'*):** Jarak sudut suatu objek diukur dari horizon secara vertikal menuju Zenith (nilai 0 derajat hingga 90 derajat).
- **Azimuth (*A / Samt*):** Jarak sudut yang diukur di sepanjang horizon, dimulai dari Titik Utara (0 derajat) ke arah Timur (90 derajat), Selatan (180 derajat), dan Barat (270 derajat).

Kelemahan utama sistem horizon adalah koordinat objek (Altitude dan Azimuth) terus berubah setiap detik akibat rotasi Bumi, serta sangat bergantung pada koordinat lintang dan bujur geografis pengamat. Oleh karena itu, sistem ini tidak dapat digunakan untuk mempublikasikan tabel ephemeris dalam katalog astronomi internasional.

**C. Sistem Ekuator (*Khat al-Istiwa as-Samawi*)** Untuk mengatasi limitasi sistem horizon, para astronom menggunakan Sistem Ekuator. Sistem ini bersifat geosentris dan independen terhadap lokasi pengamat. Bidang fundamentalnya adalah Ekuator Langit, yang merupakan proyeksi ekuator Bumi yang diperluas ke bola langit hingga tak terhingga.

Anatomi utama sistem ekuator meliputi:

1. **Kutub Utara Langit (*North Celestial Pole / NCP*):** Proyeksi Kutub Utara Bumi pada bola langit. Bintang Polaris saat ini berada sangat dekat dengan NCP.
2. **Kutub Selatan Langit (*South Celestial Pole / SCP*):** Proyeksi Kutub Selatan Bumi pada bola langit.

Koordinat benda langit dalam sistem ini ditentukan oleh:

- **Declination / Deklinasi (*delta / Mayl*):** Jarak sudut objek diukur ke utara (+0 hingga +90 derajat) atau ke selatan (-0 hingga -90 derajat) dari ekuator langit. Ini ekuivalen dengan garis lintang di Bumi.
- **Right Ascension / Asensio Rekta (*alpha*):** Jarak sudut objek yang diukur ke arah timur di sepanjang ekuator langit, dimulai dari Titik Aries (Vernal Equinox) hingga lingkaran jam objek tersebut. Asensio Rekta biasanya dinyatakan dalam satuan waktu (0 hingga 24 jam).

Sistem ekuator bersifat statis terhadap rotasi harian Bumi. Deklinasi dan Asensio Rekta sebuah bintang diasumsikan tetap, kecuali untuk perubahan jangka panjang yang sangat lambat akibat precesi dan gerak diri (*proper motion*). Tabel-tabel astronomi modern, seperti *The Astronomical Almanac* atau *dataset* NASA JPL, merilis posisi ephemeris harian Matahari dan Bulan menggunakan parameter asensio rekta dan deklinasi ini.

**D. Sistem Ekliptika (*Da'irat al-Buruj*)** Bidang fundamental ketiga adalah Ekliptika, yang mendefinisikan bidang orbit translasi Bumi mengelilingi Matahari. Dari perspektif geosentris, ekliptika adalah lintasan semu tahunan Matahari di bola langit dengan latar belakang konstelasi zodiak (*buruj*).

Karena sumbu rotasi Bumi miring terhadap bidang orbitnya, Ekuator Langit dan Ekliptika tidak sejajar. Keduanya saling berpotongan pada sudut sekitar 23 derajat 26 menit (atau 23.43929 derajat dalam format desimal). Sudut perpotongan ini dikenal sebagai **Kemiringan Ekliptika (*Obliquity of the Ecliptic / Mayl al-Kulli*)** (direpresentasikan dengan simbol epsilon).

Dua titik perpotongan antara Ekuator dan Ekliptika adalah:

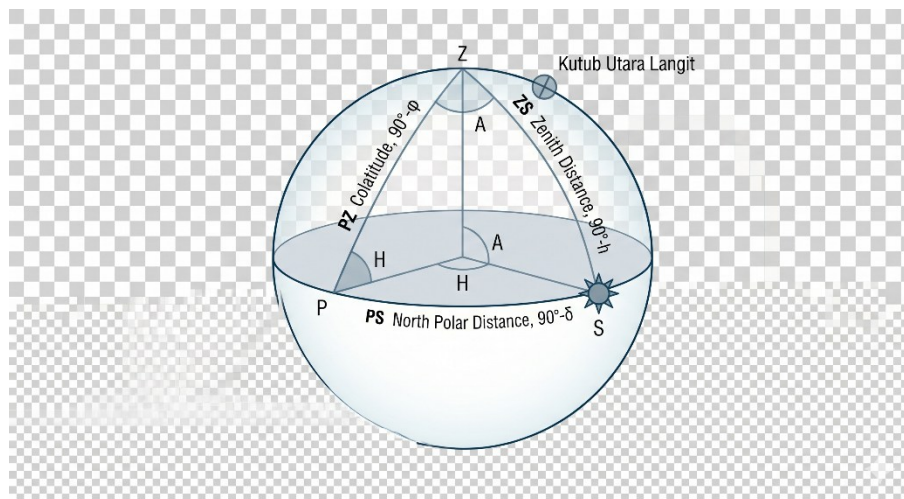
1. **Vernal Equinox (Titik Aries / *Nuqtat al-I'tidal ar-Rabi'i*):** Titik di mana Matahari melintasi ekuator dari selatan ke utara (sekitar tanggal 20-21 Maret). Titik ini adalah titik referensi mutlak (nilai 0) bagi Asensio Rekta.

2. **Autumnal Equinox (Titik Libra / *Nuqtat al-I'tidal al-Kharifi*):** Titik di mana Matahari melintasi ekuator dari utara ke selatan (sekitar tanggal 22-23 September).

Dalam sistem ekliptika, koordinat dinilai melalui Lintang Ekliptika (*Ecliptic Latitude*, beta) dan Bujur Ekliptika (*Ecliptic Longitude*, lambda). Sistem ekliptika sangat krusial dalam hisab awal bulan kamariah; fenomena Ijtima' (konjungsi) secara presisi didefinisikan sebagai momen di mana Bujur Ekliptika Bulan sama dengan Bujur Ekliptika Matahari ( $\lambda_{\text{bulan}} = \lambda_{\text{matahari}}$ ).

## 2.2. Sistem Koordinat Geografis dan Transformasi Koordinat Langit

**A. Geodesi Falak: Sistem Koordinat Geografis Bumi dan Implikasi Matematisnya** Sebelum melakukan kalkulasi benda langit, seorang astronom wajib menetapkan kerangka referensi posisi di permukaan Bumi (toposentris). Kedudukan pengamat di Bumi didefinisikan melalui Sistem Koordinat Geografis yang bertumpu pada dua parameter utama: Lintang Geografis (Latitude / *Ardl al-Balad*, disimbolkan dengan phi) dan Bujur Geografis (Longitude / *Tul al-Balad*, disimbolkan dengan lambda).



**Diagram Teknik Segitiga PZS (Sub-bab 2.2)**

Ini adalah diagram geometris tingkat lanjut yang secara khusus mengilustrasikan segitiga bola PZS (Kutub, Zenit, Benda Langit) pada bola langit, menjadi dasar algoritma transformasi koordinat di bab-bab berikutnya.

Secara teologis-saintifik, wujud Bumi yang bulat—yang menjadi prasyarat berlakunya sistem koordinat bola geografis—telah diisyaratkan dalam Al-Qur'an melalui penggunaan diksi spesifik terkait pergantian siang dan malam:

خَلَقَ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضَ بِالْحَقِّ يُكَوِّرُ اللَّيْلَ عَلَى النَّهَارِ وَيُكَوِّرُ النَّهَارَ عَلَى اللَّيْلِ ۖ وَسَخَّرَ الشَّمْسَ وَالْقَمَرَ كُلًّا يَجْرِى لِأَجَلٍ مُّسَمًّى ۗ أَلَا هُوَ الْعَزِيزُ الْعَفَّارُ

*Artinya: "Dia menciptakan langit dan bumi dengan (tujuan) yang benar; Dia menutupkan (yukawwiru) malam atas siang dan menutupkan siang atas malam dan menundukkan matahari dan bulan, masing-masing berjalan menurut waktu yang ditentukan. Ingatlah Dialah Yang Maha Perkasa lagi Maha Pengampun."* (QS. Az-Zumar [39]: 5)

Imam Fakhruddin Ar-Razi menyoroiti penggunaan kata *yukawwiru* yang berasal dari akar kata *kurrah* (bola). Secara fisika, proses pelilitan atau penutupan cahaya yang berkesinambungan dan bertahap antara zona malam dan siang hanya mungkin terjadi jika objek planeter tersebut memiliki geometri sferis (bulat).

Dalam komputasi falak modern, Bumi tidak diasumsikan sebagai bola sempurna (geosentris murni), melainkan sebagai *oblate spheroid* (elipsoid gepat) akibat gaya sentrifugal dari rotasinya. Sistem referensi geodetik standar internasional yang digunakan adalah WGS 84 (World Geodetic System 1984). Lintang sebuah tempat diukur dari ekuator (0 derajat) hingga ke kutub (+90 derajat untuk Lintang Utara, dan -90 derajat untuk Lintang Selatan). Sementara itu, bujur diukur dari Meridian Utama (Prime Meridian di Greenwich) ke arah timur (+0 hingga +180 derajat) dan ke arah barat (-0 hingga -180 derajat). Deviasi posisi geografis sekecil satu detik busur (sekitar 30 meter di ekuator) dapat memengaruhi akurasi hasil hisab arah kiblat dan awal waktu shalat.

**B. Sudut Waktu (Hour Angle) dan Waktu Bintang Lokal (Local Sidereal Time)** Jembatan matematis untuk menghubungkan bola langit (Sistem Ekuator) yang statis dengan bola Bumi (Sistem Horizon) yang dinamis berotasi adalah *Local Sidereal Time* (LST) atau Waktu Bintang Lokal. LST didefinisikan sebagai Asensio Rekta (Right Ascension / alpha) dari bintang-bintang yang saat itu sedang melintasi Meridian Langit pengamat.

Waktu sideris berdetak sedikit lebih cepat daripada waktu surya (waktu matahari rata-rata yang kita gunakan di jam tangan), di mana satu hari sideris setara dengan 23 jam 56 menit 4.09 detik waktu surya. Pemahaman atas LST melahirkan parameter fundamental berikutnya, yaitu Sudut Waktu (Hour Angle / *Fadl ad-Da'ir*, disimbolkan dengan H atau HA).

Sudut Waktu (H) adalah jarak sudut suatu benda langit diukur ke arah barat dari Meridian Langit lokal pengamat di sepanjang ekuator langit. Persamaan linier yang menghubungkan ketiganya adalah:  $H = LST - \alpha$  (Sudut Waktu sama dengan Local Sidereal Time dikurangi Asensio Rekta objek).

Jika H bernilai negatif, objek tersebut masih berada di sebelah timur meridian (belum transit/berkulminasi). Jika H bernilai positif, objek telah melewati meridian dan berada di belahan langit barat. Parameter Sudut Waktu (H) ini adalah variabel dinamis yang mengikat posisi objek langit dengan waktu absolut di lokasi pengamat.

**C. Algoritma Transformasi Koordinat (Ekuatorial ke Horizon)** Katalog astronomi (seperti data ephemeris NASA JPL DE441) merilis posisi benda langit berupa Deklinasi ( $\delta$ ) dan Asensio Rekta ( $\alpha$ ). Namun, untuk keperluan observasi empiris—seperti membidik teleskop saat sidang isbat—astronom membutuhkan data koordinat horizon, yaitu Ketinggian/Altitude ( $h$ ) dan Azimuth ( $A$ ).

Proses ini memerlukan konversi dari Sistem Koordinat Ekuatorial ( $\delta$ ,  $H$ ) menjadi Sistem Koordinat Horizon ( $h$ ,  $A$ ). Berdasarkan kaidah trigonometri bola (*spherical trigonometry*) dari Segitiga Astronomi yang menghubungkan Kutub Utara Langit, Zenit, dan Benda Langit, berlaku formulasi matematis berikut:

1. **Persamaan Ketinggian (Altitude,  $h$ ):**

$$\sin(h) = \sin(\phi) * \sin(\delta) + \cos(\phi) * \cos(\delta) * \cos(H)$$

Dari persamaan di atas, nilai  $h$  dapat dicari dengan fungsi *arc sine* ( $\text{asin}$ ). Jika  $h$  bernilai negatif, maka objek langit tersebut berada di bawah ufuk (*invisible*).

2. **Persamaan Azimuth ( $A$ ):**

$$\tan(A) = \sin(H) / (\cos(H) * \sin(\phi) - \tan(\delta) * \cos(\phi))$$

Penyelesaian azimuth memerlukan kehati-hatian matematis (biasanya menggunakan fungsi atan2 pada pemograman) agar nilai sudut yang dihasilkan jatuh pada kuadran yang tepat (0 hingga 360 derajat), diukur dari titik Utara sejati (True North) searah jarum jam.

**D. Koreksi Kritis: Menuju *Geocentric-Apparent Altitude*** Di sinilah titik krusial dari integrasi komputasi falak modern. Formulasi trigonometri bola di atas murni menghasilkan *geometric altitude* (ketinggian geometris yang mengasumsikan cahaya berjalan dalam garis lurus tanpa gangguan medium dan pengamat berada tepat di pusat Bumi). Dalam praktiknya, pembacaan nilai geometris murni ini akan menghasilkan galat (error) observasional yang fatal di lapangan.

Modul pemindaian koordinat yang akurat wajib melakukan transformasi lebih lanjut untuk mendapatkan nilai **Geocentric-Apparent Altitude** (Ketinggian Tampak). Ketinggian objek yang dihitung secara matematis harus dikoreksi oleh anomali-anomali fisis berikut:

1. **Refraksi Atmosfer (Atmospheric Refraction):** Atmosfer Bumi membelokkan lintasan cahaya dari benda langit akibat perbedaan kerapatan udara. Efek ini membuat objek langit (seperti Matahari dan Bulan) terlihat lebih tinggi dari posisi geometris sebenarnya, terutama saat objek berada sangat dekat dengan horizon (koreksinya bisa mencapai sekitar 34 menit busur).

2. **Paralaks Diurnal (Horizontal Parallax):** Karena pengamat berada di permukaan Bumi dan bukan di pusat Bumi (geosentris), sudut pandang terhadap benda-benda terdekat (khususnya Bulan) mengalami pergeseran relatif terhadap latar belakang bintang. Nilai paralaks horizontal Bulan (sekitar 57 menit busur) selalu mengurangi nilai ketinggian geometrisnya.
3. **Kerendahan Ufuk (Dip of Horizon):** Ketinggian lokasi pengamat (misalnya observatorium di atas gunung) menurunkan posisi horizon yang sebenarnya (ufuk mar'i) dibandingkan dengan horizon teoretis (ufuk hakiki).

Persamaan koreksinya adalah:  $h_{\text{apparent}} = h_{\text{geometric}} + \text{Refraction} - \text{Parallax} - \text{Dip of Horizon}$

Kalkulasi *geocentric-apparent altitude* ini adalah standar mutlak dalam hisab *tahqiqi* modern. Tanpa koreksi ini, penetapan ketinggian hilal (sebagai parameter imkanur ruyat MABIMS) atau batas fajar *sadiq* (untuk waktu Subuh) akan tereduksi menjadi asumsi matematis hampa yang kehilangan relevansi dan validitas observasionalnya di alam nyata.

### 2.3. Fenomena Presesi, Nutasi, dan Refraksi Atmosfer

**A. Presesi Ekuinoks (Precession of the Equinoxes): Dinamika Gyroskopik Bumi** Dalam analisis mekanika langit yang rigor, Bumi tidak berotasi secara statis pada poros yang tetap. Karena bentuk Bumi bukanlah bola sempurna melainkan *oblate spheroid* (pepat pada kutub dan menonjol pada ekuator), tarikan gravitasi asimetris dari Bulan dan Matahari terhadap tonjolan ekuatorial tersebut menghasilkan gaya putar (torsi). Interaksi fisika ini menyebabkan sumbu rotasi Bumi mengalami gerak gasing atau torsi giroskopik yang dikenal sebagai Presesi.

Sumbu rotasi Bumi menyapu lintasan berbentuk kerucut di ruang angkasa dengan periode siklus yang sangat lambat, yakni sekitar 25.772 tahun untuk menyelesaikan satu putaran penuh (360 derajat). Dampak astrometri dari fenomena ini sangat fundamental. Pertama, posisi Kutub Utara Langit (North Celestial Pole) terus bergeser. Bintang Polaris (Alpha Ursae Minoris) yang saat ini menjadi bintang utara, perlahan akan digantikan oleh bintang Vega (Alpha Lyrae) dalam waktu sekitar 12.000 tahun ke depan.

Kedua, dan yang paling krusial dalam komputasi falak, presesi menyebabkan pergeseran Vernal Equinox (Titik Aries)—titik nol bagi sumbu koordinat Asensio Rekta dan Bujur Ekliptika—sebesar kurang lebih 50,3 detik busur per tahun ke arah barat (berlawanan dengan gerak semu tahunan Matahari). Akibatnya, seluruh nilai koordinat benda langit (Asensio Rekta dan Deklinasi) dalam katalog astronomi mengalami perubahan yang konstan setiap tahun. Oleh karena itu, para astronom dan pakar hisab wajib menggunakan Standar Epos (Standard Epoch), seperti Epos J2000.0, yang kemudian harus ditransformasikan ke Epos saat ini (Epoch of Date) sebelum melakukan kalkulasi *geocentric-apparent altitude* untuk keperluan sidang isbat atau jadwal shalat.

**B. Osilasi Aksial: Nutasi (Nutation) dalam Orbit Bulan** Sumbu Bumi tidak hanya bergerak melingkar secara mulus akibat presesi, tetapi juga mengalami osilasi atau "anggukan" kecil secara periodik. Gerak periodik berskala kecil yang superposisi pada lintasan presesi ini dinamakan Nutasi.

Akar mekanika dari fenomena nutasi terletak pada dinamika bidang orbit Bulan. Orbit Bulan mengelilingi Bumi tidak sejajar dengan ekliptika, melainkan miring sekitar 5,14 derajat. Titik potong orbit Bulan dan ekliptika (nodus orbit/titik simpul) bergeser mundur secara perlahan dan menyelesaikan satu siklus penuh setiap 18,6 tahun. Pergeseran nodus orbit ini menyebabkan variasi intensitas tarikan gravitasi Bulan terhadap ekuator Bumi, sehingga kemiringan sumbu rotasi Bumi (Obliquity of the Ecliptic) berosilasi dengan amplitudo sekitar 9,2 detik busur dalam siklus 18,6 tahun tersebut.

Kombinasi antara presesi dan nutasi melahirkan dua lapisan parameter koordinat langit:

1. **Mean Coordinates (Koordinat Rata-rata):** Posisi objek langit yang hanya memperhitungkan efek presesi jangka panjang, mengabaikan fluktuasi jangka pendek.
2. **True Coordinates (Koordinat Sejati):** Posisi fisis objek langit sesungguhnya setelah memperhitungkan efek nutasi. Transisi dari koordinat rata-rata menuju koordinat sejati ini memerlukan penyelesaian deret trigonometri yang sangat kompleks (sering disebut sebagai Deret Nutasi IAU), yang mutlak diperlukan untuk mencapai akurasi sub-detik busur dalam algoritma falak kontemporer.

Keteraturan mekanika rotasi, presesi, dan nutasi yang sangat stabil dan terukur ini merefleksikan arsitektur alam semesta yang diciptakan dengan presisi mutlak, sebagaimana ditegaskan dalam firman Allah SWT:

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ

*Artinya: "Sesungguhnya Kami menciptakan segala sesuatu menurut ukuran (ketentuan/presisi)."*  
(QS. Al-Qamar [54]: 49)

Kata *qadar* dalam ayat tersebut, secara terminologi sains, mewakili konstanta fisika dan hukum mekanika langit yang mengendalikan perturbasi sekecil apa pun di alam semesta, memungkinkannya untuk diprediksi secara matematis.

**C. Optika Atmosfer: Analisis Hukum Snellius pada Refraksi Astronomis** Jika presesi dan nutasi adalah anomali geometris murni dari bola langit, maka Refraksi Atmosfer adalah anomali optis yang disebabkan oleh medium gas Bumi. Saat cahaya dari bintang, Bulan, atau Matahari (berasal dari ruang hampa bersuhu nyaris 0 Kelvin dan kerapatan nol) memasuki atmosfer Bumi,

cahaya tersebut melewati lapisan udara dengan gradien densitas (kerapatan) yang terus meningkat hingga mencapai permukaan Bumi.

Berdasarkan Hukum Snellius dalam optika, sinar cahaya yang melintasi dua medium dengan indeks bias berbeda akan dibelokkan. Karena densitas udara di ufuk bawah jauh lebih padat daripada di stratosfer, lintasan cahaya benda langit akan melengkung mendekati garis normal (vertikal pengamat). Efek pembelokan fisis inilah yang mendefinisikan deviasi antara ketinggian geometris murni (dari pusat Bumi) dengan **Geocentric-Apparent Altitude** (Ketinggian Tampak dari geosentris).

Sifat refraksi astronomis bergantung mutlak pada Ketinggian Objek (Altitude), Temperatur Udara lokal, dan Tekanan Udara (Barometrik). Karakteristik utamanya meliputi:

1. Refraksi bernilai 0 pada titik Zenit (cahaya jatuh tegak lurus, tidak mengalami pembelokan).
2. Refraksi mencapai nilai maksimum di garis horizon (ufuk mar'i). Pada kondisi standar (suhu 10°C dan tekanan 1010 mb), nilai refraksi horizontal rata-rata adalah sekitar 34 menit busur (0°34').
3. Karena piringan Matahari memiliki diameter sudut sekitar 32 menit busur, ketika piringan bawah Matahari secara visual (apparent) tampak tepat menyentuh ufuk barat saat Maghrib, secara fisik-geometris (geometric) seluruh piringan Matahari sejatinya sudah berada di bawah garis horizon.

**D. Implikasi Syar'i: Merajut Hisab dan Rukyat** Mengabaikan ketiga fenomena di atas (presesi, nutasi, refraksi) akan mengakibatkan galat (error) kalkulasi yang merusak keabsahan ibadah. Sebagai contoh, tanpa memasukkan faktor refraksi atmosfer, jadwal waktu shalat Maghrib akan terhitung lebih cepat beberapa menit dari yang seharusnya, yang dapat membatalkan puasa secara hukum syar'i (fikih).

Demikian pula dalam konteks hisab awal bulan. Pengujian tinggi hilal hakiki (misalnya syarat MABIMS baru > 3 derajat) sejatinya harus diproyeksikan menggunakan *geocentric-apparent altitude*. Hilal yang secara kalkulasi geometris berada pada ketinggian 2,5 derajat, bisa jadi secara fisis-optis telah terdongkrak posisinya oleh efek refraktif atmosfer. Sinkronisasi antara hisab dan observasi visual (rukyyatul hilal) hanya akan tercapai jika model atmosfer lokal dimasukkan ke dalam algoritma ephemeris, menjembatani jarak epistemologis antara kalkulasi matematis (hisab tahqiqi) dengan kesaksian mata telanjang atau teleskop di lapangan.

## 2.4. Koreksi Observasional: Transisi dari Koordinat Geometris Geosentris ke Geocentric-Apparent Altitude

**A. Urgensi Transisi Koordinat dalam Hisab Tahqiqi** Komputasi benda langit menggunakan data ephemeris modern, seperti *dataset* NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) DE441, pada dasarnya menghasilkan output berupa *Geocentric Geometric Coordinates* (Koordinat Geometris Geosentris). Artinya, posisi Matahari atau Bulan tersebut dihitung seolah-olah pengamat berada tepat di pusat Bumi (geosentris) dan ruang angkasa sepenuhnya berupa ruang hampa tanpa medium bias (geometris).

Namun, dalam praktik observasi (*rukyatul hilal* maupun pengukuran *rashdul qiblah*), pengamat manusia selalu berdiri di permukaan Bumi (toposentris) dan melihat melalui lapisan atmosfer yang berlapis-lapis. Oleh karena itu, terdapat jarak epistemologis dan fisis antara "apa yang dihitung di atas kertas" dengan "apa yang ditangkap oleh mata atau lensa teleskop". Jika astronom falak menggunakan ketinggian geometris murni untuk sidang isbat, niscaya akan terjadi galat fatal. Di sinilah koreksi observasional menjadi jantung dari hisab *tahqiqi* modern untuk menghasilkan nilai *Geocentric-Apparent Altitude* (Ketinggian Tampak Geosentris).

Al-Qur'an secara menakjubkan telah menyinggung keterbatasan dan bias optis penglihatan manusia ketika mengobservasi langit, serta memerintahkan pengamatan yang berulang dan presisi:

الَّذِي خَلَقَ سَبْعَ سَمَاوَاتٍ طِبَاقًا مَّا تَرَى فِي خَلْقِ الرَّحْمَنِ مِنْ تَفَافُتٍ فَارْجِعِ الْبَصَرَ هَلْ تَرَى مِنْ فُطُورٍ . ثُمَّ ارْجِعِ الْبَصَرَ  
كَرْرَيْنِ يَنْقَلِبْ إِلَيْكَ الْبَصَرُ حَاسِنًا وَهُوَ حَسِيرٌ

*Artinya: "Yang telah menciptakan tujuh langit berlapis-lapis. Kamu sekali-kali tidak melihat pada ciptaan Tuhan Yang Maha Pemurah sesuatu yang tidak seimbang. Maka lihatlah berulang-ulang, adakah kamu lihat sesuatu yang cacat? Kemudian pandanglah sekali lagi niscaya penglihatanmu akan kembali kepadamu dengan tidak menemukan sesuatu cacat dan penglihatanmu itu pun dalam keadaan payah (menurun kemampuannya)." (QS. Al-Mulk [67]: 3-4)*

Kata *hasir* (payah/terbatas) mengisyaratkan bahwa instrumen optis biologis manusia tidak mampu secara absolut menangkap realitas geometris alam semesta secara murni akibat distorsi fisis. Untuk mengkompensasi kelemahan tersebut, sains astronomi merumuskan algoritma koreksi fisis.

**B. Ikhtilaf al-Manzar (Paralaks Horizontal dan Diurnal)** Koreksi pertama yang wajib diaplikasikan adalah Paralaks (*Ikhtilaf al-Manzar*). Paralaks adalah pergeseran posisi sudut suatu benda langit yang tampak apabila diamati dari dua titik referensi yang berbeda (pusat Bumi vs permukaan Bumi).

Karena Bulan adalah benda langit terdekat dengan Bumi (jarak rata-rata 384.400 km), efek paralaksnya sangat masif, mencapai sekitar 57 hingga 61 menit busur (hampir 1 derajat penuh).

Ketika Bulan berada di ufuk (saat Maghrib), pengamat di permukaan Bumi melihat Bulan dari posisi yang lebih "tinggi" secara spasial dibandingkan pusat Bumi. Hal ini menyebabkan Bulan tampak terdorong ke bawah mendekati horizon.

Oleh karena itu, nilai paralaks selalu **mengurangi** ketinggian geometris objek. Persamaan dasar paralaks dalam trigonometri bola adalah: Paralaks = Paralaks Horizontal Ekuatorial \* cosinus (Ketinggian Geometris) Kalkulasi ini menuntut transisi penuh dari sistem Geosentris murni menjadi Toposentris. Tanpa reduksi paralaks ini, hilal yang dihisab setinggi 3 derajat secara geometris, sesungguhnya fisisnya di lapangan hanya berada di ketinggian sekitar 2 derajat.

**C. Inhitat al-Ufuq (Kerendahan Ufuk / Dip of Horizon)** Koreksi kedua berkaitan dengan elevasi (ketinggian) pengamat di atas permukaan laut (mdpl). Semakin tinggi posisi pengamat (misalnya observatorium di atas bukit), cakrawala atau ufuk akan tampak semakin turun menjauhi bidang horizontal matematis yang sejajar dengan mata. Penurunan ufuk secara fisis ini disebut *Dip of Horizon (Inhitat al-Ufuq)*.

Konsekuensi astronomis dari kerendahan ufuk adalah memperbesar area langit yang dapat diamati. Jika ufuk sejati turun, maka jarak sudut antara hilal (atau Matahari) dengan ufuk fisis (ufuk mar'i) menjadi lebih besar. Dalam perhitungan awal bulan, *Dip of Horizon* dihitung berdasarkan rumus empiris atmosferik:  $Dip = 1.76 * \text{akar kuadrat (Ketinggian Pengamat dalam meter)}$ , dengan hasil dalam satuan menit busur. Penambahan nilai ufuk mar'i ini sangat krusial bagi pos observasi tinggi seperti Observatorium Bosscha atau Pos Observasi Rukyatul Hilal di pegunungan.

**D. Sintesis Algoritma: Formulasi Geocentric-Apparent Altitude** Setelah menghitung lintasan murni bola langit, lalu menerapkan efek Paralaks, Refraksi Atmosfer (sebagaimana dibahas pada Sub-bab 2.3), dan Kerendahan Ufuk, kita dapat memformulasikan persamaan akhir untuk memproyeksikan posisi benda langit agar sama persis dengan apa yang dilihat oleh teleskop.

Persamaan sintesisnya dituliskan sebagai: **Tinggi Tampak (Apparent Altitude)** = Tinggi Geometris Murni (True Altitude) - Paralaks Diurnal + Refraksi Atmosfer + Semi-Diameter (jika menghitung piringan atas/bawah)

Untuk parameter visibilitas hilal (misalnya Kriteria MABIMS Baru: Tinggi Minimal 3 derajat dan Elongasi 6,4 derajat), yang digunakan sebagai acuan absolut adalah *Topocentric Apparent Altitude* (Tinggi Tampak Toposentris). Dengan mengadopsi standar komputasi ini, diskursus Ilmu Falak modern membuktikan bahwa Hisab tidak pernah bertentangan dengan Rukyat. Hisab yang komprehensif (*tahqiqi* tingkat tinggi) sejatinya adalah pemodelan matematis dari Rukyat itu sendiri, memvalidasi hukum alam (*sunnatullah*) yang beroperasi di alam semesta secara konsisten.

## DAFTAR PUSTAKA BAB 2

Azhari, S. (2007). *Ilmu Falak: Perjumpaan Khazanah Islam dan Sains Modern*. Yogyakarta: Suara Muhammadiyah.

Djamaluddin, T. (2011). *Astronomi Memberi Solusi Penyatuan Ummat*. Jakarta: LAPAN.

Ilyas, M. (1997). *Astronomy of Islamic Times for the Twenty-first Century*. London: Mansell Publishing.

Meeus, J. (1998). *Astronomical Algorithms* (2nd ed.). Richmond, VA: Willmann-Bell.

Seidelmann, P. K. (Ed.). (1992). *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. Mill Valley, CA: University Science Books.

Smart, W. M. (1977). *Textbook on Spherical Astronomy* (6th ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Urban, S. E., & Seidelmann, P. K. (Eds.). (2013). *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac* (3rd ed.). Mill Valley, CA: University Science Books.

## BAB 3: ALGORITMA DAN AKURASI PENENTUAN ARAH KIBLAT

### 3.1. Dasar-dasar Trigonometri Bola (*Spherical Trigonometry*) pada Permukaan Bumi

**A. Landasan Normatif dan Vektor Ortodromik Kiblat** Penentuan arah kiblat merupakan fusi fundamental antara kepatuhan teologis (fikih) dan ketepatan saintifik (geodesi spasial). Secara normatif, perintah menghadap Ka'bah saat mendirikan shalat diwahyukan dalam momentum historis perpindahan kiblat dari Baitul Maqdis ke Makkah. Allah SWT berfirman:

فَدُ نَرَى تَقْلَبَ وَجْهَكَ فِي السَّمَاءِ فَالْتَوَلَّيْنَاكَ قِبْلَةً تَرْضَاهَا فَوَلَّ وَجْهَكَ شَطْرَ الْمَسْجِدِ الْحَرَامِ وَحَيْثُ مَا كُنْتُمْ فَوَلُّوا وُجُوهَكُمْ شَطْرَهُ

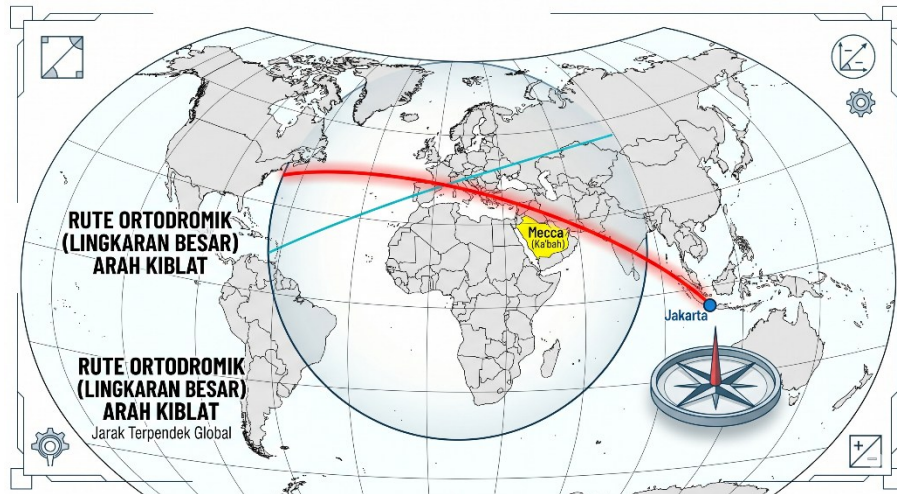
*Artinya: "Sungguh Kami (sering) melihat mukamu menengadahkan ke langit, maka sungguh Kami akan memalingkan kamu ke kiblat yang kamu sukai. Palingkanlah mukamu ke arah Masjidil Haram. Dan di mana saja kamu berada, palingkanlah mukamu ke arahnya..."* (QS. Al-Baqarah [2]: 144).

Kata kunci dalam diskursus astrometri pada ayat tersebut adalah *shatr* (arah/menuju). Para ulama membagi kewajiban presisi ini menjadi dua: '*ainul Ka'bah* (menghadap fisik bangunan Ka'bah secara presisi absolut) bagi mereka yang berada di dalam Masjidil Haram, dan *jihatul Ka'bah* (menuju arah umum Ka'bah) bagi mereka yang berada jauh darinya. Namun, dalam konteks epistemologi falak kontemporer, jarak yang jauh tidak lagi menjadi justifikasi untuk mentolerir deviasi arah secara serampangan. Geometri bola (*spherical geometry*) memungkinkan setiap titik di permukaan Bumi untuk ditarik garis lurus terpendek yang secara matematis merepresentasikan *shatr* tersebut secara eksak, yang dalam ilmu navigasi disebut sebagai garis lintasan lingkaran besar (Ortodrom / *Great Circle*).

**B. Demarkasi Geometri Euklides dan Geometri Sferis** Kesalahan epistemologis yang paling umum terjadi dalam pemahaman masyarakat awam—dan bahkan pada literatur falak klasik awal—adalah memproyeksikan arah kiblat menggunakan logika planimetri (Geometri Euklides datar). Dalam peta dua dimensi standar yang menggunakan proyeksi Mercator, Bumi dibentangkan menjadi persegi panjang. Hal ini melahirkan ilusi optis dan bias geografis. Sebagai contoh ekstrem, jika menggunakan peta datar, pengamat di Amerika Utara akan berasumsi arah kiblat Makkah berada di arah Tenggara. Padahal, realitas fisik kelengkungan Bumi menuntut jalur terpendek melintasi wilayah kutub, menjadikan arah kiblat sebenarnya bagi Amerika Utara adalah Timur Laut.

Oleh karena itu, komputasi kiblat wajib menggunakan Trigonometri Bola (*Spherical Trigonometry*). Disiplin ini mengkaji hubungan antara sudut dan sisi-sisi segitiga yang terbentuk

di atas permukaan bola. Berbeda dengan segitiga datar yang jumlah ketiga sudut dalamnya selalu persis 180 derajat, jumlah sudut dalam pada segitiga bola selalu lebih besar dari 180 derajat dan kurang dari 540 derajat (dinamakan *spherical excess*). Sisi-sisi segitiga bola juga tidak diukur dengan metrik panjang linier (kilometer), melainkan dengan ukuran jarak sudut (derajat, menit busur, dan detik busur) yang berpusat pada inti Bumi.



**Gambar 3.1 Peta Ortodromik Kiblat**

Bagan kartografis presisi ini memvisualisasikan rute lingkaran besar (Great Circle) sebagai jalur terpendek global dari Jakarta ke Makkah (garis merah melengkung), membandingkannya dengan garis lurus Mercator yang salah

**C. Konstruksi Segitiga Astronomi (Segitiga Bola) Arah Kiblat** Untuk merumuskan arah azimuth kiblat, para astronom mengkonstruksi sebuah segitiga bola imajiner di atas permukaan Bumi geodetik WGS 84. Segitiga ini memiliki tiga titik sudut (titik verteks) yang bersifat absolut:

1. **Titik A (Kutub Utara Geografis / True North):** Titik referensi universal tempat konvergensi semua garis bujur.
2. **Titik B (Lokasi Pengamat / Topocentric):** Titik di mana komputasi dilakukan, didefinisikan oleh Lintang Tempat ( $\phi$ ) dan Bujur Tempat ( $\lambda$ ).
3. **Titik C (Ka'bah / Al-Masjid al-Haram):** Koordinat eksak Ka'bah secara internasional telah ditetapkan pada Lintang 21 derajat 25 menit 21.04 detik Lintang Utara, dan Bujur 39 derajat 49 menit 34.33 detik Bujur Timur.

Ketiga titik ini dihubungkan oleh tiga busur lingkaran besar yang menjadi sisi-sisi segitiga bola tersebut:

- **Sisi a:** Busur yang menghubungkan Pengamat (B) dengan Ka'bah (C). Ini adalah jarak terpendek (ortodrom) antara pengamat ke Makkah.
- **Sisi b:** Busur yang menghubungkan Ka'bah (C) dengan Kutub Utara (A). Panjangnya adalah jarak kutub (90 derajat dikurangi lintang Ka'bah).
- **Sisi c:** Busur yang menghubungkan Pengamat (B) dengan Kutub Utara (A). Panjangnya adalah (90 derajat dikurangi lintang pengamat).

**D. Hukum Cosinus Sferis dan Reduksi Matematis** Jantung dari algoritma trigonometri bola terletak pada resolusi nilai sudut A (yang merepresentasikan Azimuth Kiblat). Nilai sudut B adalah *angle of departure* dari posisi pengamat, sedangkan sudut di A merupakan representasi dari selisih bujur antara tempat pengamat dan bujur Makkah (Selisih Bujur =  $\lambda_{\text{pengamat}} - \lambda_{\text{mekah}}$ ).

Berdasarkan *Spherical Law of Cosines* (Hukum Cosinus untuk Segitiga Bola), persamaan dasar yang menghubungkan sisi dan sudut pada bola adalah:  $\cos(a) = \cos(b) * \cos(c) + \sin(b) * \sin(c) * \cos(A)$

Namun, untuk mencari arah azimuth (bukan mencari jarak), para ahli falak mengkombinasikan Hukum Cosinus dan Hukum Sinus Sferis untuk menderivasikan rumus *Cotangent* (aturan empat bagian). Formulasi standar yang menjadi pakem dalam hisab kiblat tahqiqi adalah:

$$\cot(\text{Kiblat}) = [ \sin(\text{Lintang Pengamat}) * \cos(\text{Selisih Bujur}) - \cos(\text{Lintang Pengamat}) * \tan(\text{Lintang Mekah}) ] / \sin(\text{Selisih Bujur})$$

Melalui deriasi rasional matematis inilah, nilai tak hingga dari kelengkungan bumi direduksi menjadi satu angka azimuth derajat yang eksak, yang diukur dari titik Utara sejati (True North) berputar searah jarum jam menuju arah kiblat. Formulasi ini menjadi landasan mutlak sebelum kita memasuki perhitungan dinamika gerak matahari (Rashdul Qiblah) atau menggunakan perangkat keras geodesi canggih di lapangan.

### 3.2. Formulasi Matematis Azimuth Kiblat Berbagai Wilayah Universal

**A. Universalitas Formulasi dan Problematika Kuadran Trigonometri** Setelah fondasi trigonometri bola (segitiga astronomi) diletakkan pada sub-bab sebelumnya, tantangan epistemologis berikutnya dalam komputasi astrometri adalah mengaplikasikan rumusan matematis tersebut secara universal untuk seluruh titik koordinat di permukaan Bumi. Hukum *Cotangent* yang mereduksi segitiga bola menjadi satu persamaan azimuth kiblat sering kali memunculkan problematika matematis ketika diimplementasikan ke dalam perangkat kalkulator numerik atau bahasa pemrograman falak modern.

Persoalan ini berakar pada sifat fungsi invers trigonometri (seperti *arc tangent* atau *arc cotangent*). Fungsi matematika dasar ini secara *default* hanya memberikan nilai *principal angle* (sudut utama) dalam rentang terbatas, yakni antara -90 derajat hingga +90 derajat, atau 0 derajat hingga 180 derajat. Padahal, sistem koordinat arah mata angin (Azimuth) yang diukur dari Titik Utara Sejati (*True North*) menuntut bentangan sudut komprehensif dari 0 derajat hingga 360 derajat.

Untuk mengatasi galat kuadran ini dan menciptakan algoritma penentuan arah kiblat yang bersifat universal (*foolproof*), komputasi astronomi kontemporer meninggalkan penggunaan tangen biasa dan beralih secara mutlak menggunakan fungsi *Arc Tangent 2* (disimbolkan sebagai ATAN2 dalam sintaks algoritma). Fungsi ATAN2 menghitung sudut polar dengan mempertimbangkan tanda positif (+) atau negatif (-) dari dua argumen (sumbu Y dan sumbu X), sehingga secara otomatis menempatkan hasil pada kuadran bola bumi yang tepat tanpa memerlukan koreksi logika manual bersyarat (Meeus, 1998; Smart, 1977).

Formulasi baku Azimuth Kiblat Universal (A) dengan algoritma ini didefinisikan sebagai:  $A = \text{ATAN2}(Y, X)$

Di mana komponen pembentuk vektor tersebut adalah:  $Y = \sin(\text{Bujur Mekah} - \text{Bujur Pengamat})$   
 $X = \cos(\text{Lintang Pengamat}) * \tan(\text{Lintang Mekah}) - \sin(\text{Lintang Pengamat}) * \cos(\text{Bujur Mekah} - \text{Bujur Pengamat})$

Nilai A yang dihasilkan akan berada pada rentang -180 derajat hingga +180 derajat. Jika nilai A negatif, maka algoritma cukup menambahkan konstanta 360 derajat untuk menghasilkan nilai Azimuth mutlak (diukur searah jarum jam dari Utara). Formulasi ini tidak mengenal distorsi, baik ketika pengamat berada di ekuator, di belahan bumi utara, maupun di lintang tinggi mendekati kutub.

**B. Pemetaan Vektor Kiblat dan Tipologi Kuadran Geografis** Mengingat posisi Ka'bah yang secara geografis berada pada Lintang 21 derajat 25 menit 21.04 detik Lintang Utara dan Bujur 39 derajat 49 menit 34.33 detik Bujur Timur, letak berbagai benua di Bumi dapat diklasifikasikan ke dalam empat tipologi kuadran geografis yang menentukan arah umum garis ortodromiknya:

1. **Wilayah Tenggara Mekah (Kiblat menuju Barat Laut):** Kawasan ini mencakup kepulauan Nusantara (Indonesia, Malaysia), Australia, dan Oseania. Karena Lintang Pengamat lebih selatan (bernilai negatif atau lebih kecil positifnya) dan Bujur Pengamat lebih timur (lebih besar) dari Mekah, hasil kalkulasi ATAN2 akan senantiasa mengarahkan azimuth pada rentang 270 derajat hingga 360 derajat (Barat ke Utara). Sebagai contoh, azimuth kiblat untuk wilayah Semarang (Jawa Tengah) berada di sekitar 294 derajat 30 menit (Barat Laut), bukan mutlak ke Barat.
2. **Wilayah Timur Laut Mekah (Kiblat menuju Barat Daya):** Kawasan ini mencakup Jepang, Korea, sebagian besar wilayah Rusia Timur, dan Tiongkok. Meskipun secara peta

datar (Mercator) letak mereka berada di "kanan atas" Mekah, rute terpendek melintasi kelengkungan bola bumi menarik vektor ke arah Barat Daya (rentang azimuth 180 hingga 270 derajat).

3. **Wilayah Barat Laut Mekah (Kiblat menuju Tenggara):** Kawasan ini mencakup seluruh benua Eropa dan Amerika Utara. Di sinilah sering terjadi kesalahan fatal akibat ilusi peta datar. Masyarakat muslim di Amerika Utara (seperti di New York atau Toronto) yang menggunakan peta datar akan berasumsi bahwa arah terpendek ke Makkah adalah ke arah Tenggara (melintasi Samudra Atlantik ke arah Afrika). Namun, komputasi *spherical trigonometry* membuktikan bahwa rute ortodromik (jarak terpendek) menuju Makkah justru memotong lautan Arktik di utara. Oleh karena itu, azimuth kiblat untuk Amerika Utara berada di kuadran Timur Laut (rentang 0 hingga 90 derajat). Inilah bukti empiris bahwa intuisi geografis harus tunduk pada ketetapan matematis bola.
4. **Wilayah Barat Daya Mekah (Kiblat menuju Timur Laut):** Kawasan ini mencakup benua Amerika Selatan dan sebagian selatan benua Afrika. Azimuth kiblat mereka secara konsisten mengarah ke bentang sudut antara 0 hingga 90 derajat (Timur Laut).

**C. Anomali Antipodal: Singularitas Matematis dan Fikih** Dalam diskursus topologi ruang, terdapat satu titik anomali yang sangat spesifik yang menguji batas keandalan matematika falak: Titik Antipode. Antipode adalah titik di permukaan bumi yang letaknya tepat diametral berseberangan dengan titik acuan. Titik antipode dari Ka'bah terletak di Samudra Pasifik Selatan, dengan koordinat Lintang 21 derajat 25 menit 21.04 detik Lintang Selatan (-21.4225) dan Bujur 140 derajat 10 menit 25.67 detik Bujur Barat (-140.1738).

Jika seseorang berada tepat di titik ini—di atas sebuah kapal atau instalasi terapung—lalu memasukkan koordinatnya ke dalam algoritma persamaan kiblat, maka penyebut persamaan trigonometri akan bernilai nol. Secara matematis, hal ini menghasilkan singularitas (kondisi *undefined* atau pembagian dengan nol).

Dari tinjauan astrometri spasial, fenomena asimtotik ini membuktikan bahwa dari titik antipode Ka'bah, jarak ortodromik ke Makkah melalui arah mana pun (Utara, Selatan, Timur, atau Barat) akan sama panjangnya (sejauh setengah keliling Bumi, yakni sekitar 20.015 kilometer). Oleh karena itu, dari sudut pandang fikih kontemporer, jika seorang pengamat mampu secara presisi berdiri di titik antipode Ka'bah, ia diperbolehkan menghadap ke sembarang arah, dan secara geometri ruang, ia dipastikan menghadap ke arah Ka'bah secara sah.

**D. Integrasi Hadits: Toleransi dan Presisi Arah (*Jihat* vs '*Ain*)** Meskipun algoritma komputasi astrometri modern mampu memetakan arah kiblat (Azimuth) hingga ketelitian detik busur (yang mewakili deviasi kurang dari 30 meter di lokasi Makkah), syariat Islam tetap memberikan ruang toleransi geografis yang proporsional bagi mereka yang berada pada jarak ekstrem dari Makkah. Toleransi ini bukanlah pembenaran untuk mengabaikan presisi sains, melainkan rahmat legislatif dalam fiqh tata ruang.

Nabi Muhammad SAW, saat berada di Madinah (yang terletak persis di sebelah utara Makkah), menetapkan kaidah orientasi arah secara makro. Beliau bersabda:

مَا بَيْنَ الْمَشْرِقِ وَالْمَغْرِبِ قِبْلَةٌ

Artinya: "Apa yang berada di antara timur dan barat adalah kiblat." (HR. Tirmidzi no. 342, Ibnu Majah no. 1011, disahihkan oleh Al-Albani).

Secara kontekstual, hadits ini adalah spesifik untuk penduduk Madinah (dan wilayah lain yang berlintang lebih utara secara tegak lurus dengan Makkah), di mana menghadap lurus ke Selatan adalah arah 'ainul Ka'bah (bangunan Ka'bah). Namun, deviasi sedikit ke timur atau barat (di dalam wilayah kuadran selatan) tetap diakui sebagai *jihatul Ka'bah* (arah umum Ka'bah) dan shalatnya dinilai sah secara syar'i.

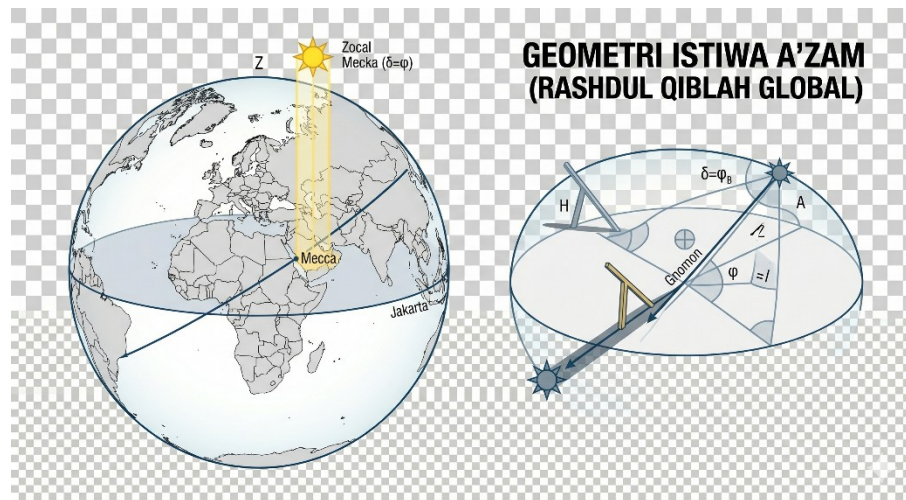
Namun demikian, para pakar *Falak Heritage* Nusantara menegaskan bahwa hadits ini tidak boleh diekstrapolasi secara keliru oleh umat Islam di Indonesia (yang berada di Tenggara Mekah). Bagi wilayah Nusantara, arah "Barat" mutlak bukanlah arah kiblat; memaksakan diri menghadap tepat ke arah Barat ekuinoks (Azimuth 270 derajat) akan menyebabkan deviasi ribuan kilometer dari Jazirah Arab (menuju ke kawasan benua Afrika seperti Somalia atau Ethiopia). Oleh karena itu, bagi masyarakat Nusantara dan global, penggunaan algoritma trigonometri bola universal sebagaimana dibahas pada sub-bab ini adalah wajib (*fardhu kifayah*) guna memastikan garis shaf masjid tetap selaras dengan garis ortodromik *shatr al-Masjid al-Haram*.

### 3.3. Dinamika *Rashdul Qiblah* (Bayang-Bayang Kiblat) Harian dan Tahunan

**A. Konseptualisasi Astronomis *Rashdul Qiblah* (Istiwa A'zam)** Dalam arsitektur ilmu falak komputasional dan astrometri, trigonometri bola memberikan rumusan matematis teoritis yang sangat presisi (sebagaimana dibahas pada sub-bab sebelumnya). Namun, realisasi rumusan tersebut di atas permukaan Bumi sering kali terkendala oleh keterbatasan instrumen geodetik atau anomali medan magnet lokal jika menggunakan kompas. Untuk menjembatani hal ini, sains astronomi Islam memformulasikan sebuah metode empiris yang memanfaatkan kedudukan Matahari sebagai proyektor alamiah berskala kosmik. Fenomena ini dikenal sebagai *Rashdul Qiblah* (bayang-bayang kiblat) atau *Istiwa A'zam* (kulminasi agung).

Secara fisis-mekanis, *Rashdul Qiblah* terjadi ketika nilai Deklinasi Matahari (jarak sudut Matahari dari ekuator langit) sama persis dengan nilai Lintang Geografis tempat berdirinya Ka'bah (sekitar 21 derajat 25 menit 21.04 detik Lintang Utara). Akibat ekuivalensi koordinat ini, pada momen kulminasi atas (transit meridian lokal di Makkah), piringan Matahari akan berada tepat di titik Zenit (*Samt ar-Ra's*) di atas Masjidil Haram.

Implikasi optis dari kesejajaran ini adalah lenyapnya bayang-bayang benda vertikal yang ada di kota Makkah pada detik tersebut. Pada saat yang sama, bagi seluruh pengamat di permukaan Bumi yang sedang mengalami siang hari (Matahari masih berada di atas horizon pengamat), setiap benda tegak lurus (*gnomon*) akan memproyeksikan bayang-bayang yang garis lurusanya secara absolut mengarah ke fisik Ka'bah.



**Gambar 3.3 Geometri Istiwa A'zam**

Diagram teknis ini menunjukkan Bumi sebagai bola 3D dengan Matahari (ikon bintang kuning) berada tepat di Zenit Makkah, memproyeksikan bayang-bayang global yang mengarah ke Ka'bah.

**B. Kalkulasi Presisi *Yaumul Rashd* (Istiwa A'zam Tahunan)** Orbit Bumi mengelilingi Matahari memiliki kemiringan ekliptika sebesar kurang lebih 23,44 derajat. Karena lintang Ka'bah (21,42 derajat LU) berada di dalam zona inter-tropis (antara 23,44 derajat LU hingga 23,44 derajat LS), maka Matahari secara reguler akan menyapu dan melewati garis lintang Ka'bah sebanyak dua kali dalam satu siklus revolusi tahunan tropis.

Berdasarkan komputasi ephemeris resolusi tinggi (seperti DE441), persilangan deklinasi Matahari dengan lintang Ka'bah ini terjadi pada dua periode spesifik:

1. **Fase Pergerakan ke Utara (Vernal ke Summer Solstice):** Terjadi pada kisaran tanggal 27 Mei (pada tahun kabisat) atau 28 Mei (pada tahun basithah).
2. **Fase Pergerakan ke Selatan (Summer Solstice ke Autumnal):** Terjadi pada kisaran tanggal 15 Juli (tahun kabisat) atau 16 Juli (tahun basithah).

Waktu eksak terjadinya *Istiwa A'zam* dapat dikalkulasi secara analitis menggunakan parameter Waktu Transit Matahari lokal di Makkah yang dikonversi ke Universal Time (UT) dan Waktu

Indonesia Barat (WIB). Rumus dasar waktu transit adalah: Waktu Transit (Makkah) = 12 jam - Equation of Time (EoT)

Karena bujur Mekah adalah 39 derajat 49 menit 34.33 detik BT (bujur timur bernilai positif), selisih waktunya dengan garis bujur Greenwich (UT) adalah sebesar bujur dibagi 15 derajat/jam (kurang lebih 2 jam 39 menit). Maka Waktu UT = 12:00:00 - EoT - (Bujur Makkah / 15) Untuk mengonversinya ke WIB (UTC+7), ditambahkan 7 jam. Secara empiris rata-rata (dengan nilai EoT pada tanggal tersebut), momentum ini jatuh pada pukul 16:18 WIB (untuk bulan Mei) dan 16:27 WIB (untuk bulan Juli). Pada momen deterministik inilah, kalibrasi massal arah kiblat dapat dilakukan oleh umat Islam di kawasan yang melihat Matahari tanpa memerlukan konversi trigonometri yang rumit.

**C. *Rashdul Qiblah* Harian (Lokal) dan Transformasi Sudut Waktu** Limitasi geografis dari fenomena *Istiwa A'zam* tahunan adalah tidak semua belahan Bumi sedang mengalami siang hari. Misalnya, umat Islam di kepulauan Pasifik Timur atau benua Amerika (seperti Amerika Serikat) sedang berada dalam fase malam hari saat Matahari melintasi Zenit Makkah, sehingga mereka tidak dapat menggunakan bayang-bayang pada tanggal 28 Mei dan 16 Juli tersebut. Untuk mengatasi hal ini, diperkenalkan metode *Rashdul Qiblah* Harian (Lokal).

Metode lokal ini tidak mensyaratkan Matahari berada di Zenit Ka'bah, melainkan mensyaratkan Azimuth Matahari pada waktu tertentu persis sejajar dengan Azimuth Kiblat di lokasi topocentric pengamat. Setiap hari, Matahari bergerak dari ufuk Timur menuju Barat dengan lintasan lintang harian yang spesifik. Akan ada satu momen di mana lintasan lintang harian Matahari berpotongan dengan lingkaran vertikal yang mengarah ke Ka'bah.

Jika azimuth arah kiblat suatu tempat adalah A, maka *Rashdul Qiblah* harian terjadi ketika Azimuth Matahari sama dengan A, atau sama dengan A + 180 derajat (di mana bayang-bayang memanjang tepat menuju atau membelakangi kiblat). Komputasi waktu lokal ini melibatkan pembalikan fungsi Azimuth pada segitiga bola untuk mencari Sudut Waktu (H) Matahari:

$$\sin(H) = [\sin(A) * \cos(\text{Ketinggian Matahari})] / \cos(\text{Deklinasi Matahari})$$

Melalui deret perhitungan iteratif (karena ketinggian Matahari sendiri merupakan fungsi dari Sudut Waktu), astronom dapat merilis jadwal menit fisis yang eksak setiap harinya bagi masjid-masjid di seluruh dunia untuk memverifikasi arah shaf mereka berdasarkan posisi unik lintang dan bujurnya masing-masing.

**D. Integrasi Dalil Syar'i dan Keunggulan Metodologi Empiris** Secara fungsional, penggunaan bayang-bayang alamiah sebagai instrumen kalibrasi sejalan dengan kaidah tadabbur alam (mengobservasi semesta) yang banyak diulang dalam teks suci. Allah SWT berfirman secara spesifik mengenai fenomena optis bayang-bayang sebagai instrumen petunjuk:

أَلَمْ تَرَ إِلَىٰ رَبِّكَ كَيْفَ مَدَّ الظِّلَّ وَلَوْ شَاءَ لَجَعَلَهُ سَاكِنًا ثُمَّ جَعَلْنَا الشَّمْسَ عَلَيْهِ دَلِيلًا

*Artinya: "Apakah kamu tidak memperhatikan (penciptaan) Tuhanmu, bagaimana Dia memanjangkan bayang-bayang itu dan kalau Dia menghendaki niscaya Dia menjadikannya tetap diam, kemudian Kami jadikan matahari sebagai petunjuk atas bayang-bayang itu." (QS. Al-Furqan [25]: 45).*

Dari perspektif astrometri terapan, *Rashdul Qiblah* memiliki supremasi validitas di atas instrumen kompas magnetik. Kompas magnetik sangat rentan terhadap dua anomali fatal:

1. **Deklinasi Magnetik (Magnetic Declination / Variation):** Kutub magnetik Bumi tidak bertepatan dengan sumbu kutub putaran rotasi geografis (True North). Deviasi ini tidak statis, melainkan terus bergeser setiap tahun akibat pergerakan dinamo cairan inti luar Bumi. Jika deviasi ini tidak dikalibrasi (di *offset*) dari perhitungan kompas, arah kiblat akan melenceng jauh.
2. **Deviasi Lokal (Magnetic Interference):** Konstruksi baja pada bangunan masjid modern, perangkat kelistrikan, maupun formasi batuan besi di bawah tanah akan mendistorsi jarum kompas.

Sebaliknya, *Rashdul Qiblah* (bayang-bayang Matahari) bersifat kebal terhadap segala bentuk anomali geomagnetik. Fotogrametri alamiah yang memanfaatkan perjalanan linier gelombang elektromagnetik dari Matahari ke Bumi akan selalu menghasilkan garis proyeksi lurus ortodromik yang merefleksikan geometri bola Bumi secara murni. Metode ini mengubah abstraksi teoretis dari trigonometri bola sferis menjadi praktik *rukyyat* harian yang dapat diverifikasi oleh masyarakat umum dengan akurasi yang absolut secara matematis maupun syar'i.

### 3.4. Praktikum Resolusi Tinggi: Pengukuran Arah Kiblat Berbasis Integrasi *Software* Astronomi

#### A. Pergeseran Paradigma: Dari Instrumen Mekanis ke Komputasi Digital (Falak Tech)

Evolusi astrometri Islam telah melampaui era observasi manual murni. Pada masa lampau, penentuan azimuth kiblat di lapangan bertumpu pada instrumen mekanis seperti *rubu' mujayyab*, astrolabe, atau yang lebih modern, teodolit optik. Meskipun teodolit memberikan presisi pembacaan sudut hingga orde detik busur, akurasi akhirnya tetap dibatasi oleh kemampuan manusia dalam menghitung efemeris Matahari secara manual dan melakukan reduksi data fisis di lapangan.

Di era komputasi modern ("Falak 5.0"), paradigma pengukuran bergeser menuju integrasi perangkat lunak astronomi (Falak Tech) yang bersifat preskriptif dan *real-time*. Perangkat lunak ini tidak sekadar menggantikan kalkulator, melainkan bertindak sebagai mesin inferensi saintifik yang mengotomatisasi pengolahan *dataset* astronomi masif, memitigasi galat hitung manusia

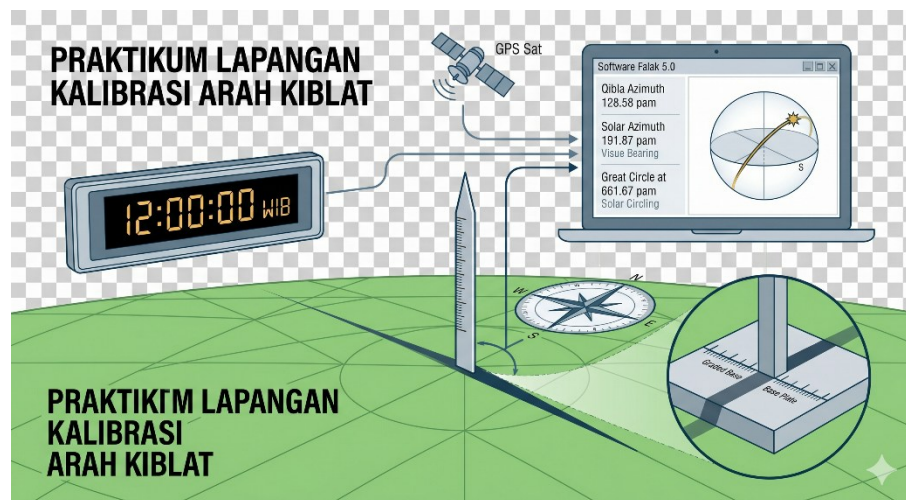
(*human error*), dan mereduksi kompleksitas trigonometri bola menjadi instruksi praktikum lapangan yang siap pakai.

Tujuan fundamental dari instrumen petunjuk spasial ini telah dilegitimasi oleh Al-Qur'an:

وَهُوَ الَّذِي جَعَلَ لَكُمُ النُّجُومَ لِتَهْتَدُوا بِهَا فِي ظُلُمَاتِ الْبَرِّ وَالْبَحْرِ ۗ قَدْ فَصَّلْنَا الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ

Artinya: "Dan Dialah yang menjadikan bintang-bintang bagimu, agar kamu menjadikannya petunjuk dalam kegelapan di darat dan di laut. Sesungguhnya Kami telah menjelaskan tanda-tanda kebesaran (Kami) kepada orang-orang yang mengetahui." (QS. Al-An'am [6]: 97)

Ayat ini secara epistemologis mendukung rekayasa teknologi (pemanfaatan benda langit sebagai sistem navigasi kosmik) bagi "orang-orang yang mengetahui" (*qaumin ya'lamun*), yang dalam konteks kekinian adalah para pakar riset komputasi dan pengembang perangkat lunak falak.



Gambar 3.4 Ilustrasi Praktikum Lapangan

Visualisasi practical lapangan yang menggabungkan instrumen fisik (gnomon, gawai, kompas) dengan perangkat lunak (Falak 5.0) dan satelit GPS untuk kalibrasi arah kiblat yang akurat.

**B. Arsitektur Backend dan Modul Ephemeris Tingkat Tinggi** Praktikum penentuan arah kiblat beresolusi tinggi menuntut arsitektur *backend* perangkat lunak yang ditopang oleh pustaka pemrograman saintifik mutakhir. Dalam ekosistem pengembangan kontemporer, bahasa pemrograman dinamis (seperti Python) yang dipadukan dengan pustaka astronomi spesifik (seperti modul *Skyfield*) menjadi standar emas. Modul ini memungkinkan perangkat lunak untuk melakukan *query* langsung ke struktur *file* biner efemeris yang diterbitkan oleh NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL).

Dalam mengkalibrasi arah kiblat harian (*Rashdul Qiblah* lokal), stabilitas numerik adalah kunci. Oleh karena itu, logika peralihan efemeris (*ephemeris switching logic*) dalam struktur kode harus dirancang untuk memprioritaskan *file* berukuran maksimal. Penggunaan *dataset* integrasi numerik DE441 (yang menjangkau perhitungan presisi tinggi dari tahun -3000 hingga +3000 Masehi) adalah esensial untuk memodelkan lintasan rotasi Bumi dan pergerakan semu Matahari. Dengan *dataset* ini, perangkat lunak mensimulasikan vektor posisi topocentric pengamat secara dinamis, mengkalkulasi waktu persis ketika azimuth Matahari berimpit dengan azimuth Ka'bah hingga tingkat fraksi detik.

**C. Pemindaian Koordinat: Implementasi *Geocentric-Apparent Altitude*** Salah satu kelemahan fatal dari *software* falak amatir adalah kegagalan membedakan antara posisi geometris benda langit dan posisi optis fisisnya. Dalam praktikum lapangan, ketika seorang praktisi menembak piringan Matahari menggunakan teodolit untuk mencari azimuth kiblat pada waktu tertentu, ia berhadapan dengan atmosfer Bumi yang membiaskan cahaya.

Oleh karena itu, mesin kalkulasi (*calculation engine*) dalam perangkat lunak harus dilengkapi dengan modul pemindaian koordinat yang secara deterministik mentransformasi nilai lintang dan bujur murni ke dalam parameter *geocentric-apparent altitude*. Logika kode wajib memperhitungkan suhu absolut di lapangan, tekanan barometrik lokal, serta kerendahan ufuk geografis. Jika Matahari berada pada ketinggian rendah (di bawah 15 derajat), algoritma harus menyuntikkan koreksi refraksi berbasis model atmosferik standar (seperti model formula Garfinkel atau Saastamoinen). Hanya dengan koreksi *apparent* ini, bayang-bayang benda tegak yang dikonfirmasi oleh pergerakan waktu di layar aplikasi akan valid dan tidak mengalami pergeseran lateral (deviasi spasial).

**D. Visualisasi GUI dan Eksekusi Lapangan (Integrasi *Hardware-Software*)** Resolusi hitungan di balik layar (yang menggunakan *array* matematis dari pustaka seperti *NumPy*) harus diekstraksi ke dalam antarmuka yang koheren bagi pengguna akhir (praktisi falak). Implementasi antarmuka pengguna grafis (GUI) modern—misalnya menggunakan kerangka kerja *CustomTkinter* untuk aplikasi *desktop*—memungkinkan visualisasi waktu secara *real-time* yang disandingkan dengan parameter fisis lingkungan. Pustaka visualisasi seperti *Matplotlib* dapat diintegrasikan untuk menggambar dinamika lintasan Matahari terhadap garis horizon pengamat.

Dalam praktikum lapangan, tahapan eksekusinya adalah sebagai berikut:

1. **Inisiasi Koordinat:** Pengguna memasukkan koordinat Lintang, Bujur, dan Elevasi melalui GPS resolusi tinggi ke dalam aplikasi.
2. **Kalkulasi Vektor:** Aplikasi menghitung azimuth kiblat universal menggunakan persamaan *Arc Tangent 2* (*ATAN2*) dan memetakannya pada horizon toposentris.
3. **Simulasi Dinamis:** Mesin DE441 mencari *timestamp* (waktu fisis) saat Azimuth Matahari sama dengan azimuth kiblat (atau selisih 180 derajatnya).

4. **Kalibrasi Lapangan:** Praktisi mendirikan *gnomon* (tongkat penyipat datar) atau teodolit yang telah dikalibrasi *waterpass*-nya. Saat *timer* aplikasi mencapai waktu *Rashd* (dengan koreksi fisis yang telah teraplikasi), bayang-bayang yang jatuh diarsir sebagai *True Qibla Line* (Garis Kiblat Sejati).

Dengan metodologi komputasi silang-disiplin ini, Ilmu Falak tidak lagi sekadar dogma masa lalu, melainkan sains terapan yang terverifikasi secara empiris dan tidak terbantahkan secara matematis.

### DAFTAR PUSTAKA BAB 3

Azhari, S. (2007). *Ilmu Falak: Perjumpaan Khazanah Islam dan Sains Modern*. Yogyakarta: Suara Muhammadiyah.

Djamaluddin, T. (2011). *Astronomi Memberi Solusi Penyatuan Ummat*. Jakarta: LAPAN.

Ilyas, M. (1984). *A Modern Guide to Astronomical Calculations of Islamic Calendar, Times & Qibla*. Kuala Lumpur: Berita Publishing.

King, D. A. (1999). *World-Maps for Finding the Direction and Distance to Mecca: Innovation and Tradition in Islamic Science*. Leiden: Brill.

Meeus, J. (1998). *Astronomical Algorithms* (2nd ed.). Richmond, VA: Willmann-Bell.

Rhodes, B. (2019). *Skyfield: High precision research-grade positions for the planets and Earth satellites*. Python Package Index (PyPI).

Smart, W. M. (1977). *Textbook on Spherical Astronomy* (6th ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Suryadi, B., & Purwanto, A. (2015). *Fisika dan Astronomi Islam*. Bandung: Rosdakarya.

## BAB 4: GERAK SEMU MATAHARI DAN PRESISI JADWAL IBADAH

### 4.1. Apparent Solar Time vs. Mean Solar Time dan Perhitungan Equation of Time

**A. Paradigma Waktu dalam Konteks Syariat dan Sains** Sistem waktu dalam penjadwalan ibadah umat Islam—khususnya shalat fardhu lima waktu—terikat secara deterministik dengan dinamika gerak semu harian dan tahunan Matahari. Berbeda dengan waktu kalender yang dihitung berdasarkan rotasi sinodis Bulan (kamariah), ritme ibadah harian berakar mutlak pada posisi fisis Matahari relatif terhadap posisi pengamat di permukaan Bumi.

Allah SWT secara eksplisit mengaitkan kewajiban mendirikan shalat dengan pergeseran posisi Matahari dalam firman-Nya:

أَقِمِ الصَّلَاةَ لِذُلُوكِ الشَّمْسِ إِلَى غَسَقِ اللَّيْلِ وَقُرْآنِ الْفَجْرِ إِنَّ قُرْآنَ الْفَجْرِ كَانَ مَشْهُودًا

*Artinya: "Dirikanlah shalat dari sesudah matahari tergelincir sampai gelap malam dan (dirikanlah pula shalat) subuh. Sesungguhnya shalat subuh itu disaksikan (oleh malaikat)." (QS. Al-Isra [17]: 78)*

Kata *duluk as-syams* (tergelincirnya Matahari) secara astronomis merujuk pada momentum kulminasi atas atau transit meridian (*Zawal*), yang menjadi penanda dimulainya waktu Dzuhur. Namun, untuk mendefinisikan waktu transit ini dengan presisi tingkat tinggi, astronomi matematis mengharuskan kita membedah anomali durasi hari akibat mekanika orbit, yang memunculkan dikotomi fundamental antara *Apparent Solar Time* dan *Mean Solar Time*.

**B. Demarkasi *Apparent Solar Time* dan *Mean Solar Time*** Dalam observasi primitif, satu hari didefinisikan sebagai interval waktu antara dua kulminasi atas Matahari secara berturut-turut di meridian lokal. Waktu yang diukur berdasarkan posisi fisis Matahari aktual di langit ini dinamakan **Apparent Solar Time (Waktu Surya Sejati / Waktu Hakiki)**. Instrumen klasik seperti jam matahari (*Mizwalah*) atau *sundial* secara natural mengukur *Apparent Solar Time* ini. Dalam sistem ini, Matahari menempati titik tertinggi (meridian) tepat pada pukul 12:00 *Apparent Time*.

Akan tetapi, penggunaan *Apparent Solar Time* menyimpan kecacatan fatal untuk standardisasi jam mekanik dan digital kontemporer. Durasi satu "hari sejati" ternyata tidak konstan 24 jam; ia berfluktuasi sepanjang tahun. Fluktuasi ini membuat jam mekanis yang berdetak dengan interval konstan tidak dapat disinkronkan dengan jam matahari.

Untuk memecahkan masalah asinkronisasi ini, para ahli mekanika langit menciptakan sebuah abstraksi matematis yang disebut **Mean Solar Time (Waktu Surya Rata-rata / Waktu Wasati)**.

*Mean Solar Time* didasarkan pada pergerakan "Matahari Fiktif" (Mean Sun) yang diasumsikan bergerak mengelilingi Ekuator Langit (bukan Ekliptika) dengan kecepatan sudut yang konstan dan mutlak sepanjang tahun. Waktu dari Matahari Fiktif inilah yang menggerakkan jam tangan, gawai, dan sistem Universal Time Coordinated (UTC) di seluruh dunia, di mana satu hari didefinisikan secara eksak berdurasi 24 jam (86.400 detik).

**C. Anomali Keplerian dan Obliquity: Akar Terjadinya Fluktuasi Waktu** Ketidaksesuaian antara pergerakan Matahari Sejati dan Matahari Fiktif disebabkan oleh dua parameter fisis kosmik yang mendasari mekanika tata surya:

1. **Eksentrisitas Orbit Bumi (Hukum Kepler II):** Orbit translasi Bumi mengelilingi Matahari bukanlah lingkaran sempurna, melainkan elips dengan eksentrisitas sekitar 0,0167. Sesuai Hukum Kepler Kedua mengenai kekekalan momentum sudut kosmik, Bumi akan bergerak lebih cepat saat berada di titik terdekat dengan Matahari (Perihelion, sekitar awal Januari) dan bergerak lebih lambat saat di titik terjauh (Aphelion, sekitar awal Juli). Perubahan kecepatan orbit relasional ini menyebabkan jarak sudut semu yang ditempuh Matahari Sejati di sepanjang bidang ekliptika berbeda-beda setiap harinya.
2. **Kemiringan Ekliptika (*Obliquity of the Ecliptic*):** Sumbu rotasi Bumi miring sekitar 23,44 derajat terhadap bidang orbitnya (ekliptika). Meskipun Matahari Sejati melaju dengan kecepatan konstan di sepanjang ekliptika, proyeksi kecepatan tersebut ke Ekuator Langit (bidang acuan *Right Ascension* tempat berjalannya "waktu") tidaklah konstan. Di sekitar ekuinoks (Maret dan September), proyeksi pergerakan ini miring, sehingga komponen kecepatan horizontalnya (Asensio Rekta) lebih kecil. Sebaliknya, saat solstis (Juni dan Desember), pergerakannya sejajar dengan ekuator, memaksimalkan perubahan Asensio Rekta.

**D. Perhitungan *Equation of Time* (Ta'dil al-Waqt)** Residu atau selisih matematis kumulatif antara Waktu Surya Sejati dengan Waktu Surya Rata-rata pada satu momen fisis tertentu dikenal sebagai **Equation of Time (EoT)** atau dalam tradisi falak klasik disebut *Ta'dil al-Waqt / Perata Waktu*.

Persamaan dasarnya adalah:  $\text{Equation of Time} = \text{Apparent Solar Time} - \text{Mean Solar Time}$

Nilai EoT bersifat dinamis secara kontinyu, membentuk kurva osilasi periodik yang puncaknya bervariasi dari sekitar -14 menit 15 detik (sekitar tanggal 11 Februari) hingga maksimum +16 menit 25 detik (sekitar tanggal 3 November). Jika posisi Matahari Sejati dan Matahari Rata-rata dipotret setiap hari pada pukul 12:00 *Mean Time* dari tempat yang sama selama setahun, gabungan titik-titik posisinya akan membentuk kurva lintasan tertutup berbentuk angka 8 tak simetris yang dikenal sebagai **Analemma**.

Untuk keperluan hisab ibadah yang komprehensif, para pengembang peranti lunak astronomi (Falak Tech) tidak lagi menggunakan tabel konstanta mati. Algoritma harus menghitung nilai EoT secara analitik. Salah satu pendekatan resolusi menengah yang sering diintegrasikan dalam arsitektur kode (sebelum masuk ke *query* ephemeris mentah seperti DE441) menggunakan deret fungsi harmonik. Formulasi pendekatannya dapat direpresentasikan sebagai:

$$\text{EoT (dalam menit)} = 9.87 * \sin(2B) - 7.53 * \cos(B) - 1.5 * \sin(B)$$

Di mana parameter B adalah fungsi dari hari dalam setahun (d):  $B = 360/365.24 * (d - 81)$  derajat.

Dalam integrasi kalibrasi jadwal shalat, pengabaian nilai EoT adalah kesalahan fatal. Mengkalkulasi waktu Dzuhur tidak bisa dilakukan hanya dengan melihat kapan Matahari melintasi bujur meridian pengamat, tetapi nilai 12:00 tersebut wajib dikoreksi silang dengan nilai *Equation of Time* pada hari observasi, kemudian dikompensasi lagi dengan selisih bujur dari garis bujur standar zona waktu lokal. Presisi dari variabel waktu tak linear ini adalah bukti dari *husban* (perhitungan teliti) alam semesta yang menjadi instrumen pengabdian hamba kepada Sang Pencipta.

#### 4.2. Koreksi Ketinggian Tempat (*Dip of Horizon*) dan Sudut Waktu Matahari

**A. Demarkasi Ufuk Hakiki dan Ufuk Mar'i dalam Observasi Toposentris** Dalam diskursus ilmu falak kontemporer, penentuan waktu ibadah (khususnya yang terikat dengan terbit dan terbenamnya Matahari seperti Maghrib, Isya, Subuh, dan Syuruq) menuntut pemahaman presisi mengenai garis horizon atau ufuk. Al-Qur'an memerintahkan manusia untuk mengobservasi bentang alam sebagai medium refleksi atas kekuasaan Allah, termasuk mengamati batas pandang di permukaan Bumi:

وَالِى الْأَرْضِ كَيْفَ سُطِحَتْ

*Artinya: "Dan bumi bagaimana ia dihamparkan?"* (QS. Al-Ghashiyah [88]: 20).

Imam Fakhrudin Ar-Razi dalam *Mafatih al-Ghaib* memberikan catatan penting bahwa kata *sutihat* (dihamparkan) merujuk pada persepsi visual pengamat manusia (ufuk tampak), bukan menafikan wujud fisis Bumi yang bulat (*kurrah*). Hamparan pandangan ini dibatasi oleh garis pertemuan semu antara langit dan bumi, yang dalam terminologi astrometri dibedakan menjadi dua jenis ufuk:

1. **Ufuk Hakiki (*True Horizon / Astronomical Horizon*):** Sebuah bidang datar imajiner yang memotong bola langit dan tegak lurus dengan garis vertikal (garis Zenit-Nadir) pengamat. Bidang ini ditarik persis dari pusat titik mata pengamat ke arah sudut 90 derajat dari Zenit, mengabaikan kelengkungan Bumi.

2. **Ufuk Mar'i (*Visible Horizon / Apparent Horizon*):** Garis batas pandang fisis yang sesungguhnya terlihat oleh mata telanjang atau lensa teleskop. Karena permukaan Bumi melengkung ke bawah, ufuk mar'i selalu berada lebih rendah atau "turun" di bawah ufuk hakiki.

Selisih jarak sudut vertikal antara Ufuk Hakiki dan Ufuk Mar'i inilah yang secara keilmuan disebut sebagai **Kerendahan Ufuk (*Dip of Horizon / Inhitat al-Ufuq*)**.

**B. Formulasi Fisis dan Analisis Matematis *Dip of Horizon*** Secara mekanika optis dan geometri geodesi, besaran *Dip of Horizon* murni merupakan fungsi ekuivalen dari Elevasi (Ketinggian Tempat /  $h$ ) pengamat di atas permukaan laut rata-rata (*Mean Sea Level*). Semakin tinggi posisi seorang pengamat (misalnya berada di pos observasi pegunungan atau di lantai atas gedung pencakar langit), maka cakrawala fisis akan tampak semakin turun menjauhi ufuk hakiki.

Berdasarkan kaidah trigonometri pada lingkaran Bumi, dengan mengasumsikan radius Bumi rata-rata ( $R$ ) sekitar 6.371 kilometer, garis singgung (*tangent*) dari mata pengamat (pada ketinggian  $h$ ) ke permukaan Bumi membentuk sebuah segitiga siku-siku dengan pusat Bumi. Nilai sudut kerendahan ufuk (secara geometris murni) dapat diturunkan dari persamaan cosinus.

Namun, dalam observasi astronomi fisis, garis pandang (*line of sight*) dari mata pengamat menuju ufuk tidak berupa garis lurus sempurna. Atmosfer Bumi yang memiliki gradien densitas menyebabkan cahaya mengalami refraksi terestrial, melengkungkan garis pandang tersebut searah dengan kelengkungan Bumi (meskipun dengan radius kelengkungan yang lebih besar). Oleh karena itu, para ahli astrometri merumuskan persamaan empiris yang telah mengkompensasi efek refraksi terestrial standar.

Formula baku yang digunakan secara internasional untuk menghitung *Dip of Horizon* (dalam satuan menit busur) adalah:  $Dip = 1.76 * \text{akar kuadrat } (h)$  (*di mana  $h$  adalah ketinggian pengamat dari permukaan laut, dalam satuan meter*).

Sebagai contoh empiris, seorang muadzin di Masjid Istiqlal yang mengumandangkan adzan pada ketinggian 10 meter (Elevasi tanah + tinggi bangunan) akan memiliki nilai *Dip* sekitar 5,5 menit busur. Sedangkan seorang pengamat di Menara Abraj Al-Bait, Makkah (dengan ketinggian observasi sekitar 400 meter) akan memiliki nilai *Dip* yang ekstrem, yakni sekitar 35,2 menit busur (lebih dari setengah derajat).

Implikasi syar'i dan astronomis dari fenomena ini sangat masif: semakin tinggi tempat pengamat, Matahari akan terbit lebih awal (Syuruq dan Subuh lebih cepat) dan terbenam lebih lambat (Maghrib lebih lambat). Inilah landasan saintifik dari fatwa fikih kontemporer mengenai perbedaan jadwal berbuka puasa bagi penghuni apartemen pencakar langit (seperti kasus Burj Khalifa di Dubai), di mana penghuni lantai 150 ke atas wajib menunda waktu berbuka puasa

hingga 2-3 menit dibandingkan penghuni di lantai dasar, karena Matahari fisis secara *topocentric-apparent* belum menyentuh ufuk mar'i di ketinggian mereka.

**C. Konstruksi Segitiga Astronomi dan Sudut Waktu (*Hour Angle*)** Setelah parameter koreksi observasional (seperti Refraksi Atmosfer, Paralaks, Semi-Diameter, dan *Dip of Horizon*) ditetapkan, tinggi fisis Matahari pada setiap awal waktu ibadah (h) dapat dihitung. Langkah fundamental selanjutnya dalam kalkulasi jadwal waktu shalat adalah mengonversi Ketinggian Matahari (h) tersebut menjadi durasi waktu absolut. Jembatan matematis untuk konversi ini adalah parameter **Sudut Waktu (*Hour Angle* / *Fadl ad-Da'ir*, disimbolkan dengan huruf H).**

*Hour Angle* didefinisikan sebagai jarak sudut yang diukur di sepanjang Ekuator Langit, dari Meridian Lokal (titik kulminasi atas / garis tengah langit) ke arah barat, menuju lingkaran jam (*hour circle*) yang melewati posisi fisis Matahari saat itu. Karena Bumi berotasi 360 derajat dalam 24 jam, maka 1 jam waktu setara dengan pergerakan Sudut Waktu sebesar 15 derajat.

- Jika Matahari tepat di meridian lokal (waktu Dzuhur), maka  $H = 0$  derajat.
- Jika Matahari berada di ufuk timur (sebelum siang), H bernilai negatif (atau diukur dalam rentang 180-360 derajat).
- Jika Matahari berada di ufuk barat (setelah siang), H bernilai positif.

Untuk mencari nilai H, disiplin ilmu falak memproyeksikan sebuah Segitiga Bola (*Spherical Triangle*) di kubah langit yang disebut Segitiga Astronomi P-Z-S. Ketiga titik sudutnya adalah:

1. **P (Pole):** Kutub Utara Langit.
2. **Z (Zenith):** Titik tepat di atas kepala pengamat.
3. **S (Sun):** Posisi fisis Matahari.

Sisi-sisi segitiga bola tersebut merepresentasikan tiga parameter fisis utama:

- Sisi PZ (Colatitude): 90 derajat - Lintang Pengamat ( $\phi$ ).
- Sisi PS (Polar Distance): 90 derajat - Deklinasi Matahari ( $\delta$ ).
- Sisi ZS (Zenith Distance): 90 derajat - Ketinggian Matahari (h).

**D. Resolusi Hukum Cosinus dan Penentuan Waktu Ibadah** Dengan menerapkan Hukum Cosinus Sferis (*Spherical Law of Cosines*) pada Segitiga P-Z-S, di mana sudut di titik P adalah Sudut Waktu (H) yang kita cari, kita menderivasikan persamaan agung dalam ilmu falak komputasional:

$$\cos(ZS) = \cos(PZ) * \cos(PS) + \sin(PZ) * \sin(PS) * \cos(H)$$

Dengan mensubstitusikan nilai fisis dari sisi-sisi tersebut, persamaan disederhanakan menjadi rumus universal:  $\sin(h) = \sin(\phi) * \sin(\delta) + \cos(\phi) * \cos(\delta) * \cos(H)$

Dari persamaan di atas, algoritma komputasi akan memutar balik fungsi tersebut untuk mencari nilai absolut dari *Hour Angle* (H):  $\cos(H) = (\sin(h) - \sin(\phi)) * \sin(\delta) / (\cos(\phi) * \cos(\delta))$

Melalui nilai H (dalam derajat) inilah batas waktu absolut shalat fardhu diekstraksi ke dalam domain jam dan menit:

- Waktu fisis (jam) = Waktu Transit Meridian + (H / 15) untuk fenomena setelah Dzuhur (seperti Ashar, Maghrib, Isya).
- Waktu fisis (jam) = Waktu Transit Meridian - (H / 15) untuk fenomena sebelum Dzuhur (seperti Subuh, Syuruq, Dhuha).

Sistem matematis murni ini membuktikan secara tak terbantahkan bahwa hukum Islam (fikih waktu shalat) tidak bersifat arbitrer (sewenang-wenang), melainkan berlandaskan pada arsitektur mekanika benda langit yang sangat rasional, eksak, dan dapat dikuantifikasi melalui ilmu ukur ruang (geodesi-astrometri) tingkat lanjut.

#### 4.3. Analisis Matematis Penentuan Awal Waktu Shalat (Subuh, Dzuhur, Ashar, Maghrib, Isya)

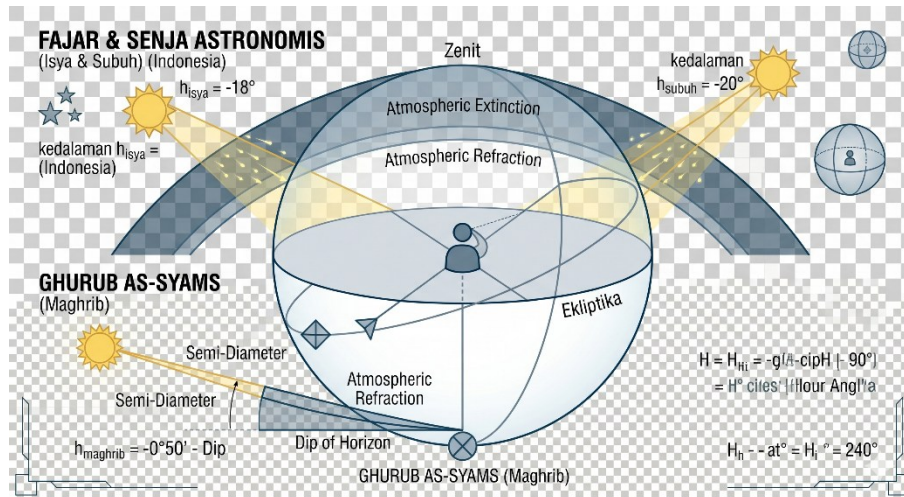
**A. Konstruksi Teologis dan Astronomis Waktu Shalat** Ibadah shalat fardhu dalam Islam bukan sekadar rutinitas spiritual, melainkan sebuah sistem sinkronisasi kosmik antara hamba dan arsitektur waktu yang diciptakan oleh Allah. Formulasi waktu shalat tidak ditentukan secara arbitrer melalui jam mekanik, tetapi bertumpu pada konfigurasi fisis spasial antara Matahari, Bumi, dan atmosfer.

Al-Qur'an mengisyaratkan secara komprehensif kelima waktu shalat ini dalam satu bingkai rotasi diurnal Bumi:

فَسُبْحَانَ اللَّهِ حِينَ تُمْسُونَ وَحِينَ تُصْبِحُونَ . وَلَهُ الْحَمْدُ فِي السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ وَعَشِيًّا وَحِينَ تُظْهِرُونَ

*Artinya: "Maka bertasbihlah kepada Allah di waktu kamu berada di petang hari (Maghrib dan Isya) dan waktu kamu berada di waktu subuh, dan bagi-Nyalah segala puji di langit dan di bumi dan di waktu kamu berada pada petang hari (Ashar) dan waktu kamu berada di waktu dzuhur." (QS. Ar-Rum [30]: 17-18).*

Untuk menerjemahkan isyarat teologis tersebut ke dalam presisi jam digital, ilmu falak merumuskan lima algoritma turunan yang berakar pada penyelesaian Sudut Waktu (H) dan koreksi *geocentric-apparent altitude* (ketinggian tampak geosentris). Penggunaan parameter fisis atmosfer sangat krusial di sini, sebab mengandalkan perhitungan geometris murni akan menyebabkan deviasi waktu yang dapat membatalkan keabsahan ibadah.



**Gambar 4.3 Skema Sudut Depresi Fajar/Senja**

Diagram alur data yang kompleks ini memvisualisasikan bagaimana parameter fisik atmosfer dan kedalaman Matahari di bawah ufuk ( $h = -18^\circ$  untuk Isya,  $h = -20^\circ$  untuk Subuh) dihitung, mengacu pada model bola langit PZS.

## B. Formulasi Waktu Dzuhur dan Ashar (Fase Pasca-Zawal)

1. **Waktu Dzuhur (Transit Meridian):** Secara fikih, Dzuhur dimulai ketika Matahari tergelincir (*Zawal*) ke arah barat dari titik kulminasi atasnya (meridian lokal). Secara matematis, pada momen kulminasi atas, Sudut Waktu (H) bernilai nol (0 derajat). Waktu Dzuhur fisis dihitung murni dari Waktu Transit Matahari yang telah dikoreksi dengan *Equation of Time* (EoT) dan bujur lokal: Waktu Dzuhur = 12:00 - EoT + (Bujur Zona Waktu - Bujur Pengamat) / 15. Untuk kehati-hatian (*ihiyat*), ulama falak modern menambahkan konstanta sebesar 1 hingga 2 menit agar Matahari dipastikan secara fisis telah keluar dari garis meridian (*zawalus syams*).
2. **Waktu Ashar (Ekspansi Bayangan):** Berbeda dengan waktu lainnya yang berbasis kedalaman Matahari di bawah ufuk, waktu Ashar didefinisikan melalui rasio panjang bayangan sebuah benda tegak lurus (*gnomon*). Menurut Jumhur Ulama (termasuk Syafi'i), Ashar masuk ketika panjang bayangan benda sama dengan tinggi benda tersebut ditambah panjang bayangan benda saat Dzuhur. Secara trigonometri, Ketinggian Matahari saat Dzuhur ( $h_{dzuhur}$ ) adalah:  $h_{dzuhur} = 90$  derajat - absolut(Lintang Pengamat - Deklinasi Matahari) Maka, Ketinggian Matahari saat masuk waktu Ashar ( $h_{ashar}$ ) dirumuskan melalui fungsi *Cotangent*:  $\cot(h_{ashar}) = 1 + \tan(\text{absolut}(\text{Lintang Pengamat} - \text{Deklinasi Matahari}))$  (*Catatan: Mahzab Hanafi menggunakan angka 2, bukan 1*). Setelah Ketinggian Ashar ( $h_{ashar}$ ) didapatkan, nilai ini dimasukkan ke dalam persamaan Sudut Waktu (H) yang telah dibahas pada Sub-bab 4.2 untuk menghasilkan durasi jam dan menit fisis masuknya Ashar.

**C. Formulasi Waktu Maghrib (Koreksi Ufuk Mar'i)** Maghrib didefinisikan sebagai terbenamnya seluruh piringan Matahari di bawah ufuk (*Ghurub as-Syams*). Di sinilah transisi dari koordinat geometris menuju *geocentric-apparent altitude* menjadi hukum mutlak.

Ketika mata pengamat melihat piringan atas Matahari tepat menyentuh ufuk barat (ufuk mar'i), secara geometris pusat piringan Matahari tersebut sudah berada di bawah horizon teoretis. Oleh karena itu, Ketinggian Matahari ( $h_{\text{maghrib}}$ ) bernilai negatif, yang dihitung dari akumulasi tiga parameter fisis:

1. **Semi-Diameter Matahari:** Jarak dari pusat piringan ke tepi atasnya (rata-rata 16 menit busur).
2. **Refraksi Atmosfer Horizontal:** Pembiasan cahaya maksimum di ufuk (standarnya 34 menit busur pada suhu dan tekanan udara nominal).
3. **Dip of Horizon (Kerendahan Ufuk):** Turunnya horizon akibat elevasi pengamat. Sehingga persamaannya:  $h_{\text{maghrib}} = - (16' + 34' + \text{Dip}) = -0 \text{ derajat } 50 \text{ menit} - \text{Dip}$ . Penurunan nilai Ketinggian Matahari akibat refraksi ini menunjukkan bahwa tanpa atmosfer, siang hari di Bumi akan lebih pendek dan Maghrib akan masuk lebih cepat sekitar 2 hingga 3 menit dari jadwal yang berlaku saat ini.

**D. Formulasi Waktu Isya dan Subuh (Parameter Kedalaman Senja dan Fajar)** Waktu Isya dan Subuh bertumpu pada fenomena hamburan cahaya Matahari oleh partikel gas dan debu di atmosfer bagian atas (Stratosfer dan Mesosfer), yang dikenal sebagai *Twilight* (Senja/Fajar).

1. **Waktu Isya (*Syafaq Ahmar/Abyadh*):** Isya dimulai ketika mega merah (atau putih, menurut Hanafi) di ufuk barat menghilang, menandakan kegelapan malam sempurna. Secara astrometri global, fenomena ini bertepatan dengan *Astronomical Twilight*, yaitu ketika pusat Matahari mencapai kedalaman -18 derajat di bawah ufuk. Maka,  $h_{\text{isya}} = -18$  derajat.
2. **Waktu Subuh (*Fajar Sadiq*):** Subuh dimulai dengan terbitnya Fajar Sadiq, yakni pendaran cahaya putih yang menyebar horizontal di ufuk timur. Parameter ketinggian Matahari untuk Subuh ( $h_{\text{subuh}}$ ) menjadi diskursus panjang dalam kalibrasi astrometri kontemporer. Kementerian Agama Republik Indonesia secara resmi menggunakan parameter -20 derajat, yang berakar pada observasi ulama Nusantara di masa lampau di bawah kondisi langit yang sangat gelap tanpa polusi cahaya.

Kalkulasi batas Syafaq dan Fajar Sadiq ini wajib menggunakan *geocentric-apparent altitude* yang mempertimbangkan tingkat kepunahan cahaya atmosferik (*atmospheric extinction*). Jika algoritma ephemeris (seperti DE441) hanya menggunakan koordinat geometris tanpa koreksi optik ini, perhitungan waktu Subuh di daerah lintang tinggi atau pada kondisi cuaca ekstrem akan menghasilkan anomali matematis, di mana batas fungsi cosinus melebihi nilai 1 (Matahari tidak pernah mencapai kedalaman -18 derajat di musim panas). Melalui parameter fisis kedalaman inilah

(*Solar Depression Angle*), perangkat lunak falak mengkalkulasi Sudut Waktu (H) untuk Isya dan Subuh secara presisi hingga hitungan detik.

#### 4.4. Parameter Syuruq, Dhuha, dan Penentuan Zona Waktu Terlarang Ibadah

**A. Formulasi Syuruq (Terbit Matahari) dan Koreksi Fisis Waktu *Syuruq*** (terbit Matahari) secara definisi astrometri merupakan kebalikan fisis dari waktu Maghrib. *Syuruq* adalah momentum ketika piringan atas Matahari (*upper limb*) mulai bersinggungan dan muncul dari bawah ufuk timur (ufuk mar'i) menuju ke atas cakrawala pandang pengamat. Karena definisi ini mengacu pada ufuk mar'i yang sesungguhnya terlihat oleh mata, maka parameter *geocentric-apparent altitude* kembali menjadi variabel mutlak.

Seperti halnya kalkulasi Maghrib, titik referensi komputasi bukanlah pusat piringan Matahari, melainkan tepi atasnya. Selain itu, cahaya Matahari yang melintasi atmosfer padat di ufuk timur mengalami pembiasan (refraksi) maksimum sebesar kurang lebih 34 menit busur. Oleh karena itu, ketika pengamat melihat piringan atas Matahari tepat menyentuh ufuk, secara matematis dan geometris (*True Geometric Altitude*) seluruh wujud Matahari sejatinya masih berada di bawah ufuk teoretis.

Persamaan parameter ketinggian Matahari untuk *Syuruq* ( $h_{\text{syuruq}}$ ) diformulasikan identik dengan Maghrib, namun diukur di bujur timur bola langit:  $h_{\text{syuruq}} = -(\text{Semi-Diameter} + \text{Refraksi Horizontal} + \text{Dip of Horizon})$   $h_{\text{syuruq}} = -(16 \text{ menit} + 34 \text{ menit} + \text{Dip}) = -0 \text{ derajat } 50 \text{ menit} - \text{Dip}$ .

Waktu masuknya *Syuruq* sekaligus menjadi penanda definitif berakhirnya waktu shalat Subuh secara syar'i. Resolusi komputasi untuk *Syuruq* harus mencapai ketelitian detik busur, mengingat implikasi batalnya ibadah fardhu jika seseorang mendirikan shalat Subuh saat piringan fisis Matahari telah melintasi ufuk optis.

**B. Resolusi Sudut Dhuha dan Transisi Ketinggian Semu** Waktu shalat sunnah Dhuha dimulai setelah Matahari naik setinggi satu tombak (*qida rumhin*) dalam pandangan mata telanjang di ufuk timur. Parameter "satu tombak" merupakan ukuran antropometrik-visual dari tradisi masyarakat Arab klasik yang kemudian ditranslasikan oleh para astronom Muslim ke dalam parameter derajat busur.

Mayoritas pakar hisab dan ulama Nusantara (seperti KH. Ahmad Dahlan dan Saadod'din Djambek) menetapkan konversi fisis bahwa satu tombak setara dengan ketinggian sudut antara 4,5 derajat hingga 5 derajat di atas ufuk hakiki. Dalam rentang waktu ini, pendaran cahaya Matahari telah menyilaukan dan warnanya telah berubah dari kemerahan menjadi putih kekuningan yang tajam, melepaskan diri dari pengaruh hamburan Rayleigh maksimum di lapisan ufuk bawah.

Secara algoritmis, untuk mencari waktu Dhuha, perangkat lunak falak memasukkan nilai  $h_{\text{dhuha}} = +4$  derajat 30 menit (atau  $+5$  derajat) ke dalam persamaan fungsi Sudut Waktu (H):  $\cos(H) = (\sin(h_{\text{dhuha}}) - \sin(\text{Lintang}) * \sin(\text{Deklinasi})) / (\cos(\text{Lintang}) * \cos(\text{Deklinasi}))$  Karena Dhuha terjadi sebelum Matahari melintasi meridian (sebelum Dzuhur), maka Sudut Waktu yang dihasilkan (dalam derajat) dikonversi menjadi jam dan dikurangkan dari waktu Transit Lokal. Secara empiris, rentang waktu antara *Syuruq* hingga masuknya waktu Dhuha berlangsung sekitar 15 hingga 20 menit, bergantung pada lintang geografis pengamat dan deklinasi harian Matahari.

**C. Penentuan Zona Waktu Terlarang Ibadah (*Tahrim as-Shalah*)** Syariat Islam dengan tegas melarang pelaksanaan shalat sunnah mutlak pada tiga fase spesifik pergerakan Matahari. Larangan ini didasarkan pada landasan normatif yang kuat, salah satunya adalah hadits dari 'Uqbah bin 'Amir radhiyallahu 'anhu:

ثَلَاثُ سَاعَاتٍ كَانَ رَسُولُ اللَّهِ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ يَنْهَانَا أَنْ نُصَلِّيَ فِيهِنَّ أَوْ أَنْ نَقْبِرَ فِيهِنَّ مَوْتَانَا: جِئِن تَطَلَّعَ الشَّمْسُ بَارِغَةً حَتَّى تَرْتَفِعَ، وَجِئِن يُقَوْمُ قَائِمِ الظُّهَيْرَةِ حَتَّى تَمِيلَ الشَّمْسُ، وَجِئِن تَضَيَّفَ الشَّمْسُ لِلْغُرُوبِ حَتَّى تَغْرُبَ

*Artinya: "Ada tiga waktu di mana Rasulullah shallallahu 'alaihi wasallam melarang kami untuk shalat atau menguburkan jenazah kami di dalamnya: (1) ketika matahari terbit dengan jelas hingga ia naik (meninggi), (2) ketika matahari berada tepat di tengah (berdiri tegak) hingga ia tergelincir, dan (3) ketika matahari condong untuk terbenam hingga ia benar-benar terbenam."* (HR. Muslim no. 831).

Dalam kerangka ilmu falak komputasional, ketiga waktu terlarang (*tahrim*) tersebut dapat dipetakan secara eksak menjadi tiga zona asimtotik atau singularitas waktu:

1. **Fase Emersi Ufuk Timur (*Tulu' as-Syams hingga Irtifa'*):** Dimulai sejak piringan atas Matahari menyentuh horizon ( $-0$  derajat 50 menit - Dip) hingga seluruh badan Matahari naik mencapai ketinggian  $+4,5$  derajat (masuk waktu Dhuha). Fase ini merepresentasikan turbulensi optis di ufuk.
2. **Fase Kulminasi Puncak (*Zawal / Qaim as-Dhahirah*):** Fase ini terjadi secara matematis persis ketika Sudut Waktu (H) = 0 derajat. Pada momen *True Transit* ini, Matahari berada pada titik Zenit (jika deklinasi sama dengan lintang pengamat) atau berada di ketinggian maksimum hariannya pada meridian lokal. Secara astronomis, durasi Matahari tepat berada di meridian sangatlah singkat (fraksi detik), namun bayang-bayang benda berada pada titik paling statis. Shalat dilarang hingga H bernilai positif (Matahari secara fisis bergeser ke barat sebesar beberapa menit busur).
3. **Fase Imersi Ufuk Barat (*Tadhayyafat lil-Ghurub*):** Fase ini dimulai ketika cahaya Matahari mulai memudar kekuningan sehingga mata tidak silau memandangnya, hingga ia terbenam sempurna. Secara matematis, astronom mengestimasi fase ini dimulai saat Matahari berada di ketinggian sekitar 1 hingga 2 derajat (positif) di atas horizon, dan berakhir tepat ketika Maghrib masuk ( $h = -0$  derajat 50 menit - Dip).

**D. Sinkronisasi Fikih Waktu Terlarang dan Makna Kosmologis** Pelarangan ibadah pada tiga waktu ini bukan didasarkan pada karakteristik intrinsik dari rentang waktu tersebut sebagai "waktu sial", melainkan sebagai demarkasi teologis (*saddudz dzari'ah*) untuk menghindari *tasyabbuh* (penyerupaan) dengan ritual para penyembah Matahari (*Helio-olatry*), yang bersujud pada momen-momen transit horizon dan kulminasi.

Nabi Muhammad SAW dalam riwayat lain mengisyaratkan bahwa pada saat terbit dan terbenam, Matahari berada "di antara dua tanduk setan". Analogi ini sangat menarik jika dikaji dari perspektif astrometri; titik terbit dan terbenam di ufuk adalah titik pergolakan refraksi yang sangat kuat. Lapisan ufuk merupakan distorsi optis, di mana apa yang terlihat oleh manusia bukanlah kedudukan fisis sebenarnya. Dengan menetapkan zona *tahrim*, syariat memisahkan penyembahan murni kepada Sang Khalik dari sinkretisme penyembahan terhadap ciptaan yang mengalami distorsi, serta menegaskan kembali bahwa presisi pergerakan langit adalah mekanisme untuk ketaatan, bukan objek pemuhanan.

#### DAFTAR PUSTAKA BAB 4

Azhari, S. (2007). *Ilmu Falak: Perjumpaan Khazanah Islam dan Sains Modern*. Yogyakarta: Suara Muhammadiyah.

Bucaille, M. (1976). *The Bible, The Qur'an and Science: The Holy Scriptures Examined in the Light of Modern Knowledge*. Paris: Seghers.

Djamaluddin, T. (2011). *Astronomi Memberi Solusi Penyatuan Ummat*. Jakarta: LAPAN.

Ilyas, M. (1984). *A Modern Guide to Astronomical Calculations of Islamic Calendar, Times & Qibla*. Kuala Lumpur: Berita Publishing.

King, D. A. (1993). *Astronomy in the Service of Islam*. Aldershot: Variorum.

Meeus, J. (1998). *Astronomical Algorithms* (2nd ed.). Richmond, VA: Willmann-Bell.

Ar-Razi, F. (1981). *Mafatih al-Ghaib (Tafsir Al-Kabir)*. Beirut: Dar al-Fikr.

Seidelmann, P. K. (Ed.). (1992). *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. Mill Valley, CA: University Science Books.

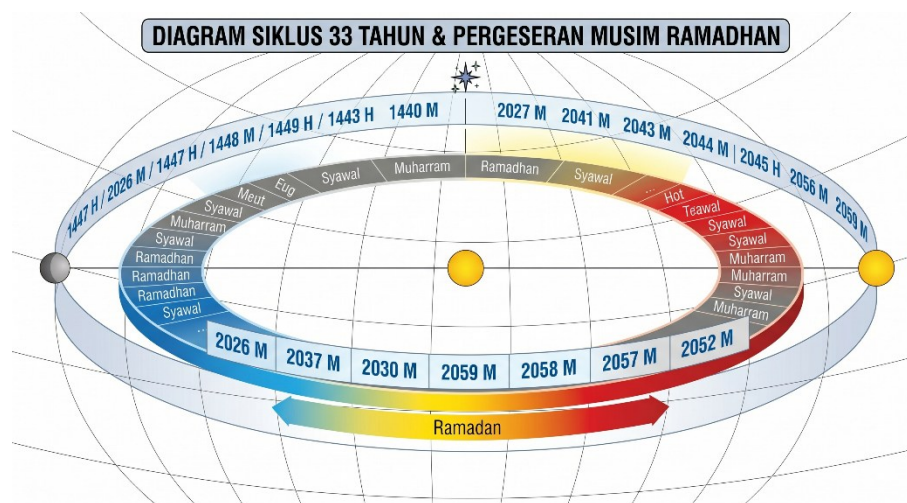
Smart, W. M. (1977). *Textbook on Spherical Astronomy* (6th ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Suryadi, B., & Purwanto, A. (2015). *Fisika dan Astronomi Islam*. Bandung: Rosdakarya.

## BAB 5: SISTEM KALENDER HIJRIAH, FASE BULAN, DAN VISIBILITAS HILAL

### 5.1. Sejarah, Anatomi, dan Rekonstruksi Sistem Kalender Hijriah

**A. Genealogi Historis dan Paradigma Tarikh Islam** Sebelum kedatangan Islam, masyarakat Arab pra-Islam di Semenanjung Arabia tidak memiliki sistem penanggalan yang terpusat dengan epos (titik nol) yang berkesinambungan. Mereka menggunakan penamaan tahun berdasarkan peristiwa-peristiwa insidental yang dianggap monumental secara sosiologis, seperti "Tahun Gajah" (*'Am al-Fiil*) yang merujuk pada invasi Abrahah, atau "Tahun Fijar" yang merujuk pada perang antar kabilah.



**Gambar 5.1 Diagram Pergeseran Musim 33 Tahun**

Bagan pendidikan ini menggunakan gradien warna musiman dan dua cincin waktu (Masehi dan Hijriah) untuk memvisualisasikan bagaimana bulan-bulan Islam (seperti Ramadhan) bergeser melewati seluruh musim dalam siklus 33 tahun penuh.

Transisi menuju sebuah sistem kalender yang terstruktur dan otonom baru terjadi pada masa kekhalifahan Umar bin Khattab radhiyallahu 'anhu, tepatnya pada tahun 17 Hijriah (sekitar 638 Masehi). Kebutuhan ini dipicu oleh kompleksitas administrasi kenegaraan yang kian meluas; dokumen-dokumen resmi pemerintahan, surat-menyurat, dan korespondensi perbendaharaan negara (Baitul Mal) sering kali menimbulkan kerancuan hukum karena hanya mencantumkan nama bulan tanpa identitas tahun numerik.

Melalui musyawarah dengan para sahabat senior—termasuk Ali bin Abi Thalib yang mengusulkan gagasan sentralnya—ditetapkanlah peristiwa *Hijrah* Nabi Muhammad SAW dari Makkah ke

Madinah sebagai *epoch* (Epos/Titik Nol) penanggalan Islam. Keputusan ini merupakan sebuah rekonstruksi paradigma yang brilian. Ali dan Umar tidak memilih tahun kelahiran Nabi (karena ada ikhtilaf historis), bukan pula tahun pewahyuan pertama (karena menandai fase awal penderitaan), dan bukan tahun wafatnya Nabi (yang merupakan memori duka). Hijrah dipilih karena peristiwa tersebut merepresentasikan transformasi fundamental (*furqan*) dari fase dakwah kultural yang tertindas menuju pembentukan peradaban sipil dan entitas politik yang berdaulat (Madinah).

**B. Anatomi Astronomis: Kalender Kamariah Murni (*Pure Lunar Calendar*)** Secara mekanika langit, sistem kalender di dunia terbagi menjadi tiga tipologi utama: Solar (Syamsiah, berbasis revolusi Bumi mengelilingi Matahari), Lunar (Kamariah, berbasis revolusi Bulan mengelilingi Bumi), dan Luni-Solar (gabungan keduanya melalui praktik interkalasi). Kalender Hijriah beroperasi secara mutlak sebagai *Pure Lunar Calendar*.

Anatomi kalender ini dikonstruksi secara langsung oleh ketetapan teologis. Allah SWT berfirman:

إِنَّ عِدَّةَ الشُّهُورِ عِنْدَ اللَّهِ اثْنَا عَشَرَ شَهْرًا فِي كِتَابِ اللَّهِ يَوْمَ خَلَقَ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ مِنْهَا أَرْبَعَةٌ حُرْمٌ ذَلِكَ الدِّينُ الْقَيِّمُ فَلَا تَظْلِمُوا فِيهِنَّ أَنْفُسَكُمْ

*Artinya: "Sesungguhnya bilangan bulan pada sisi Allah adalah dua belas bulan, dalam ketetapan Allah di waktu Dia menciptakan langit dan bumi, di antaranya empat bulan haram. Itulah (ketetapan) agama yang lurus, maka janganlah kamu menganiaya diri kamu dalam bulan yang empat itu." (QS. At-Tawbah [9]: 36)*

Secara astrometri, panjang satu bulan kamariah ditentukan oleh siklus sinodis (*synodic month / lunation*), yakni interval waktu antara dua fase konjungsi (Ijtima') yang berurutan. Karena orbit Bulan berbentuk elips dan dipengaruhi oleh perturbasi gravitasi Matahari, panjang siklus sinodis ini berfluktuasi dari bulan ke bulan, dengan nilai terpendek sekitar 29,26 hari dan terpanjang sekitar 29,80 hari.

Namun, secara rata-rata matematis (*mean synodic month*), satu siklus lunasi berlangsung selama 29 hari, 12 jam, 44 menit, dan 2,8 detik (atau 29,530589 hari). Karena satu hari komersial tidak dapat dipecah menjadi fraksi, jumlah hari dalam satu bulan Hijriah fisis dibulatkan menjadi 29 hari atau 30 hari. Akumulasi dari 12 bulan sinodis ini menghasilkan panjang satu tahun Hijriah sekitar 354,367 hari. Jika dikomparasikan dengan tahun tropis Matahari (sekitar 365,2422 hari), kalender Hijriah selalu lebih pendek sekitar 10,87 hari setiap tahunnya.

**C. Dekonstruksi Praktik *Nasi'* (Interkalasi) dan Konsekuensinya** Perbedaan sekitar 11 hari antara tahun Lunar dan Solar ini menyebabkan fenomena pergeseran musim. Bulan Ramadhan, misalnya, perlahan-lahan bergeser melewati seluruh musim (panas, gugur, dingin, semi) dalam siklus kurang lebih 33 tahun.

Pada masa pra-Islam, fenomena pergeseran musim ini mengganggu siklus perniagaan (seperti pasar Ukaz) dan kalender agrikultur bangsa Arab. Untuk memaksa kalender lunar agar sejajar dengan musim matahari, mereka mempraktikkan *Nasi'* (interkalasi/penyisipan bulan ke-13 setiap beberapa tahun sekali). Praktik Luni-Solar ini secara tegas diharamkan oleh Al-Qur'an karena sering disalahgunakan oleh elit kabilah Makkah untuk memanipulasi kesucian "Bulan-bulan Haram" (Dzulqad'dah, Dzulhijjah, Muharram, dan Rajab) demi kepentingan peperangan politik.

أَفَمَا النَّسِيءُ زِيَادَةٌ فِي الْكُفْرِ يُضَلُّ بِهِ الَّذِينَ كَفَرُوا يُحْلُونَهُ عَامًا وَيُحَرِّمُونَهُ عَامًا لِيُوَاطِّئُوا عِدَّةَ مَا حَرَّمَ اللَّهُ فَيُجْلُوا مَا حَرَّمَ اللَّهُ  
زُيِّنَ لَهُمْ سُوءُ أَعْمَالِهِمْ وَاللَّهُ لَا يَهْدِي الْقَوْمَ الْكَافِرِينَ

*Artinya: "Sesungguhnya mengundur-undur bulan haram itu adalah menambah kekafiran. Disesatkan orang-orang yang kafir dengan mengundur-undur itu, mereka menghalalkannya pada suatu tahun dan mengharamkannya pada tahun yang lain, agar mereka dapat menyesuaikan dengan bilangan yang Allah haramkan, maka mereka menghalalkan apa yang diharamkan Allah. (Syaitan) menjadikan mereka memandang baik perbuatan mereka yang buruk itu. Dan Allah tidak memberi petunjuk kepada orang-orang yang kafir." (QS. At-Tawbah [9]: 37)*

Penghapusan *Nasi'* ini melepaskan kalender Islam dari determinisme geografis dan siklus musim. Ini adalah intervensi teologis yang memastikan bahwa umat Islam di seluruh belahan dunia (baik di ekuator maupun di lintang ekstrem utara/selatan) akan merasakan keadilan iklim; mereka akan mengalami puasa Ramadhan baik pada musim panas yang panjang maupun musim dingin yang pendek secara bergantian seiring berjalannya siklus 33 tahun.

**D. Diskursus Kalender Islam Global dan Protokol Temporal** Memasuki era modern, fragmentasi penetapan awal bulan antar-negara Muslim menjadi problematika sosiologis yang mendesak. Sering kali, hari raya Idul Fitri dan Idul Adha jatuh pada hari yang berbeda di berbagai belahan dunia, meskipun umat Islam menyembah Tuhan yang sama, mengarah ke kiblat yang sama, dan membaca kitab suci yang sama.

Untuk mengurai benang kusut ini, diskursus "Kalender Islam Global" (*Global Islamic Calendar*) mengemuka dalam berbagai muktamar internasional (seperti Deklarasi Istanbul 2016). Konsep kalender global tidak dapat sekadar dibangun di atas persetujuan politik; ia mutlak memerlukan arsitektur astrometri yang rigid berupa "Protokol Kalender Global" (*Global Calendar Protocol*).

Protokol ini mengharuskan perumusan kondisi geografis dan temporal yang spesifik untuk inisiasi pergantian hari. Kalender unifikasi tidak bisa semata-mata mengacu pada kemunculan hilal di satu titik tanpa batasan transferabilitas. Secara komputasional, model penanggalan yang kokoh harus memperhitungkan parameter Garis Tanggal Internasional (*International Date Line*) sebagai pembatas fisis transisi rotasi bumi, serta menetapkan kriteria elongasi dan *geocentric-apparent altitude* pada bujur koordinat referensi universal. Hanya dengan memenuhi prasyarat geografis dan waktu terpadu inilah, umat Islam global dapat memulai tanggal 1 secara serentak tanpa menabrak

logika perputaran siklus siang-malam harian (*yukawwirul layla 'alan nahar*) yang telah ditetapkan secara kosmik.

## 5.2. Mekanika Orbit Bulan: Konjungsi (Ijtima') dan Kalkulasi Siklus Sinodis

**A. Anatomi Orbit Lunar dan Hukum Relativitas Kosmik** Memahami sistem penanggalan Hijriah secara saintifik mustahil dilakukan tanpa membedah mekanika orbit Bulan secara mendalam. Dalam sistem Bumi-Bulan (*Earth-Moon system*), Bulan tidak mengelilingi Bumi dalam lintasan lingkaran yang sempurna. Sesuai dengan Hukum Kepler Pertama, lintasan orbit Bulan berbentuk elips, dengan Bumi berada pada salah satu titik fokusnya. Akibat eksentrisitas orbit ini (dengan nilai rata-rata sekitar 0,0549), jarak antara Bumi dan Bulan terus berfluktuasi.

Titik terdekat Bulan dengan Bumi disebut *Perigee* (jarak fisis sekitar 362.600 km), sedangkan titik terjauhnya disebut *Apogee* (sekitar 405.400 km). Perubahan jarak ini berdampak langsung pada variasi kecepatan sudut Bulan di langit dan ukuran diameter sudutnya (*apparent angular diameter*) saat diamati dari Bumi.

Selain bentuknya yang elips, bidang orbit Bulan tidak sejajar dengan bidang Ekliptika (bidang orbit Bumi mengelilingi Matahari). Orbit Bulan memiliki kemiringan atau inklinasi rata-rata sebesar 5,14 derajat terhadap ekliptika. Perpotongan antara bidang orbit Bulan dan Ekliptika menghasilkan dua titik simpul (*nodes*): *Ascending Node* (Uqdah as-Su'ud) saat Bulan bergerak dari selatan ke utara ekliptika, dan *Descending Node* (Uqdah al-Nuzul) saat Bulan bergerak sebaliknya. Konstruksi ruang tiga dimensi inilah yang menyebabkan gerhana (Matahari maupun Bulan) tidak terjadi setiap bulan, melainkan hanya ketika Bulan berada sangat dekat dengan titik simpul tersebut pada saat fase baru atau purnama.

**B. Dinamika Ijtima' (Konjungsi Geosentris) sebagai Garis Demarkasi** Dalam astrometri Islam, parameter mutlak yang menandai berakhirnya satu bulan kamariah dan transisi menuju bulan berikutnya adalah fenomena **Ijtima'** (Konjungsi / *Syzygy*). Secara astronomis, Ijtima' didefinisikan sebagai momen eksak ketika Bujur Ekliptika Bulan (*Ecliptic Longitude of the Moon*) sama persis dengan Bujur Ekliptika Matahari (*Ecliptic Longitude of the Sun*) diukur dari pusat Bumi (Geosentris).

Pada detik Ijtima' tersebut, posisi Matahari, Bulan, dan Bumi secara geometris berada pada satu bidang bujur bujur ekliptika yang sama. Implikasi fisisnya adalah:

1. Seluruh permukaan Bulan yang menghadap Bumi tidak mendapatkan pantaulan cahaya Matahari (menghadap *dark side*), sehingga Bulan berada dalam fase Bulan Mati (*New Moon* / Muhak).

2. Ijtima' merupakan peristiwa astrometri universal yang terjadi pada satu detik absolut yang sama bagi seluruh pengamat di alam semesta, tidak terikat oleh zona waktu lokal di permukaan Bumi.

Al-Qur'an merekam fase-fase orbit Bulan ini secara presisi melalui konsep *manzilah* (stasiun/fase orbit):

وَالْقَمَرَ قَدَرْنَا مَنَازِلَ حَتَّىٰ عَادَ كَالْعُرْجُونِ الْقَدِيمِ

*Artinya: "Dan telah Kami tetapkan bagi bulan manzilah-manzilah, sehingga (setelah dia sampai ke manzilah yang terakhir) kembalilah dia sebagai bentuk tandan yang tua." (QS. Yasin [36]: 39).*

Kata '*urjunil qadim* (tandan yang tua, melengkung, dan tipis) merepresentasikan fase hilal akhir bulan, tepat sebelum Bulan memasuki fase Ijtima' di mana ia lenyap dari pandangan (*invisible*) sebelum akhirnya lahir kembali sebagai hilal awal bulan pasca-konjungsi.

**C. Dikotomi Siklus Sideris dan Sinodis** Satu kerancuan epistemologis yang sering terjadi dalam pemahaman awam adalah definisi "satu bulan" (satu kali putaran penuh). Dalam fisika benda langit, terdapat dua jenis periode revolusi Bulan yang berbeda secara fundamental:

1. **Bulan Sideris (*Sidereal Month*):** Waktu yang dibutuhkan Bulan untuk melakukan satu putaran penuh 360 derajat mengelilingi Bumi relatif terhadap latar belakang bintang-bintang statis di luar tata surya. Durasi rata-rata satu siklus sideris adalah sekitar **27 hari, 7 jam, 43 menit, dan 11,5 detik (27,32166 hari)**.
2. **Bulan Sinodis (*Synodic Month / Lunation*):** Waktu yang dibutuhkan Bulan untuk kembali ke fase yang sama persis relatif terhadap Matahari, misalnya dari satu Ijtima' ke Ijtima' berikutnya. Durasi rata-rata siklus ini adalah **29 hari, 12 jam, 44 menit, dan 2,8 detik (29,53059 hari)**.

Mengapa Bulan Sinodis lebih panjang sekitar 2,2 hari dibandingkan Bulan Sideris? Jawabannya terletak pada dinamika translasi Bumi. Selama Bulan menyelesaikan satu putaran 360 derajat mengelilingi Bumi (27,3 hari), Bumi sendiri telah bergerak maju mengelilingi Matahari sejauh kurang lebih 27 derajat di lintasan ekliptikanya. Oleh karena itu, setelah Bulan menyelesaikan putaran siderisnya, ia harus menempuh jarak sudut tambahan (mengejar sekitar 27 derajat lagi yang memakan waktu sekitar 2,2 hari) agar sejajar kembali dengan Matahari dan mencapai fase Ijtima'. Sistem kalender Hijriah secara absolut didasarkan pada siklus Sinodis ini, bukan Sideris.

**D. Perturbasi Gravitasi dan Kompleksitas Algoritma Lunasi** Durasi rata-rata Bulan Sinodis (29,53 hari) hanyalah sebuah konstanta matematis. Dalam realitas fisis, waktu antara satu Ijtima' ke Ijtima' berikutnya (satu Lunasi) sangat berfluktuasi, berkisar antara 29,26 hari hingga 29,80 hari.

Fluktuasi yang asimetris ini diakibatkan oleh **Perturbasi Gravitasi** (gangguan gaya tarik). Karena Bumi dan Bulan tidak terisolasi, gravitasi masif dari Matahari terus-menerus "menggangu" orbit Bulan. Dalam mekanika komputasi (seperti algoritma Jean Meeus atau data integrasi numerik NASA JPL DE441), untuk menghitung bujur ekliptika Bulan secara presisi demi memprediksi Ijtima', astronom harus memasukkan ribuan deret periodik. Tiga perturbasi lunar terbesar yang memengaruhi kalkulasi ini adalah:

1. **Evection (Eveksi)**: Anomali terbesar yang diakibatkan oleh interaksi gravitasi Matahari terhadap eksentrisitas orbit Bulan. Efek ini dapat menggeser posisi bujur Bulan hingga 1 derajat 16 menit.
2. **Variation (Variasi)**: Percepatan gerak Bulan saat bergerak dari fase Ijtima' menuju Kuartir, dan perlambatan saat bergerak dari Kuartir menuju Purnama. Amplitudo pergeserannya mencapai 39 menit busur.
3. **Annual Equation (Persamaan Tahunan)**: Perubahan periode orbit Bulan yang bergantung pada jarak Bumi ke Matahari. Saat Bumi berada di Perihelion (Januari), tarikan gravitasi Matahari lebih kuat sehingga "memperlebar" orbit Bulan dan memperlambat lajunya.

Akumulasi dari kompleksitas mekanika orbital inilah yang membuat metode *Hisab Taqribi* (yang mengabaikan perturbasi) menjadi usang dan tidak valid. Penentuan saat Ijtima' untuk standardisasi awal bulan secara syar'i menuntut eksekusi hisab *tahqiqi* modern yang memecahkan matriks diferensial pergerakan benda langit dengan presisi hingga level sub-detik.

### 5.3. Macam-Macam Kriteria Penetapan Awal Bulan: Urfi, Hakiki, Imkanur Rukyat, dan MABIMS Baru

**A. Epistemologi Kriteria: Menjembatani Dalil Syar'i dan Realitas Kosmis** Konjungsi (Ijtima') merupakan sebuah keniscayaan fisis yang menandai akhir siklus revolusi Bulan secara astronomis. Namun, dalam hukum fikih Islam, terjadinya Ijtima' saja tidak serta-merta mengawali bulan baru. Pergantian hari dalam kalender Hijriah dimulai pada saat terbenamnya Matahari (Maghrib). Oleh karena itu, diperlukan sebuah rumusan komprehensif yang menjembatani momentum fisis Ijtima' dengan visibilitas Bulan di ufuk barat saat fajar senja (*twilight*). Rumusan inilah yang melahirkan berbagai kriteria penetapan awal bulan, yang merefleksikan dinamika ijtihad ulama dan saintis dalam membaca teks-teks suci (nas) dan realitas kosmis.

Secara makro, metodologi ini terbagi menjadi aliran Hisab (kalkulasi matematis) dan Rukyat (observasi empiris). Namun, dalam diskursus akademik kontemporer, dikotomi ini telah tereduksi karena Rukyat modern mutlak membutuhkan panduan Hisab, dan Hisab modern berorientasi untuk memprediksi Rukyat. Perbedaan yang tersisa saat ini terletak pada ambang batas (limitasi) parameter apa yang digunakan untuk menyatakan bahwa "bulan baru telah masuk".

**B. Kriteria Hisab Urfi (Aritmatik/Periodik)** Kriteria *Urfi* adalah sistem penanggalan yang tidak didasarkan pada pergerakan fisis Bulan di langit, melainkan pada siklus matematis rata-rata (*mean lunation*). Sistem ini menetapkan panjang bulan ganjil (Muharram, Rabiul Awal, dll.) adalah 30 hari, sedangkan bulan genap (Safar, Rabiul Akhir, dll.) adalah 29 hari, dengan penambahan satu hari (kabisat) pada bulan Dzulhijjah dalam siklus 30 tahun (di mana terdapat 11 tahun kabisat dan 19 tahun basithah).

Kalender ini (seperti kalender Fatimiyah atau kalender sipil Kerajaan Arab Saudi di masa lampau yang dikenal dengan kalender Umm al-Qura fase awal) sangat stabil dan prediktif. Algoritma ini sangat ideal untuk administrasi sipil, penanggalan dokumen, dan sistem informasi manajemen. Namun, kriteria ini disepakati oleh seluruh ulama falak untuk **tidak boleh digunakan** dalam menetapkan ibadah (*mahdhah*) seperti awal Ramadhan, Idul Fitri, dan Idul Adha, karena ia mengabaikan fluktuasi eksentrisitas orbit Bulan dan kaidah *ru'yatul hilal* yang diperintahkan secara syar'i.

**C. Kriteria Wujudul Hilal (Hisab Hakiki)** Kriteria *Wujudul Hilal* (terbentuknya hilal) adalah kriteria hisab murni yang mensyaratkan tiga kondisi akumulatif untuk menetapkan awal bulan baru:

1. Telah terjadi Ijtima' (Konjungsi Geosentris).
2. Ijtima' terjadi sebelum terbenamnya Matahari (Ijtima' Qablal Ghurub).
3. Pada saat Matahari terbenam, Bulan masih berada di atas ufuk (Bulan terbenam setelah Matahari).

Kriteria ini menggunakan parameter Ketinggian Bulan lebih besar dari 0 derajat ( $h > 0$ ) pada saat Maghrib. Kriteria ini bersandar pada logika geometris: asalkan Bulan secara posisi berada di atas horizon pengamat, maka secara wujud fisik hilal itu "ada", meskipun mustahil dilihat oleh mata manusia akibat kalah oleh intensitas hamburan cahaya Matahari (*glare*).

Dalam perkembangannya, para ahli hisab menyadari bahwa penggunaan parameter koordinat geometris geosentris murni (*pure geocenter geometric coordinates*) pada kriteria ini menghasilkan bias yang signifikan. Ketinggian Bulan ( $h$ ) harus dikalkulasi menggunakan *geocentric-apparent altitude*. Ketinggian geometris murni Bulan yang bernilai +0.5 derajat, misalnya, jika direduksi oleh nilai Paralaks Bulan (sekitar -57 menit busur) dan ditambah Refraksi Atmosfer lokal, sering kali menghasilkan posisi fisis fiktif di mana hilal sebenarnya telah terbenam (nilai *apparent* negatif) sebelum Maghrib.

**D. Kriteria Imkanur Rukyat dan MABIMS Baru (Visibilitas Fisis-Optis)** *Imkanur Rukyat* (probabilitas visibilitas) adalah kriteria yang mensintesiskan hisab dan rukyat. Kriteria ini berpostulat bahwa meskipun hilal secara wujud geometris berada di atas ufuk ( $h > 0$ ), ia belum tentu dapat dirukyat (dilihat). Terdapat limitasi fisiologis mata manusia (maupun sensor kamera)

serta limitasi optis atmosfer (seperti *Limit Danjon* yang menyatakan bahwa sabit bulan tidak akan terbentuk jika elongasi kurang dari 7 derajat).

Di kawasan Asia Tenggara, kriteria ini diinstitutionalkan melalui kesepakatan Menteri Agama Brunei Darussalam, Indonesia, Malaysia, dan Singapura (MABIMS).

1. **Kriteria MABIMS Lama (1990-2021):** Menetapkan bahwa hilal mungkin dirukyat jika Tinggi Hilal minimal 2 derajat, **atau** Elongasi (jarak sudut Matahari-Bulan) minimal 3 derajat, **atau** Umur Hilal (sejak Ijtima' ke Maghrib) minimal 8 jam.
2. **Kriteria MABIMS Baru (2021-sekarang):** Berdasarkan evaluasi atas ribuan data observasi hilal global beresolusi tinggi, kriteria lama dinilai terlalu rendah secara astrofisika dan mustahil dibuktikan secara empiris. MABIMS kemudian merombak parameternya menjadi syarat kumulatif (harus terpenuhi keduanya):
  - **Tinggi Hilal (Apparent) minimal 3 derajat.**
  - **Elongasi (Geosentris) minimal 6,4 derajat.**

Penerapan Kriteria MABIMS Baru menuntut ketelitian tinggi dari algoritma *software* falak. Ketinggian yang dimaksud wajib berupa *Topocentric Apparent Altitude*, yang telah memasukkan koreksi kerendahan ufuk (*Dip of Horizon*) dan model atmosferik lokal. Jika perhitungan tidak memperhitungkan pergeseran ini secara rigid, klaim atas imkanur rukyat dapat terjebak pada *pseudoscience*.

**E. Evolusi Menuju Kalender Hijriah Global Tunggal (KHGT)** Dalam fase terkini ("Falak 5.0"), perdebatan lokalitas rukyat (*mathla'*) perlahan mulai bertransformasi menuju wacana unifikasi kalender internasional. Model Kalender Hijriah Global Tunggal (KHGT) disusun dengan mengadopsi prinsip bahwa jika hilal telah memenuhi kriteria visibilitas (seperti visibilitas mata telanjang/optik di mana pun di permukaan Bumi) dan memenuhi *Global Calendar Protocol*, maka keesokan harinya adalah tanggal 1 bagi seluruh dunia.

Dalam implementasi *backend* perangkat lunaknya—misalnya pada perancangan *software* pemetaan dan konversi tanggal Hijriah komprehensif—protokol global ini tidak bisa berjalan dengan logika linier yang sederhana. Mesin kalkulasi wajib memprioritaskan efemeris integrasi numerik, seperti penyesuaian logika *ephemeris switching* untuk secara eksklusif mengekstraksi data satelit DE441 pada rentang epos 0 hingga 3000 Masehi, guna meminimalisasi galat delta T dalam memprediksi momen Ijtima' universal. Selain itu, penetapan *transferability* (keberlakuan rukyat dari barat ke timur) wajib mematuhi parameter geografis dan temporal yang spesifik, utamanya terkait persilangan zona siang-malam yang bersinggungan dengan Garis Tanggal Internasional (*International Date Line*). Jika konjungsi atau limit visibilitas memotong IDL secara asimetris, perangkat lunak harus memiliki arsitektur percabangan logika (*logic branching*) untuk mencegah terjadinya hari ganda dalam satu titik koordinat. Metodologi *deep-dive* ini memastikan

kalender Islam tidak hanya tegak secara dogma fikih, tetapi kokoh tak terbantahkan di ranah astrofisika internasional.

#### 5.4. Dinamika Sidang Isbat: Fikih, Kepastian Hukum, dan Sinkronisasi Sosial

**A. Landasan Yuridis dan Otoritas Penetapan (Isbat)** Sidang Isbat merupakan instrumen kenegaraan yang bertindak sebagai titik kulminasi dari dialektika antara observasi empiris (rukyat), kalkulasi matematis (hisab), dan otoritas hukum fikih. Secara etimologis, kata *isbat* bermakna penetapan, pengukuhan, atau pembenaran atas suatu fenomena fisis, dalam hal ini adalah terbitnya hilal yang menandai awal bulan kamariah.

Keberadaan otoritas terpusat dalam menetapkan waktu ibadah komunal berakar pada perintah Al-Qur'an untuk mentaati pemimpin hukum (*ulil amri*) demi menjaga kohesi sosial umat:

يَا أَيُّهَا الَّذِينَ آمَنُوا أَطِيعُوا اللَّهَ وَأَطِيعُوا الرَّسُولَ وَأُولِي الْأَمْرِ مِنْكُمْ فَإِن تَنَازَعْتُمْ فِي شَيْءٍ فَرُدُّوهُ إِلَى اللَّهِ وَالرَّسُولِ إِن كُنتُمْ تُؤْمِنُونَ بِاللَّهِ وَالْيَوْمِ الْآخِرِ ۚ ذَلِكَ خَيْرٌ وَأَحْسَنُ تَأْوِيلًا

*Artinya: "Hai orang-orang yang beriman, taatilah Allah dan taatilah Rasul (Nya), dan ulil amri di antara kamu. Kemudian jika kamu berlainan pendapat tentang sesuatu, maka kembalikanlah ia kepada Allah (Al Quran) dan Rasul (sunnahnya), jika kamu benar-benar beriman kepada Allah dan hari kemudian. Yang demikian itu lebih utama (bagimu) dan lebih baik akibatnya." (QS. An-Nisa [4]: 59).*

Dalam yurisprudensi Islam, perbedaan kriteria hisab dan metode observasi di lapangan merupakan ranah ijtihad akademik yang sah (khilafiyah). Namun, ketika perbedaan ijtihad tersebut berpotensi menimbulkan perpecahan sosiologis dalam pelaksanaan ibadah massal (seperti puasa Ramadhan dan Idul Fitri), maka intervensi negara melalui keputusan hakim (Menteri Agama) menjadi mutlak. Hal ini direpresentasikan oleh kaidah fikih fundamental:

حُكْمُ الْحَاكِمِ يَرْفَعُ الْخِلَافَ

*Artinya: "Keputusan pemerintah (hakim) menghilangkan perbedaan pendapat."*

Kaidah ini menegaskan bahwa keputusan Sidang Isbat tidak bermaksud untuk menghakimi kebenaran saintifik suatu aliran hisab tertentu, melainkan memproduksi kepastian hukum (*legal certainty*) yang mengikat seluruh warga negara demi kemaslahatan publik.

**B. Anatomi dan Protokol Sidang Isbat Kontemporer** Di negara-negara Muslim modern seperti Indonesia, Sidang Isbat bukan lagi sekadar majelis fatwa tradisional, melainkan sebuah forum interdisipliner yang melibatkan pakar astronomi, lembaga antariksa, klimatologi, organisasi masyarakat Islam, dan ahli hukum tata negara. Protokol sidang umumnya terbagi menjadi tiga fase operasional yang ketat:

1. **Pemaparan Posisi Hilal (Fase Epistemologis):** Sesi ini diisi oleh presentasi data hisab *tahqiqi* ephemeris. Parameter astrometri—seperti waktu Ijtima', *geocentric-apparent altitude* (ketinggian tampak hilal), elongasi, umur hilal, dan iluminasi—diproyeksikan untuk seluruh wilayah kedaulatan negara. Fase ini berfungsi sebagai kalibrasi teoretis untuk menilai apakah laporan rukyat dari lapangan nantinya bersifat rasional (mungkin) atau irasional (mustahil).
2. **Laporan Rukyatul Hilal (Fase Empiris):** Penerimaan data fisis dari puluhan hingga ratusan titik observasi yang tersebar dari ufuk timur hingga barat. Observasi ini tidak lagi murni mengandalkan mata telanjang, melainkan diotentikasi menggunakan teodolit, teleskop *go-to* berpelacak otomatis, dan teknik *image processing* kontras tinggi. Jika terdapat laporan kesaksian hilal, pemberi kesaksian wajib disumpah secara hukum di bawah panduan hakim Pengadilan Agama.
3. **Muzakarah dan Penetapan (Fase Yudisial):** Mengkomparasikan laporan lapangan (Rukyat) dengan Kriteria Visibilitas (misalnya MABIMS Baru). Jika laporan rukyat selaras dengan kriteria hisab, maka bulan baru ditetapkan masuk. Jika tidak ada rukyat yang berhasil (akibat cuaca atau parameter belum terpenuhi), maka bulan berjalan dikenakan menjadi 30 hari (Istikmal), sesuai sabda Nabi *fa in ghumma 'alaikum fa akmilu 'iddata Sya'bana tsalatsin*.

**C. Problematika Sinkronisasi Sosial dan Epistemologi Multi-Kriteria** Meskipun Sidang Isbat bertujuan untuk menyatukan umat, realitas sosiologis di beberapa wilayah masih diwarnai oleh dualisme hari raya. Fragmentasi ini tidak bersumber dari ketidakakuratan instrumen, melainkan murni dari benturan epistemologi kriteria yang belum mencapai konsensus.

Akar disparitas utamanya terletak pada divergensi antara penganut "Wujudul Hilal" (yang mencukupkan diri pada parameter tinggi hilal  $> 0$  derajat, terlepas dari visibilitas optisnya) dan penganut "Imkanur Rukyat" (yang mensyaratkan tinggi dan elongasi minimum agar fisis hilal memiliki probabilitas untuk diabadikan/dirukyat). Benturan semakin tajam akibat penafsiran konsep *Mathla'* (Batas Wilayah Keberlakuan Rukyat). Sebagian pakar memegang *Mathla' Wilayatul Hukmi* (rukkyat di satu titik berlaku untuk seluruh wilayah hukum suatu negara), sementara diskursus global menuntut *Mathla' 'Aam* (rukkyat di belahan bumi mana pun berlaku untuk seluruh dunia).

**D. Resolusi Menuju Sistem Penanggalan Terpadu** Merespons fragmentasi sosial dan disparitas hukum di atas, arsitektur sains astrometri telah berevolusi dari sekadar penyedia data posisi menjadi konseptor Kalender Hijriah Global Tunggal (KHGT). Implementasi kalender yang otonom dan berlaku universal ini menuntut tulang punggung teknologi berupa *software suite* berpresisi tinggi yang mengintegrasikan parameter-parameter ruang dan waktu berskala global.

Dalam praktiknya, stabilitas kalender ini dibangun di atas mesin kalkulasi yang wajib memprioritaskan data satelit tingkat lanjut. Penggunaan *ephemeris switching logic* sangat esensial

untuk secara otomatis memanggil *dataset* NASA DE441 pada epos waktu komputasi yang ditentukan, guna mengeliminasi akumulasi ralat waktu dinamis (Delta T). Lebih jauh, algoritma penanggalan terpadu ini harus mendefinisikan batas inisiasi hari melalui integrasi parameter Garis Tanggal Internasional (*International Date Line*). Validasi visibilitas hilal sebagai syarat pergantian bulan juga wajib diukur dengan memindai koordinat spasial menggunakan koreksi *geocentric-apparent altitude*.

Melalui sinkronisasi antara algoritma pemrosesan ephemeris tingkat lanjut dengan resolusi fikih global, penyatuan kalender Islam secara komputasional dapat terwujud. Kepastian hukum ini tidak hanya meniadakan friksi sosiologis setiap menjelang Ramadhan dan Syawal, tetapi juga memproyeksikan Islam sebagai peradaban yang tegak di atas harmoni presisi saintifik dan kepatuhan syar'i.

#### DAFTAR PUSTAKA BAB 5

Azhari, S. (2007). *Ilmu Falak: Perjumpaan Khazanah Islam dan Sains Modern*. Yogyakarta: Suara Muhammadiyah.

Djamaluddin, T. (2011). *Astronomi Memberi Solusi Penyatuan Ummat*. Jakarta: Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN).

Ilyas, M. (1984). *A Modern Guide to Astronomical Calculations of Islamic Calendar, Times & Qibla*. Kuala Lumpur: Berita Publishing.

Ilyas, M. (1997). *Astronomy of Islamic Times for the Twenty-first Century*. London: Mansell Publishing.

Meeus, J. (1998). *Astronomical Algorithms* (2nd ed.). Richmond, VA: Willmann-Bell.

Odeh, M. S. (2004). *New Criterion for Lunar Crescent Visibility*. *Experimental Astronomy*, 18(1), 39-64.

Seidelmann, P. K. (Ed.). (1992). *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. Mill Valley, CA: University Science Books.

Suryadi, B., & Purwanto, A. (2015). *Fisika dan Astronomi Islam*. Bandung: Rosdakarya.

Yudhi, A., & Saksono, T. (2007). *Mengkompromikan Rukyat dan Hisab*. Jakarta: Amythas Publicita.

## BAB 6: INSTRUMENTASI, PEMROSESAN CITRA, DAN PEMROGRAMAN FALAK (FALAK TECH)

### 6.1. Persiapan Rukyat: Pengenalan dan Kalibrasi Optik Teleskop

**A. Epistemologi Observasi Visual dan Ekstensi Optis Manusia** Dalam tradisi ilmu falak, observasi (rukayat) bukanlah sekadar aktivitas melihat dengan mata telanjang secara pasif. Rukayat adalah sebuah ikhtiar pembuktian empiris atas kalkulasi matematis (hisab) yang telah disusun. Keterbatasan fisiologis mata manusia (*human eye*)—yang memiliki bukaan pupil maksimal hanya sekitar 7 milimeter dan sensitivitas spektral yang terbatas pada cahaya tampak—menjadi kendala utama dalam mengobservasi objek langit yang memiliki kontras sangat rendah, seperti hilal awal bulan yang tenggelam dalam pendaran cahaya senja (*twilight glare*).

Al-Qur'an secara eksplisit memerintahkan observasi mendalam terhadap arsitektur kosmos, yang mengimplikasikan penerahan seluruh instrumen yang tersedia bagi umat manusia pada zamannya:

أَوَلَمْ يَنْظُرُوا فِي مَلَكُوتِ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ وَمَا خَلَقَ اللَّهُ مِنْ شَيْءٍ وَأَنْ عَسَى أَنْ يَكُونَ قَدِ اقْتَرَبَ أَجَلُهُمْ فَتَلِيهِمْ فَتَابَيْ حَدِيثٍ بَعْدَهُ  
يُؤْمِنُونَ

*Artinya: "Apakah mereka tidak memperhatikan kerajaan langit dan bumi dan segala sesuatu yang diciptakan Allah, dan kemungkinan telah dekatnya kebinasaan mereka? Maka kepada perkataan apalagi mereka akan beriman sesudah Al Quran itu?" (QS. Al-A'raf [7]: 185)*

Kata *yandzuru* (memperhatikan/mengobservasi) dalam ayat ini berakar pada makna penglihatan yang disertai dengan analisis dan perenungan mendalam. Dalam konteks astronomi modern, teleskop hadir sebagai ekstensi fisis dari indra visual manusia. Teleskop tidak mengubah realitas syar'i dari "melihat", melainkan melipatgandakan *light-gathering power* (daya kumpul cahaya) dan resolusi sudut, sehingga objek yang secara fisis telah wujud di atas ufuk—namun berada di bawah ambang batas deteksi mata telanjang (*threshold of naked-eye visibility*)—dapat diindera secara definitif.

**B. Anatomi dan Tipologi Instrumen Optik Observasi** Secara mekanika optik, teleskop yang digunakan dalam observasi falak (seperti rukyatul hilal, pengamatan gerhana, dan penentuan posisi bintang) diklasifikasikan ke dalam tiga tipologi utama berdasarkan cara mereka mengumpulkan dan memfokuskan cahaya:

1. **Teleskop Refraktor (Lensa Bias):** Desain klasik ini menggunakan lensa objektif cembung di bagian depan tabung untuk membiaskan (membelokkan) cahaya menuju titik

fokus di bagian belakang. Refraktor berkualitas tinggi (*Apochromatic Refractor* / APO) menggunakan elemen lensa ganda atau tiga (seperti kaca *Extra-low Dispersion* / ED) untuk mengoreksi Aberasi Kromatik—yakni kecacatan optis di mana panjang gelombang warna yang berbeda (merah, hijau, biru) tidak jatuh pada titik fokus yang persis sama, menghasilkan pendaran pelangi di tepi objek yang terang. Untuk pengamatan hilal, refraktor apochromatic sangat direkomendasikan karena memberikan tingkat kontras optik tertinggi tanpa adanya obstruksi sentral.

2. **Teleskop Reflektor (Cermin Pantul / Newtonian):** Diciptakan oleh Isaac Newton, desain ini membuang lensa objektif dan menggantinya dengan cermin primer berbentuk parabola di dasar tabung. Cahaya memantul ke cermin sekunder yang miring 45 derajat, lalu diarahkan ke lensa okuler (eyepiece) di sisi tabung. Reflektor menawarkan diameter bukaan (*aperture*) yang masif dengan biaya yang lebih efisien, memberikan daya kumpul cahaya yang sangat besar. Namun, kelemahannya terletak pada Aberasi Koma (*Coma Aberration*), di mana bintang di tepi medan pandang tampak memanjang seperti komet.
3. **Teleskop Katadioptrik (Lensa-Cermin Campuran):** Sistem ini memadukan lensa korektor di bagian depan dan cermin parabola/sferis di bagian belakang. Varian yang paling populer adalah *Schmidt-Cassegrain Telescope* (SCT) dan *Maksutov-Cassegrain* (Mak). Desain ini melipat lintasan cahaya di dalam tabung, menghasilkan *focal length* (panjang fokus) yang sangat panjang—yang berimplikasi pada magnifikasi/perbesaran gambar yang tinggi—dalam tabung yang sangat ringkas dan portabel. Desain ini menjadi primadona bagi tim rukyat lapangan (*mobile observatory*) karena kemudahan mobilisasi dan kemampuannya mengisolasi hilal dari langit latar belakang yang terang.

**C. Parameter Resolusi Fisika Optik (Kriteria Rayleigh dan Limit Dawes)** Seorang pakar falak tidak memilih teleskop berdasarkan klaim "perbesaran (zoom) tertinggi" yang menyesatkan, melainkan berdasarkan *Aperture* (Diameter Bukaan). Diameter inilah yang menentukan Resolusi Sudut (*Angular Resolution*), yakni kemampuan instrumen untuk memisahkan dua titik cahaya yang saling berdekatan, atau kemampuan untuk mendeteksi sabit tipis bulan di tengah distorsi atmosfer.

Batas fisis kemampuan resolusi sebuah lensa didefinisikan secara matematis melalui Kriteria Rayleigh (*Rayleigh Criterion*), yang diturunkan dari prinsip difraksi gelombang cahaya sferis. Formulasi standarnya adalah:  $\theta = 1.22 * (\lambda / D)$  Di mana  $\theta$  adalah resolusi sudut (dalam radian),  $\lambda$  adalah panjang gelombang cahaya yang diamati (dalam meter, biasanya diasumsikan cahaya kuning-hijau pada rentang 550 nanometer), dan  $D$  adalah diameter bukaan teleskop (dalam meter).

Dalam satuan empiris observasi visual yang lebih praktis, astronom menggunakan Limit Dawes (*Dawes' Limit*), yang dirumuskan sebagai:  $R = 116 / D$  Di mana  $R$  adalah daya pisah dalam satuan detik busur (*arcseconds*), dan  $D$  adalah diameter objektif teleskop dalam milimeter. Sebuah teleskop dengan bukaan 100 mm memiliki batas resolusi teoretis sebesar 1,16 detik busur. Untuk

rakyatul hilal, di mana tebal sabit (*crescent width*) Bulan pada saat fase baru sering kali berada di bawah 1 menit busur (60 detik busur), instrumen dengan resolusi tinggi ini mutlak diperlukan untuk membedakan pendaran sabit hilal dari turbulensi atmosfer horizontal (*seeing conditions*).

**D. Sistem Mounting dan Prosedur Kalibrasi (Alignment)** Teleskop optik terancang sekalipun akan menjadi instrumen mati tanpa sistem *mounting* (dudukan mekanis) yang presisi. *Mounting* berfungsi untuk menyangga bobot teleskop dan secara dinamis menetralkan efek rotasi Bumi (yang menyebabkan objek langit tampak bergerak dari timur ke barat dengan kecepatan 15 derajat per jam).

Terdapat dua kelas utama *mounting* dalam astrometri fisis:

1. **Alt-Azimuth Mount:** Bergerak pada dua sumbu tegak lurus secara terpisah—kiri/kanan (Azimuth) dan atas/bawah (Altitude). Sistem ini intuitif, namun untuk melacak (*tracking*) objek di langit secara otomatis, motor penggerak pada kedua sumbunya harus bekerja secara simultan dengan kecepatan variabel yang sangat kompleks.
2. **Equatorial Mount:** Sistem mekanis yang salah satu sumbunya (Sumbu Polar/Right Ascension) dimiringkan sejajar persis dengan sumbu rotasi Bumi (diarahkan ke Kutub Utara atau Kutub Selatan Langit). Dengan kalibrasi ini, teleskop hanya memerlukan satu motor yang berputar dengan kecepatan konstan (Kecepatan Sideris / *Sidereal Rate*) untuk melacak Matahari atau Bulan tanpa henti.

**Kalibrasi dan Integrasi Ephemeris (Go-To System):** Praktikum kalibrasi optis di lapangan sebelum sidang isbat (*Pre-Observation Protocol*) adalah tahapan paling kritis. Pada era modern, dudukan teleskop dilengkapi dengan mikrokontroler internal (*Go-To System*) yang harus dipandu oleh *ephemeris switching logic*. Prosedurnya adalah sebagai berikut:

1. **Leveling dan Balancing:** Memastikan tripod sejajar mutlak dengan gravitasi lokal menggunakan *waterpass* tingkat tinggi, dan memastikan tabung teleskop seimbang secara mekanis pada kedua sumbu agar motor pelacak tidak memikul beban torsi berlebih.
2. **Polar Alignment (Penyelarasan Kutub):** Membedik sumbu polar *mounting* secara presisi ke True North (Utara Sejati), bukan Utara Magnetik. Karena bintang kutub (Polaris) sering kali tidak terlihat di wilayah ekuator seperti Indonesia, kalibrasi dilakukan dengan metode *drift alignment* atau *plate-solving* elektronis.
3. **Star Alignment (Kalibrasi Bintang Referensi):** Memasukkan data koordinat geografis (Lintang, Bujur, Elevasi) dan waktu universal yang tersinkronisasi atomik (GPS Time). Pengamat kemudian mengarahkan teleskop secara manual ke dua atau tiga bintang terang di berbagai sudut langit yang berbeda. *Software* teleskop akan mengalkulasi galat pembidikannya (*pointing error*) dan menyusun model matriks perbaikan transformasi koordinat (*sky model*).

4. **Focuser Collimation:** Menyelaraskan cermin/lensa menggunakan laser kolimator agar lintasan cahaya jatuh tepat di titik fokus sensor atau mata tanpa distorsi (koma atau astigmatisme).

Hanya ketika teleskop telah selaras sempurna dengan kerangka koordinat *geocentric-apparent* dari ruang angkasa, maka motor penggeraknya dapat diperintahkan secara otomatis melalui sistem *Go-To* untuk membidik area langit kosong di mana kalkulasi *software* (yang digerakkan oleh *dataset* DE441) memprediksi bahwa pusat piringan hilal berada tepat saat Matahari terbenam.

## 6.2. Pemanfaatan Gadget dan Teknologi *Image Processing* dalam Deteksi Hilal

### A. Transisi Sensorik: Dari Biologi Mata ke Semikonduktor Digital (CMOS/CCD)

Epistemologi rukyatul hilal di era modern telah mengalami pergeseran fundamental, beralih dari observasi mata telanjang murni (*naked-eye visual observation*) menuju observasi terinstrumentasi digital. Keterbatasan mata manusia terletak pada efisiensi kuantum (*Quantum Efficiency / QE*)—yakni persentase foton cahaya yang berhasil diubah menjadi sinyal saraf—yang secara biologis hanya berkisar pada angka 1% hingga 3% dalam kondisi pencahayaan rendah (skotopik). Selain itu, mata manusia tidak memiliki kemampuan akumulasi eksposur waktu (*time-integration*); otak memproses aliran visual secara instan tanpa bisa "menumpuk" cahaya dari waktu ke waktu.

Keterbatasan ini dijawab oleh fisika zat padat (*solid-state physics*) melalui penemuan sensor pencitraan digital, utamanya *Charge-Coupled Device* (CCD) dan *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS). Sensor astronomi modern memiliki QE yang melampaui 80%. Fotodiode dalam piksel semikonduktor ini mampu menjebak foton dari pantulan cahaya hilal yang sangat redup, kemudian mengonversinya menjadi elektron, dan akhirnya mengubahnya menjadi data digital berskala keabuan (*grayscale* atau *Raw Data*).

Penggunaan instrumen resolusi tinggi untuk memetakan tanda-tanda kosmis ini sejalan dengan substansi teologis penciptaan hilal itu sendiri, sebagaimana firman Allah SWT:

يَسْأَلُونَكَ عَنِ الْأَهْلِ قُلْ هِيَ مَوَاقِيْتُ لِلنَّاسِ وَالْحَجِّ

*Artinya: "Mereka bertanya kepadamu tentang bulan sabit (hilal). Katakanlah: 'Bulan sabit itu adalah tanda-tanda waktu bagi manusia dan (bagi ibadah) haji...'"* (QS. Al-Baqarah [2]: 189)

Kata *mawaqit* (bentuk jamak dari *miqat*, batas waktu) menuntut kepastian dan determinasi fisis. Jika instrumen mata manusia gagal menangkap *mawaqit* akibat distorsi senja, maka ekstrapolasi sensor digital merupakan ikhtiar saintifik untuk mengungkap realitas fisis (wujud hilal) yang sesungguhnya sudah bertengger di atas horizon fisis (ufuk mar'i).

**B. Fotografi Afokal dan Ekstraksi Data RAW melalui *Smartphone*** Dengan demokratisasi teknologi, *smartphone* (gadget) telah bertransformasi menjadi instrumen astrometri yang

mumpuni untuk masyarakat sipil (Falak 5.0). Pemanfaatan *smartphone* dalam mendeteksi hilal umumnya menggunakan teknik **Fotografi Afokal (*Afocal Photography*)**, di mana lensa kamera ponsel disejajarkan langsung di belakang lensa okuler (*eyepiece*) teleskop.

Tantangan fisis utama penggunaan ponsel adalah ukuran sensornya yang sangat kecil (biasanya berukuran di bawah 1 inci), yang membatasi kapasitas *full-well* elektron pada setiap piksel, sehingga sangat rentan terhadap *noise* elektronis (seperti *thermal noise* dan *read noise*). Untuk mengatasi hukum fisika sensor ini, rekayasa perangkat lunak pada *smartphone* menjadi kunci mutlak.

Pengamat dilarang menggunakan mode kamera otomatis. Aplikasi antarmuka program aplikasi (API) kamera mutakhir (seperti integrasi Camera2 API pada Android) memungkinkan praktisi rukyat untuk mengambil kendali manual absolut. Parameter fisis yang dikunci meliputi:

1. **Fokus Tak Terhingga (*Infinity Focus*):** Mencegah lensa memburu fokus (*focus hunting*) pada kontras awan yang salah.
2. **Sensitivitas (*ISO*):** Dijaga pada angka serendah mungkin (ISO 100 - 400) untuk menekan amplifikasi sinyal buatan yang merusak rasio *Signal-to-Noise*.
3. **Kecepatan Rana (*Shutter Speed*):** Disesuaikan dengan *seeing* atmosfer, umumnya di kisaran 1/10 hingga 1/60 detik.
4. **Format RAW (DNG/TIFF):** Aturan paling krusial. Format JPEG standar telah mengalami kompresi hilang (*lossy compression*) dan interpolasi warna (*Bayer demosaicing*) yang secara fatal dapat menghapus piksel hilal yang sangat redup karena algoritma pabrikan menganggapnya sebagai *noise* (derau). Data RAW mempertahankan kemurnian linear tangkapan foton asli.

**C. Reduksi Derau (*Noise Reduction*) dan Pemrosesan Citra (*Image Processing*) Tingkat Lanjut** Keberhasilan rukyatul hilal di usia konjungsi yang masih sangat muda (kurang dari 12 jam) bukan ditentukan oleh jepretan tunggal, melainkan oleh keandalan algoritma pemrosesan citra digital (*digital image processing*). Ketika hilal berada dekat dengan ufuk, ia terkubur oleh pendaran cahaya senja (*twilight gradient glare*) dan distorsi turbulensi atmosfer horizontal yang mengacak-acak lintasan cahaya (efek *seeing*).

Solusi komputasional untuk menembus limitasi optis ini adalah teknik **Image Stacking (Penumpukan Citra)**. Praktisi merekam ratusan hingga ribuan *frame* video berkecepatan tinggi dari area di mana hilal diprediksi berada (berdasarkan perhitungan *apparent altitude* dan elongasi dari *dataset* DE441). Algoritma penumpukan (seperti *Shift-and-Add*) secara matematis menyelaraskan (*align*) seluruh *frame* tersebut dan menjumlahkannya.

Secara fisika statistik, pendaran atmosfer dan *noise* sensor bersifat acak (*stochastic*), sehingga jika ditumpuk (dirata-rata), distribusinya akan saling meniadakan dan merata (mendekati nilai nol

fluktuasi). Sebaliknya, kurva cahaya tipis sabit hilal bersifat konstan dan statis pada koordinat piksel tertentu. Secara matematis, Rasio Sinyal-ke-Derau (*Signal-to-Noise Ratio* / SNR) akan meningkat secara linear sebanding dengan akar kuadrat dari jumlah *frame* (N) yang ditumpuk:  

$$\text{SNR\_final} = \text{SNR\_initial} * \text{akar}(N)$$

Setelah tumpukan data master (*Master Frame*) diperoleh, tahap selanjutnya adalah **Peregangan Histogram (*Histogram Stretching*)** linier dan non-linier. Teknik kurva matematis ini mengekstraksi dan memperkuat kontras pada rentang tonal yang sangat sempit di mana hilal berada, sembari mereduksi atau memangkas (*clipping*) latar belakang langit senja menjadi gelap. Penggunaan filter matematika tambahan, seperti *High-Pass Filter* atau *Unsharp Masking*, sering dieksekusi menggunakan perangkat lunak saintifik (misalnya menggunakan sintaks *OpenCV* dalam bahasa pemrograman *Python*) untuk mempertegas batas diskrit (*edge detection*) antara piringan bulan dan langit latar.

**D. Tinjauan Epistemologis-Fikih atas Manipulasi Citra** Integrasi rekayasa perangkat lunak dalam memvisualisasikan hilal memunculkan diskursus fikih krusial: Apakah gambar hasil *stacking* dan peregangan kontras ekstrem masih sah dikategorikan sebagai *Rukyat bil Fi'li* (Melihat secara fisik)?

Mayoritas institusi fatwa dan pakar falak global sepakat bahwa pemrosesan citra digital (Falak Tech) berstatus **Sah dan Valid** secara syar'i, dengan satu syarat absolut: manipulasi tersebut bersifat murni fotometrik (ekstraksi data cahaya yang sudah ada). Peningkatan kontras, perataan derau, dan *stacking* adalah proses matematis untuk mengisolasi sinyal dari gangguan (*noise*); ia tidak menciptakan cahaya baru. Hilal yang terdeteksi dalam layar monitor benar-benar merepresentasikan pantulan foton fisis dari Matahari ke Bulan yang kemudian menabrak lensa teleskop.

Sebaliknya, jika praktik *image processing* menggunakan algoritma Generasi Citra Kecerdasan Buatan (seperti *AI Generative Fill* atau *Neural Network Enhancer* yang menyintesis atau merestorasi piksel berdasarkan probabilitas gambar, bukan berdasarkan foton asli yang masuk), maka hal tersebut batal secara syar'i. Algoritma AI semacam itu tergolong memalsukan data fisis alam semesta, yang bertentangan dengan prinsip *tabayyun* dan kepastian saintifik dalam hukum Islam. Oleh karena itu, penguasaan parameter *image processing* yang objektif tanpa rekayasa *generative* menjadi etika profesional mutlak bagi para perukyat modern di era Falak 5.0.

### 6.3. Eksplorasi *Dataset* Tingkat Lanjut: Integrasi Ephemeris NASA (DE441) dalam Akurasi Prediksi

**A. Epistemologi Komputasi Presisi dalam Bingkai Syariat** Perkembangan ilmu falak dari fase observasi manual menuju *Falak Tech* (komputasi astronomi digital) bukanlah sekadar modernisasi sekuler, melainkan manifestasi dari kepatuhan terhadap perintah Al-Qur'an untuk terus menyempurnakan penghitungan waktu dan ruang kosmis. Kepastian fisis dari pergerakan benda

langit didesain oleh Sang Pencipta dengan derajat presisi yang tak terhingga, sebagaimana ditegaskan dalam firman-Nya:

الشَّمْسُ وَالْقَمَرُ بِحُسْبَانٍ

Artinya: "Matahari dan bulan (beredar) menurut perhitungan (yang sangat teliti)." (QS. Ar-Rahman [55]: 5)

Kata *husban* dalam ayat ini berbentuk *mashdar* yang mengimplikasikan sebuah kalkulasi matematis yang sangat terperinci, dinamis, dan kompleks. Dalam merespons *husban* ini, para astronom Muslim klasik menyusun tabel-tabel ephemeris yang dikenal dengan *Zij* (seperti *Zij Ilkhani* karya Nasir al-Din al-Tusi atau *Zij Ulugh Beg*). Namun, tabel-tabel klasik tersebut bertumpu pada teori kinematika yang statis dan belum memasukkan variabel perturbasi gravitasi antarbenda langit (N-body problem) secara komprehensif. Pada era kontemporer, untuk mereplikasi *husban* kosmik tersebut, disiplin astrometri mewajibkan penggunaan *dataset* ephemeris beresolusi super tinggi yang dibangun dari pemodelan fisika relativistik.

**B. Dikotomi Pemodelan: Teori Analitik vs. Integrasi Numerik (JPL DE Series)** Dalam merancang mesin kalkulasi falak modern (*calculation engine*), pengembang perangkat lunak dihadapkan pada dua mazhab pemodelan matematika astronomi:

1. **Teori Analitik (Analytical Theories):** Pemodelan ini, seperti VSOP87 (untuk planet) karya Pierre Bretagnon dan ELP2000-82 (untuk Bulan) karya Chapront-Touzé, menggunakan deret trigonometri periodik yang panjangnya mencapai ribuan baris. Meskipun sangat mandiri dan tidak memerlukan file eksternal yang besar, teori analitik memiliki kelemahan inheren: akurasi akan mengalami degradasi (pemotongan deret / *truncation error*) jika digunakan untuk menghitung fenomena pada rentang waktu yang terlalu jauh di masa lalu atau masa depan.
2. **Integrasi Numerik (Numerical Integration):** Ini adalah standar emas dalam navigasi antariksa dan *Falak Tech* tingkat lanjut. Pemodelan ini tidak menggunakan rumus matematika tertutup, melainkan memecahkan persamaan diferensial gerak benda langit lapis demi lapis berdasarkan observasi radar, telemetri pesawat ruang angkasa, dan *Lunar Laser Ranging* (LLR). Produk paling otoritatif dari metode ini adalah *Development Ephemeris* (DE) yang dirilis secara berkala oleh NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL).

Dalam diskursus falak mutakhir, penggunaan *dataset* NASA JPL DE441 menjadi sebuah protokol wajib untuk riset dan kalibrasi. DE441 dipublikasikan oleh Folkner dkk. (2014) sebagai ephemeris jangka panjang yang diintegrasikan secara khusus untuk mencakup rentang waktu astronomis yang masif, mulai dari tahun 3000 Sebelum Masehi hingga 3000 Masehi. Penggunaan *dataset* ini memastikan bahwa kalkulasi gerhana historis pada masa Nabi Muhammad SAW maupun prediksi

konjungsi (*ijtima'*) ratusan tahun ke depan memiliki tingkat kesalahan (galat) dalam orde sub-detik busur (*sub-arcsecond accuracy*).

### C. Modifikasi Arsitektur Kode: Logika Peralihan Epheris (*Ephemeris Switching Logic*)

Mengintegrasikan DE441 ke dalam aplikasi perangkat lunak falak (seperti dalam pemrograman berbasis Python, C++, atau PHP) membutuhkan desain *backend* yang tangguh. File *dataset* DE441 didistribusikan dalam format biner yang sangat besar, berisi koefisien polinomial Chebyshev. Perangkat lunak tidak membaca koordinat secara langsung, melainkan harus menginterpolasi koefisien Chebyshev tersebut sesuai dengan *Julian Date* (Waktu Universal) yang di-input-kan.

Untuk mengoptimalkan beban komputasi (*computational overhead*) sekaligus menjamin akurasi mutlak, arsitektur perangkat lunak falak kaliber riset harus menerapkan modifikasi cerdas berupa **Logika Peralihan Epheris (*Ephemeris Switching Logic*)**. Mesin program tidak boleh secara statis memanggil satu file untuk semua rentang waktu secara membabi buta. Sebaliknya, logika *switching* ini secara dinamis memprioritaskan *file* data berakurasi tinggi secara hierarkis.

Dalam praktiknya, logika ini diarahkan secara spesifik untuk memprioritaskan dan mengalokasikan data satelit DE441 secara eksklusif bagi perhitungan yang jatuh pada rentang tahun 0 hingga 3000 Masehi. Jika *query* waktu jatuh pada rentang yang lebih spesifik dan membutuhkan data jangka pendek yang lebih baru (seperti DE440 atau DE442), sistem akan melakukan transisi secara mulus. Penguncian epos komputasi DE441 pada rentang milenium tersebut memitigasi anomali dari lonjakan variabel *Delta T* (selisih antara *Terrestrial Time* dan *Universal Time* akibat perlambatan rotasi Bumi), sehingga penentuan detik Ijtima' geosentris tidak akan meleset sepersekian detik pun.

### D. Pemindaian Koordinat (*Coordinate Scanning*) dan Syarat Mutlak *Geocentric-Apparent Altitude*

Tantangan epistemologis terbesar setelah data dari DE441 berhasil diekstraksi adalah bagaimana menginterpretasikan angka-angka tersebut ke dalam realitas observasional. *Dataset* NASA DE441 menghasilkan *output* murni berupa **Koordinat Geometris Geosentris (Pure Geocenter Geometric Coordinates)**. Artinya, koordinat Matahari dan Bulan yang dimuntahkan oleh sistem adalah posisi benda langit dari sudut pandang abstrak di pusat titik berat Bumi, di mana cahaya dianggap bergerak dalam garis lurus menembus ruang hampa tanpa keberadaan atmosfer.

Banyak *software* falak amatir terjebak pada galat fatal dengan langsung menggunakan *output* geometris ini sebagai dasar penentuan awal waktu shalat (Maghrib/Subuh) dan posisi hilal. Ini adalah pelanggaran terhadap hukum optika optis alamiah.

Oleh karena itu, modul pemindaian koordinat (*coordinate scanning modules*) pada *software* falak mutakhir diwajibkan secara teknis untuk menerapkan serangkaian lapisan transformasi. Modul ini **tidak boleh** berhenti pada kalkulasi geometris geosentris, melainkan mutlak harus

mengkonversinya hingga menghasilkan **Geocentric-Apparent Altitude (Ketinggian Tampak Geosentris)** atau *Topocentric Apparent Altitude*.

Protokol koreksi ini bekerja sebagai berikut:

1. **Koreksi Nutasi dan Aberasi Cahaya:** Mengubah *Mean Equator and Equinox of J2000.0* dari DE441 menjadi *True Equator and Equinox of Date* (koordinat sejati pada saat pengamatan).
2. **Transformasi Toposentris (Koreksi Paralaks):** Karena pengamat (pos observasi atau sensor kamera) berada di permukaan lengkung Bumi geodetik (WGS 84), bukan di inti Bumi, vektor posisi harus digeser sejauh radius Bumi fisis. Hal ini mutlak krusial untuk Bulan, di mana efek paralaks diurnalnya mereduksi ketinggian geometris Bulan hampir mencapai 1 derajat.
3. **Koreksi Refraksi Atmosferik:** Lintasan fisis gelombang elektromagnetik dibiaskan oleh gradien kerapatan gas di atmosfer Bumi. Modul *coordinate scanning* harus membaca variabel suhu dan tekanan udara makro untuk mendongkrak (*lift*) posisi benda yang rendah di ufuk. Ketinggian geometris murni harus ditambah dengan nilai refraksi ini.

Hanya melalui parameter *geocentric-apparent altitude* inilah, perangkat lunak astronomi dapat secara sah menyatakan bahwa hilal berada pada ketinggian fisis 3 derajat di atas ufuk mar'i saat Matahari tenggelam (memenuhi limitasi Kriteria MABIMS Baru). Integrasi pemodelan DE441 dengan pemindaian koordinat fisis ini mengukuhkan *Falak Tech* sebagai garda depan integrasi syariat dan sains terapan, mengubah asumsi perdebatan fikih menjadi kepastian numerik.

#### 6.4. Falak 5.0: Arsitektur dan Logika Dasar *Coding* Aplikasi Falak (Desktop & Android)

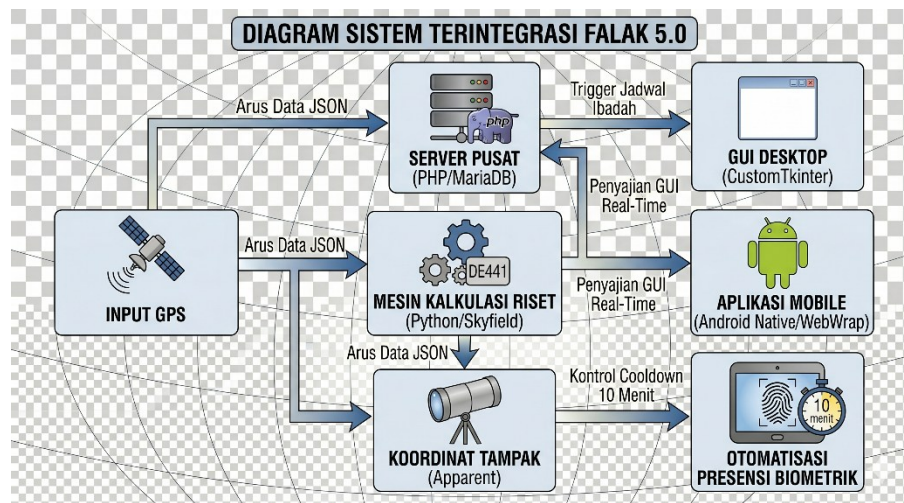
**A. Paradigma Falak 5.0: Dari Pengguna menuju Pengembang (*Developer*)** Revolusi Industri 4.0 yang ditandai oleh otomatisasi digital kini telah bertransisi menuju fase 5.0, di mana teknologi komputasi berfokus pada kolaborasi sinergis antara kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), komputasi tingkat tinggi, dan peradaban manusia yang berpusat pada nilai teologis. Dalam astrometri Islam, transisi ini mendemokratisasi akses terhadap hisab *tahqiqi*. Kepakaran falak tidak lagi sekadar diukur dari kemampuan membaca tabel logaritma klasik, tetapi dari kemahiran merekayasa arsitektur algoritma dan menulis baris-baris kode pemrograman (*coding*).

Integrasi instrumen teknologi modern sebagai "pena digital" dalam merawat dan mengekstraksi ilmu pengetahuan mendapatkan justifikasi dari wahyu pertama yang turun kepada Nabi Muhammad SAW:

الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ . عَلَّمَ الْإِنْسَانَ مَا لَمْ يَعْلَمْ

*Artinya: "Yang mengajar (manusia) dengan perantaraan qalam (pena). Dia mengajar kepada manusia apa yang tidak diketahuinya." (QS. Al-'Alaq [96]: 4-5)*

Dalam tafsir kontemporer, *al-qalam* bukan sekadar pena fisik, melainkan metafora bagi seluruh medium perekam dan pemroses informasi. Pada era Falak 5.0, *qalam* tersebut termanifestasi dalam bentuk pustaka pemrograman (*software libraries*) dan bahasa skrip (*scripting languages*) yang memungkinkan komputer untuk memecahkan persamaan trigonometri bola dalam skala milidetik, mereduksi potensi galat manusia (*human error*) hingga mendekati titik nol.



**Gambar 5.4 Bagan Sistem Terintegrasi Falak 5.0**

Flowchart sistem ini memvisualisasikan arsitektur "Falak 5.0" yang lengkap, menunjukkan aliran data dari input GPS, pemrosesan ephemeris DE441 pada server (PHP/Python), hingga visualisasi real-time pada gawai Android/Desktop, dan memicu otomatisasi (biometric presence dengan cooldown 10 menit).

## **B. Arsitektur Desktop Berbasis Python: *Skyfield*, *NumPy*, dan GUI *CustomTkinter***

Pengembangan aplikasi desktop berkinerja tinggi untuk keperluan hisab falak kontemporer—termasuk untuk pembuatan kompilasi sistem kalender global berpresisi tinggi—sangat mengandalkan arsitektur bahasa pemrograman Python. Keunggulan komparatif Python terletak pada ekosistem pustaka saintifiknya yang sangat kaya dan matang.

Tulang punggung kalkulasi vektor benda langit di dalam aplikasi falak mutakhir tidak lagi ditulis dari nol (*from scratch*), melainkan memanfaatkan pustaka **Skyfield**. Modul komputasi astrometri *Skyfield* secara langsung memproses *dataset* biner NASA JPL Ephemeris. Seperti yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya, arsitektur *backend* yang tangguh wajib merancang **logika peralihan ephemeris** (*ephemeris switching logic*). Logika *coding* ini menginstruksikan aplikasi untuk secara otomatis dan eksklusif menggunakan file berakurasi tinggi DE441 khusus untuk

rentang epos komputasi tahun 0 hingga 3000 Masehi. Penggunaan *switch* kondisional ini menjamin tidak terjadinya pembengkakan memori (*memory bloat*) sekaligus mengamankan perhitungan  $\Delta T$  untuk masa depan dan masa lalu.

Untuk pemrosesan larik numerik dan perhitungan fungsi trigonometri matriks besar, modul **NumPy** diintegrasikan untuk memecahkan konversi ascensio rekta dan deklinasi secara serentak. Lebih jauh, seperti ditekankan berulang kali, modul pemindaian koordinat (*coordinate scanning*) yang dibangun wajib secara ketat mengubah *geometric coordinates* murni menjadi **geocentric-apparent altitude** (dengan memasukkan suhu, tekanan udara fisis, paralaks, dan kerendahan ufuk) sebelum mengevaluasi status Imkanur Rukyat.

Antarmuka Pengguna Grafis (GUI) kemudian dibangun untuk memfasilitasi interaksi pengguna tanpa harus menyentuh terminal konsol. Pustaka **CustomTkinter** memberikan kerangka kerja (*framework*) modern bergaya tema gelap/terang (*dark/light mode*) yang sangat responsif di lingkungan Windows. Komponen visual ini dipadukan dengan pustaka grafik **Matplotlib** untuk memproyeksikan lintasan benda langit, simulasi lengkung analemma, atau grafik analitik selisih waktu secara *real-time* dan interaktif di layar komputer pengguna. Selain itu, eksperimentasi integrasi dengan asisten bahasa berskala besar (LLM) dalam modul interaktif—sebagai mesin penjawab (*chatbot*) saintifik lokal untuk mengeksekusi parameter komputasi—menjadi tren terdepan dalam mendesain aplikasi komprehensif.

**C. Ekosistem Mobile Android dan Integrasi Backend PHP** Untuk memastikan universalitas dan kemudahan akses (*portability*) saat melakukan observasi di lapangan (misalnya di pos rukyat pegunungan yang tidak memiliki akses komputer *desktop*), algoritma falak ditransformasikan ke dalam lingkungan pengembangan *mobile* (Android).

Arsitektur aplikasi falak Android dapat dikembangkan melalui *Native IDE* seperti Android Studio menggunakan Java/Kotlin, atau dipaketkan (*di-wrap*) melalui pembuat aplikasi web (*APK builder*) modern. Karena beban pemrosesan *dataset* DE441 sangat berat untuk dieksekusi secara lokal di prosesor *smartphone* dan ukuran file aslinya melampaui 1 Gigabyte, pengembang menyiasatinya dengan arsitektur *Client-Server*.

Logika komputasi berat dan pemanggilan basis data ephemeris di-*hosting* pada peladen (*server*) tersendiri menggunakan bahasa **PHP** atau *micro-framework* Python. Ketika pengguna membuka aplikasi Android untuk mencari arah kiblat atau waktu Ijtima', ponsel (sebagai *Client*) cukup mengirimkan koordinat lintang dan bujur melalui struktur data JSON ke *server* PHP. *Server* mengeksekusi kalkulasi hisab *tahqiqi* secara paralel dan mengembalikan parameter waktu atau *azimuth* secara instan ke layar ponsel pengguna. Arsitektur terdistribusi ini menjamin akurasi level laboratorium tetap berada di dalam genggam tangan masyarakat awam.

**D. Ekstensibilitas Sistem: Presensi Biometrik Berbasis Waktu Kosmik** Pengembangan aplikasi Falak 5.0 tidak hanya berhenti pada output berupa jadwal atau kalender. Konsep arsitektur komputasi ini sangat ekstensif (*extensible*) untuk digabungkan dengan tata kelola kelembagaan masjid, lembaga pendidikan, atau universitas.

Sebagai contoh perpaduan komputasi falak dan kecerdasan artifisial terapan, jadwal masuk waktu shalat (*True Transit*) dan jadwal kalender akademik Hijriah diintegrasikan ke dalam sistem pelacakan kehadiran biometrik (*biometric presence tracking system*). Modul pelacakan ini menggunakan arsitektur JavaScript, seperti **face-api.js**, untuk melakukan inferensi pengenalan wajah secara lokal (*edge computing*) di perangkat gawai atau layar pintar yang dipasang di gerbang institusi.

Tantangan algoritmik dari sistem kehadiran biometrik langsung adalah anomali pembacaan ganda; jika seseorang berdiri di depan sensor atau sistem antrean wajah mengalami *glitch*, basis data (seperti MySQL/MariaDB yang dijumpai PHP) akan mengalami kelebihan beban (*spamming*) akibat pencatatan *log* wajah yang sama berkali-kali dalam hitungan detik. Untuk menjaga integritas data absensi, logika komputasi fungsional diwajibkan mengimplementasikan periode pendinginan (*cooldown period*). Setiap kali identitas *tensor* wajah dikenali dan berhasil dicatat waktu presensinya, *identifier* tersebut akan dikunci oleh fungsi memori (*cache*) dengan menyatel **jeda waktu (cooldown) wajib minimal 10 menit** sebelum sistem mengizinkan peristiwa pengenalan wajah yang sama untuk direkam kembali di basis data. Pemblokiran sementara pada tingkat *logic gate* ini mencegah duplikasi *log*, memastikan basis data beroperasi secara efisien, serta mengeliminasi galat fisis dalam pencatatan laporan akhir institusi.

Konvergensi silang-disiplin semacam inilah—mulai dari pembedahan mekanika orbit Bumi menggunakan DE441 yang diubah menjadi *apparent altitude*, ditarik ke dalam visualisasi *CustomTkinter* dan Android, hingga memicu pelacakan biometrik dengan pengaturan *cooldown* 10 menit menggunakan *face-api.js*—yang membuktikan bahwa Ilmu Falak tidak pernah stagnan. Ia adalah sains kehidupan (*living science*) yang terus meretas batas zaman tanpa harus mengorbankan sakralitas ibadah.

## DAFTAR PUSTAKA BAB 6

- Azhari, S. (2007). *Ilmu Falak: Perjumpaan Khazanah Islam dan Sains Modern*. Yogyakarta: Suara Muhammadiyah.
- Bucaille, M. (1976). *The Bible, The Qur'an and Science: The Holy Scriptures Examined in the Light of Modern Knowledge*. Paris: Seghers.

Folkner, W. M., Williams, J. G., Boggs, D. H., Park, R. S., & Kuchynka, P. (2014). *The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431*. The Interplanetary Network Progress Report, 196, 1-81. Jet Propulsion Laboratory.

Ilyas, M. (1997). *Astronomy of Islamic Times for the Twenty-first Century*. London: Mansell Publishing.

Meeus, J. (1998). *Astronomical Algorithms* (2nd ed.). Richmond, VA: Willmann-Bell.

Rhodes, B. (2019). *Skyfield: High precision research-grade positions for the planets and Earth satellites*. Python Package Index (PyPI). <https://pypi.org/project/skyfield/>

Saksono, T. (2007). *Mengkompromikan Rukyat dan Hisab*. Jakarta: Amythas Publicita.

Suryadi, B., & Purwanto, A. (2015). *Fisika dan Astronomi Islam*. Bandung: Rosdakarya.

Urban, S. E., & Seidelmann, P. K. (Eds.). (2013). *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac* (3rd ed.). Mill Valley, CA: University Science Books.

Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace.

## EPILOG: SINTESIS, REFLEKSI, DAN TANTANGAN KONTEMPORER ILMU FALAK

**A. Reafirmasi Epistemologis: Menyatukan Teks Suci dan Komputasi Kosmis** Sepanjang elaborasi komprehensif dalam enam bab sebelumnya, buku ini telah mendemonstrasikan bahwa Ilmu Falak bukanlah sekadar peninggalan arkais dari peradaban Islam masa lampau, melainkan sebuah disiplin sains dinamis yang terus beresonansi dengan kemajuan sains dan teknologi modern. Transformasi dari metodologi *Hisab Taqribi*—yang bersandar pada pendekatan matematis kasar dan siklus rata-rata—menuju *Hisab Tahqiqi* tingkat lanjut, membuktikan bahwa syariat Islam memiliki kapasitas inheren untuk menyerap, memvalidasi, dan mengarahkan penemuan astrometri paling mutakhir.

Penerapan standar akurasi tinggi, seperti penggunaan *dataset* integrasi numerik NASA JPL DE441, serta integrasi parameter *geocentric-apparent altitude* yang dikupas tuntas dari Bab 2 hingga Bab 6, menjadi saksi bisu bagaimana kalkulasi geometris murni harus senantiasa tunduk pada realitas fisis (seperti optika dan refraksi atmosfer). Hal ini secara filosofis merefleksikan esensi dari fikih waktu itu sendiri: hukum Tuhan tidak diturunkan untuk dijalankan di ruang hampa yang abstrak, melainkan diwajibkan untuk berinteraksi dengan realitas kehidupan dan keterbatasan visual manusia di permukaan Bumi geodetik.

**B. Tantangan Penyatuan Kalender: Menembus Batas Politik dan Geografi** Meskipun arsitektur komputasi (Falak Tech) telah mencapai resolusi sub-detik busur yang nyaris absolut, tantangan terberat yang dihadapi umat Islam saat ini tidak lagi terletak pada ranah keakuratan algoritma ephemeris, melainkan pada ranah konsensus sosiologis dan politik-yurisprudensi. Proyek besar unifikasi kalender melalui Kalender Hijriah Global Tunggal (KHGT) masih sering membentur tembok *mathla'* nasional yang secara artifisial dibatasi oleh garis-garis geopolitik modern—sebuah segregasi yang sejatinya asing dalam bangunan kosmologi Islam klasik.

Masa depan astronomi Islam sangat bergantung pada keberanian para cendekiawan dan *ulil amri* global untuk menyepakati sebuah Protokol Kalender Global (*Global Calendar Protocol*) yang melepaskan ego sektoral. Algoritma pemindaian bujur untuk mendeteksi batas *imkanur rukyat* mutlak harus diselaraskan secara logis dengan Garis Tanggal Internasional (*International Date Line*). Melalui integrasi ini, umat Islam secara komunal dapat bergerak dalam satu ritme rotasi diurnal Bumi yang koheren, meminimalisasi anomali memalukan berupa perayaan hari raya yang berbeda pada satu hamparan benua yang sama.

**C. Falak 5.0: Kecerdasan Buatan dan Otomatisasi Terintegrasi** Melangkah ke dekade mendatang, era Falak 5.0 menuntut lompatan kuantum dalam rekayasa instrumentasi. Jika saat ini teknik fotogrametri dan penumpukan citra (*image stacking*) menjadi standar emas dalam

mendeteksi hilal usia muda, arah riset masa depan akan didominasi oleh implementasi Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence*) dan *Machine Learning*.

Jaringan saraf tiruan (*Neural Networks*) dapat dilatih menggunakan ribuan data citra ufuk fisis dari berbagai belahan dunia untuk secara otomatis mengenali pola turbulensi atmosfer dan memisahkan objek astronomis dari pendaran senja (*twilight glare*). Namun, seperti yang telah ditegaskan secara epistemologis, batas-batas integritas syar'i harus dipertahankan: AI hanya boleh difungsikan sebagai instrumen pemrosesan sinyal fisis (reduksi *noise* foton), sama sekali bukan sebagai mesin generatif yang "melukis" atau menyintesis hilal fiktif (halusinasi piksel).

Lebih jauh, presisi waktu kosmik ini akan semakin masif diadopsi dalam manajemen kehidupan sehari-hari. Integrasi algoritma falak ke dalam perangkat *Internet of Things* (IoT)—seperti sistem presensi biometrik di institusi Islam yang terikat dengan jadwal waktu *zawal* atau *syuruq*, lengkap dengan sistem pencegahan redundansi data (seperti *cooldown period* pengenalan wajah otomatis)—akan menjadikan hukum-hukum langit benar-benar membumi dalam mengawal kedisiplinan umat.

**D. Konklusi: Langit sebagai *Mihrab* Keilmuan** Buku "*Belajar Falak Dasar: Pendekatan Komprehensif dari Tradisi Turats hingga Komputasi Astronomi Modern*" ini ditutup dengan sebuah kesadaran teologis bahwa alam semesta adalah *mihrab* (tempat pengabdian) yang tak terhingga luasnya. Membedah matriks orbit Bulan, menelusuri kelengkungan analemma Matahari, hingga mengkalkulasi koreksi *Dip of Horizon*, pada hakikatnya adalah proses membaca "ayat-ayat" Allah yang terbentang luas tanpa aksara (*ayat kauniyah*).

Allah SWT berfirman menjanjikan penyingkapan tabir ilmu ini:

سَنُرِيهِمْ آيَاتِنَا فِي الْأَفَاقِ وَفِي أَنْفُسِهِمْ حَتَّىٰ يَتَبَيَّنَ لَهُمْ أَنَّهُ الْحَقُّ ۗ أَوَلَمْ يَكْفِ بِرَبِّكَ أَنَّهُ عَلَىٰ كُلِّ شَيْءٍ شَهِيدٌ

*Artinya: "Kami akan memperlihatkan kepada mereka tanda-tanda (kekuasaan) Kami di segenap ufuk dan pada diri mereka sendiri, sehingga jelaslah bagi mereka bahwa Al Quran itu adalah benar. Dan apakah Tuhanmu tidak cukup (bagi kamu) bahwa sesungguhnya Dia menyaksikan segala sesuatu?"* (QS. Fussilat [41]: 53).

Pada akhirnya, setiap baris kode pemrograman (*source code*) yang dikompilasi, setiap pembesaran cermin teleskop yang diarahkan, dan setiap resolusi hitungan yang berhasil kita capai, haruslah bermuara pada satu tujuan akhir: ketundukan intelektual dan spiritual yang mutlak kepada *Al-Khaliq*, Sang Arsitek Agung Alam Semesta.

## DAFTAR PUSTAKA EPILOG

Azhari, S. (2007). *Ilmu Falak: Perjumpaan Khazanah Islam dan Sains Modern*. Yogyakarta: Suara Muhammadiyah.

Ilyas, M. (1997). *Astronomy of Islamic Times for the Twenty-first Century*. London: Mansell Publishing.

Purwanto, A. (2012). *Nalar Ayat-Ayat Semesta: Menjadikan Al-Qur'an sebagai Basis Konstruksi Ilmu Pengetahuan*. Bandung: Mizan.

Saksono, T. (2007). *Mengkompromikan Rukyat dan Hisab*. Jakarta: Amythas Publicita.

Suryadi, B., & Purwanto, A. (2015). *Fisika dan Astronomi Islam*. Bandung: Rosdakarya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, S. (2011). *Hari Raya dan Problematika Hisab Rukyat*. Yogyakarta: Suara Muhammadiyah.
- Ar-Razi, F. (1981). *Mafatih al-Ghaib (Tafsir Al-Kabir)*. Beirut: Dar al-Fikr.
- Azhari, S. (2007). *Ilmu Falak: Perjumpaan Khazanah Islam dan Sains Modern*. Yogyakarta: Suara Muhammadiyah.
- Bucaille, M. (1976). *The Bible, The Qur'an and Science: The Holy Scriptures Examined in the Light of Modern Knowledge*. Paris: Seghers.
- Djamaluddin, T. (2011). *Astronomi Memberi Solusi Penyatuan Ummat*. Jakarta: Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN).
- Folkner, W. M., Williams, J. G., Boggs, D. H., Park, R. S., & Kuchynka, P. (2014). *The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431*. The Interplanetary Network Progress Report, 196, 1-81. Jet Propulsion Laboratory.
- Hassab-Elnaby, M. (1990). *A New Astronomical Interpretation of the Solar-Lunar Calendar Intercalation*. Cairo: Ain Shams University Press.
- Ilyas, M. (1984). *A Modern Guide to Astronomical Calculations of Islamic Calendar, Times & Qibla*. Kuala Lumpur: Berita Publishing.
- Ilyas, M. (1997). *Astronomy of Islamic Times for the Twenty-first Century*. London: Mansell Publishing.
- Jauhari, T. (1930). *Al-Jawahir fi Tafsir al-Qur'an al-Karim*. Kairo: Mustafa al-Babi al-Halabi.
- King, D. A. (1993). *Astronomy in the Service of Islam*. Aldershot: Variorum.
- King, D. A. (1999). *World-Maps for Finding the Direction and Distance to Mecca: Innovation and Tradition in Islamic Science*. Leiden: Brill.
- Meeus, J. (1998). *Astronomical Algorithms* (2nd ed.). Richmond, VA: Willmann-Bell.
- Najjar, Z. (2006). *Tafsir al-Ayat al-Kawuniyah fi al-Qur'an al-Karim*. Kairo: Maktabah as-Syuruq ad-Dawliyah.

Odeh, M. S. (2004). *New Criterion for Lunar Crescent Visibility*. *Experimental Astronomy*, 18(1), 39-64.

Purwanto, A. (2012). *Nalar Ayat-Ayat Semesta: Menjadikan Al-Qur'an sebagai Basis Konstruksi Ilmu Pengetahuan*. Bandung: Mizan.

Rhodes, B. (2019). *Skyfield: High precision research-grade positions for the planets and Earth satellites*. Python Package Index (PyPI). <https://pypi.org/project/skyfield/>

Saksono, T. (2007). *Mengkompromikan Rukyat dan Hisab*. Jakarta: Amythas Publicita.

Saliba, G. (2007). *Islamic Science and the Making of the European Renaissance*. Cambridge, MA: MIT Press.

Seidelmann, P. K. (Ed.). (1992). *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. Mill Valley, CA: University Science Books.

Smart, W. M. (1977). *Textbook on Spherical Astronomy* (6th ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Suryadi, B., & Purwanto, A. (2015). *Fisika dan Astronomi Islam*. Bandung: Rosdakarya.

Urban, S. E., & Seidelmann, P. K. (Eds.). (2013). *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac* (3rd ed.). Mill Valley, CA: University Science Books.

Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace.

Az-Zindani, A. M. (1990). *Al-Mu'jizat al-Ilmiyyah fi al-Qur'an wa as-Sunnah*. Kairo: Dar al-Ma'arif.

## GLOSARIUM

- **A - Azimuth:** Jarak sudut yang diukur di sepanjang cakrawala (horizon) dari titik Utara sejati searah jarum jam ( $0^{\circ}$ – $360^{\circ}$ ) untuk menentukan posisi horizontal benda langit.
- **B - Bujur Ekliptika:** Koordinat benda langit yang diukur di sepanjang lingkaran ekliptika, dimulai dari Titik Aries (Vernal Equinox). Digunakan sebagai parameter utama dalam menentukan *Ijtima'*.
- **C - CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor):** Jenis sensor pencitraan digital pada kamera modern yang digunakan untuk menangkap foton hilal dan mengubahnya menjadi data elektronik.
- **D - Declination (Deklinasi):** Jarak sudut suatu benda langit diukur ke arah Utara (+) atau Selatan (-) dari ekuator langit; ekuivalen dengan garis lintang pada koordinat Bumi.
- **E - Ephemeris:** Tabel atau *dataset* digital (seperti NASA JPL DE441) yang memberikan posisi presisi benda-benda langit pada waktu-waktu tertentu.
- **F - Fadl ad-Da'ir:** Istilah dalam ilmu falak klasik untuk *Hour Angle* (Sudut Waktu), yaitu jarak sudut benda langit dari meridian lokal pengamat.
- **G - Geocentric-Apparent Altitude:** Ketinggian benda langit yang dihitung dari pusat Bumi namun telah dikoreksi oleh efek fisik atmosfer (refraksi) dan optik (paralaks) agar sesuai dengan tampilan visual.
- **H - Hilal:** Sabit bulan tertipis yang tampak pertama kali setelah terjadinya konjungsi (*Ijtima'*) pada saat matahari terbenam.
- **I - Ijtima':** Momentum astronomis ketika Matahari dan Bulan berada pada posisi bujur ekliptika yang sama jika dilihat dari pusat Bumi; disebut juga konjungsi atau Bulan Baru.
- **J - Julian Date (JD):** Sistem penomoran hari kontinyu yang dimulai sejak 1 Januari 4713 SM, digunakan dalam komputasi astronomi untuk menghindari kerumitan sistem kalender bulanan.
- **K - Khat al-Istiwa:** Istilah Arab untuk Ekuator, baik ekuator Bumi maupun proyeksinya di bola langit (Ekuator Langit).
- **L - Lunasi:** Interval waktu satu siklus fase bulan penuh dari satu konjungsi ke konjungsi berikutnya, dengan durasi rata-rata 29,53 hari.
- **M - Mathla':** Batas wilayah keberlakuan munculnya hilal secara geografis untuk memulai awal bulan kamariah.
- **N - Nutasi:** Osilasi atau "anggukan" kecil pada sumbu rotasi Bumi yang disebabkan oleh pengaruh gravitasi Bulan, yang memengaruhi ketelitian koordinat benda langit.
- **O - Obliquity (Kemiringan Ekliptika):** Sudut kemiringan sumbu rotasi Bumi terhadap bidang orbitnya (ekliptika), yang saat ini bernilai sekitar **23,44°**.
- **P - Paralaks:** Pergeseran posisi sudut benda langit (terutama Bulan) akibat perbedaan titik pandang antara pusat Bumi (geosentris) dan permukaan Bumi (toposentris).

- **Q - Qida Rumhin:** Ukuran "satu tombak" (sekitar  $4,5^{\circ}$ – $5^{\circ}$ ) yang digunakan sebagai parameter ketinggian Matahari untuk menandai masuknya waktu shalat Dhuha.
- **R - Refraksi Atmosfer:** Pembiasan cahaya benda langit saat memasuki atmosfer Bumi yang menyebabkan objek tampak lebih tinggi dari posisi geometris aslinya.
- **S - Spherical Trigonometry:** Cabang matematika yang mempelajari hubungan antara sisi dan sudut segitiga pada permukaan bola, digunakan untuk menghitung arah kiblat dan waktu shalat.
- **T - Ta'dil al-Waqt:** Istilah falak untuk *Equation of Time* (Perata Waktu), yakni selisih antara waktu surya sejati (jam matahari) dan waktu surya rata-rata (jam mekanik).
- **U - Ufuk Mar'i:** Horizon tampak atau cakrawala fisis yang terlihat oleh mata pengamat, yang posisinya dipengaruhi oleh ketinggian tempat (*Dip of Horizon*).
- **V - Vernal Equinox:** Titik potong antara ekuator langit dan ekliptika saat Matahari bergerak dari Selatan ke Utara (sekitar 21 Maret), digunakan sebagai titik nol koordinat langit.
- **W - WGS 84 (World Geodetic System 1984):** Model standar matematika Bumi yang digunakan dalam sistem GPS dan pemetaan koordinat lintang/bujur untuk akurasi lokasi.
- **X - X-Axis (Sumbu Ekliptika):** Garis imajiner utama dalam sistem koordinat ekliptika yang menghubungkan pengamat dengan titik Aries.
- **Y - Yaumul Rashd:** Hari di mana terjadi fenomena Matahari melintasi tepat di atas Zenit Ka'bah, sehingga bayang-bayang benda tegak lurus mengarah ke kiblat.
- **Z - Zenith:** Titik khayal di bola langit yang berada tepat di atas kepala pengamat ( $90^{\circ}$  dari horizon).

## LAMPIRAN 1: TABEL, GRAFIK, DAN DIAGRAM TEKNIS

Lampiran ini menyajikan data kuantitatif, komparasi algoritma, dan visualisasi matematis yang mendukung seluruh bab dalam buku "**Belajar Falak Dasar**". Data ini disusun untuk memberikan referensi cepat bagi praktisi falak dan pengembang perangkat lunak astronomi.

### I. TABEL DATA DAN KOMPARASI ALGORITMA

**Tabel 1: Perbandingan Karakteristik Tahun Hijriah dan Masehi** Tabel ini menunjukkan perbedaan fundamental antara sistem kamariah murni dan syamsiah tropis yang menjadi landasan perhitungan kalender.

Parameter	Tahun Hijriah (Kamariah)	Tahun Masehi (Syamsiah)
Dasar Siklus	Revolusi Bulan (Sinodis)	Revolusi Bumi (Tropis)
Durasi Rata-rata	354,367 hari	365,2422 hari
Selisih Tahunan	~10,87 hari lebih pendek	Acuan Standar
Siklus Kabisat	30 Tahun (11 Kabisat)	4 Tahun (Kecuali Abad ≠ 400)
Metode Utama	Rukyat & Hisab Imkanur Rukyat	Hisab Astronomis Murni

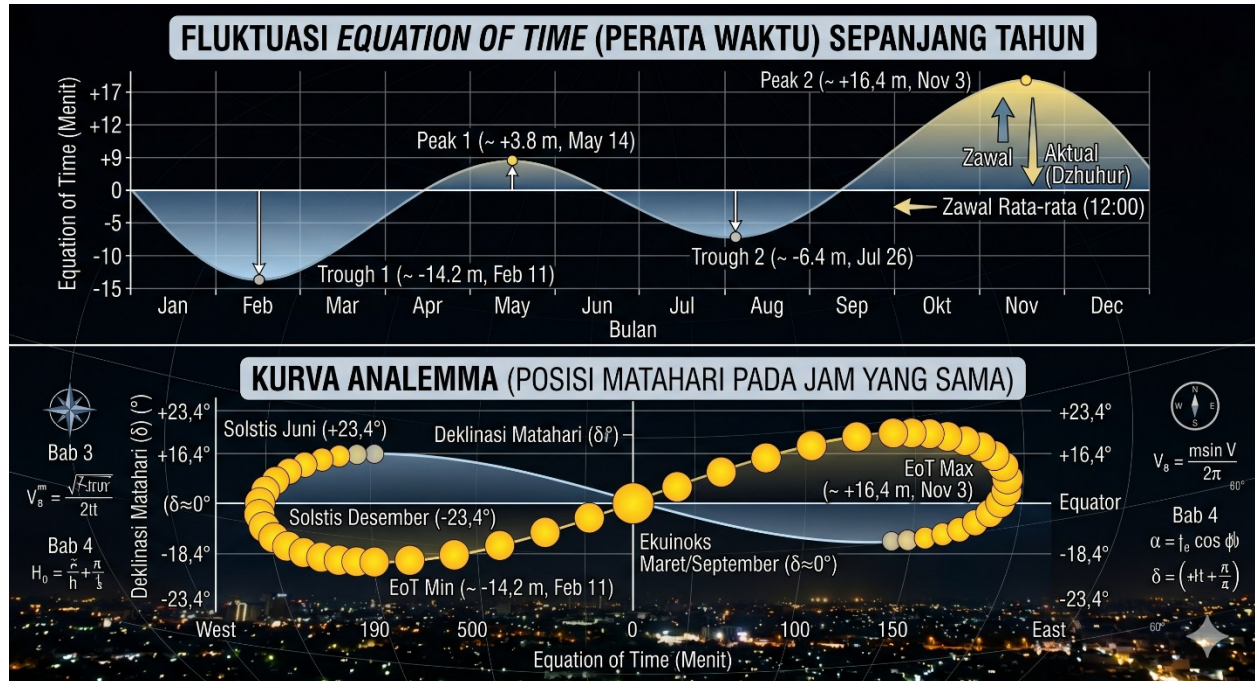
**Tabel 2: Hirarki Akurasi Dataset Ephemeris NASA JPL (DE Series)** Referensi bagi pengembang *Falak Tech* dalam memilih *dataset* biner untuk mesin kalkulasi.

Dataset	Rentang Tahun (Epos)	Akurasi	Rekomendasi Penggunaan
DE200	1600 – 2160 M	Menengah	Kalkulasi Sipil Standar
DE405	1600 – 2200 M	Tinggi	Standar Almanak Astronomi Lama
DE440	1550 – 2650 M	Sangat Tinggi	Navigasi Antariksa Modern
DE441	-3000 – 3000 M	Maksimal	Riset Falak Sejarah & KHGT

**Tabel 3: Parameter Teknis Waktu Shalat dan Koreksi Atmosfer** Kriteria ketinggian matahari (h) yang digunakan dalam algoritma komputasi.

Waktu Shalat	Parameter Ketinggian (h)	Koreksi Tambahan
Subuh	-20° (Kemenag RI)	Refraksi & <i>Atmospheric Extinction</i>
Syuruq	-0° 50' - <i>Dip</i>	Semi-diameter & <i>Dip of Horizon</i>
Dzuhur	H=0 (Transit)	<i>Equation of Time</i> & <i>Ihtiyat</i>
Ashar	$\cot(h)=1+\tan(\phi-\delta)$	Proyeksi Bayangan Gnomon
Maghrib	-0° 50' - <i>Dip</i>	Refraksi, Paralaks, & <i>Dip</i>
Isya	-18°	<i>Astronomical Twilight</i>

## II. KURVA DAN GRAFIK FISIKA ASTRONOMI



**Grafik 1: Fluktuasi Equation of Time (Perata Waktu) Sepanjang Tahun** Grafik ini menggambarkan selisih antara Waktu Surya Sejati dan Waktu Surya Rata-rata yang wajib dikompensasi dalam penentuan waktu Dzuhur.

**Grafik 2: Kurva Analemma (Posisi Matahari pada Jam yang Sama)** Kurva berbentuk angka 8 yang menunjukkan pergeseran deklinasi dan Equation of Time secara simultan dalam satu siklus tahunan.

## III. DIAGRAM GEOMETRIS DAN ARSITEKTUR SISTEM

**Diagram 1: Segitiga Astronomi P-Z-S pada Bola Langit** Diagram fundamental untuk transformasi koordinat dari sistem Ekuatorial ke Horizontal.

**Diagram 2: Distorsi Optis Dip of Horizon** Visualisasi perbedaan antara ufuk hakiki dan ufuk mar'i akibat pengaruh elevasi pengamat.

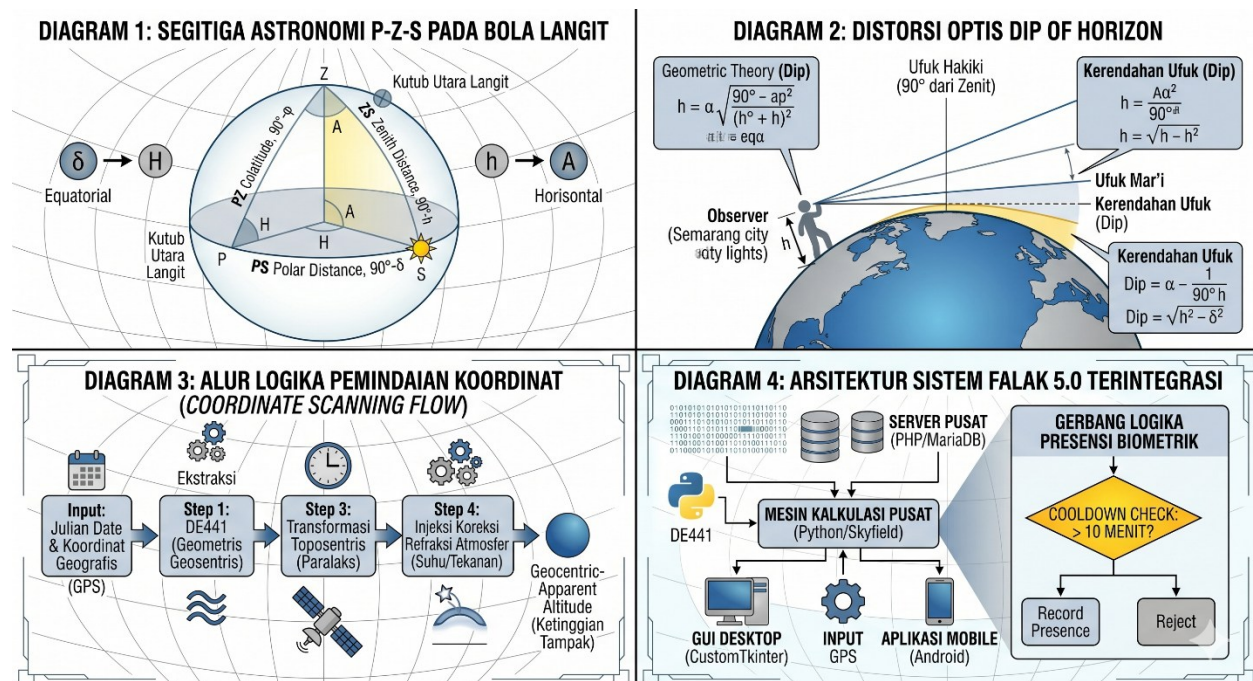
**Diagram 3: Alur Logika Pemindaian Koordinat (Coordinate Scanning Flow)** Bagan alur untuk implementasi kode program dalam mengubah data mentah ephemeris menjadi posisi tampak.

1. **Input:** Julian Date & Koordinat Geografis (GPS).
2. **Step 1:** Ekstraksi Posisi Geometris Geosentris (NASA DE441).
3. **Step 2:** Koreksi Aberasi & Nutasi.

4. **Step 3:** Transformasi ke Toposentris (Koreksi Paralaks).
5. **Step 4:** Injeksi Koreksi Refraksi Atmosfer (berdasarkan suhu/tekanan).
6. **Output:** Geocentric-Apparent Altitude (Ketinggian Tampak).

**Diagram 4: Arsitektur Sistem Falak 5.0 Terintegrasi** Bagan integrasi antara mesin kalkulasi falak dengan sistem otomatisasi presensi biometrik.

- **Backend:** Python (Skyfield + NumPy) + PHP (Laravel/Slim).
- **Database:** MySQL (Menyimpan log identitas dan waktu shalat).
- **Frontend:** CustomTkinter (Desktop) & Android (Mobile).
- **Logic Gate:**
  - *Scan Face* (Face-api.js).
  - *Match Identity?* (Yes).
  - **Cooldown Check:** Apakah waktu saat ini > (Waktu Log Terakhir + 10 Menit)?
  - *If Yes:* Record Presence.
  - *If No:* Reject (Avoid Duplication).



## PENULIS



## KASMUI

- Dosen Kimia, Komputasi, IT, dan AI UNNES, serta Praktisi Ilmu Falak;
- Anggota Majelis Tabligh PDM Kota Semarang dan PWM Jawa Tengah;
- Anggota Tim Pengembang Software KHGT MTT PP Muhammadiyah;
- Website pribadi: <https://hisabmu.com/>, <https://kasmui.cloud/>;
- Minat & Hobi: Computer programming.

# BELAJAR FALAK DASAR

## SINOPSIS:

Sebuah panduan komprehensif yang menyingkap dasar-dasar Ilmu Falak, mengintegrasikan sains modern dan syariat. Pelajari penentuan arah kiblat dan waktu sholat secara akurat, pahami koordinat langit (Asensio Rekta & Deklinasi), serta siklus bulan untuk kalender Hijriah. Dilengkapi panduan praktis penggunaan teleskop dan astrolab, buku ini sangat detail dan mudah diikuti, cocok untuk pemula dan pembelajar tingkat lanjut.

KASMUI