

Integrasi Kriteria Kalender Hijriah Terpadu ke dalam Algoritma Mekanika Benda Langit Otomatis: Pengembangan Perangkat Lunak KHGT Times

Kasmui

Universitas Negeri Semarang

kasmui@mail.unnes.ac.id

Abstrak. *Kalender Hijriah terpadu memerlukan aturan komputasional yang mengubah ijtimak, terbenam Matahari, tinggi Bulan, elongasi, dan urutan hari sipil dari barat ke timur menjadi satu tanggal yang dapat direproduksi. Penelitian ini mengkaji bagaimana KHGT Times versi 7.7 menerjemahkan ambang tinggi geosentrik 5 derajat dan elongasi 8 derajat, bersama dua parameter kalender global, ke dalam prosedur mekanika benda langit otomatis. Audit sains desain dan kode sumber diterapkan pada program Python yang disediakan. Analisis menelusuri skala waktu, pemuatan efemeris, pencarian fase Bulan, transformasi geosentrik dan toposentrik, pemindaian grid global, deteksi titik pertama, dan pembentukan basis data kalender. Perangkat lunak berhasil memisahkan besaran geosentrik KHGT dari besaran pengamatan toposentrik dan menerapkan jalur keputusan global lengkap untuk laporan visibilitas. Sistem juga memadukan data JPL DE441, pencarian peristiwa Skyfield, akselerasi PyEphem, dan ekspor kalender yang dapat direproduksi. Namun, pembangun basis data menggunakan batas sederhana ijtimak pukul 15.00 UTC alih-alih memanggil kernel keputusan lengkap kriteria 5-8 dan parameter global. Oleh karena itu, kebutuhan pengembangan utama adalah konsistensi arsitektur: satu fungsi awal bulan yang teruji harus melayani laporan, pencarian titik pertama, konversi, dan pembentukan basis data. Penelitian ini mengusulkan kernel keputusan bersama, keluaran kaya provenans, uji batas, dan validasi lintas efemeris sebelum penerapan operasional.*

Kata kunci: kalender Hijriah terpadu; hilal; mekanika benda langit; kalender global; KHGT Times

Pengantar untuk Pembaca Umum

Kalender Hijriah Global Tunggal atau KHGT mulai dikenal lebih luas ketika kebutuhan akan kepastian tanggal Hijriah tidak lagi terbatas pada satu kota atau satu negara. Masyarakat kemudian mengajukan pertanyaan yang wajar: mengapa hasil perhitungan di suatu tempat dapat berlaku bagi seluruh dunia, mengapa digunakan batas tinggi Bulan 5 derajat dan elongasi 8 derajat, serta mengapa algoritma memakai pukul 00.00 UTC selain waktu Magrib setempat. Pertanyaan-pertanyaan tersebut perlu dijawab secara terbuka karena penerimaan terhadap sebuah kalender tidak cukup dibangun melalui penyebutan angka dan istilah teknis.

Dokumen ini menjelaskan bahwa KHGT bekerja pada dua lapisan yang harus dibedakan. Lapisan pertama adalah astronomi, yang menghitung ijtimak, terbenam Matahari, posisi Bulan dan Matahari,

tinggi Bulan, serta elongasi. Lapisan kedua adalah aturan kalender, yang mengubah hasil perhitungan itu menjadi keputusan tanggal. Ketelitian astronomi tidak dengan sendirinya menghasilkan kalender global apabila aturan pemberlakuan tanggal belum dinyatakan secara lengkap dan konsisten.

Bagi pembaca umum, hal terpenting adalah memahami bahwa angka 5 derajat dan 8 derajat dalam KHGT merupakan ambang keputusan kalender. Keduanya berkaitan dengan geometri Bulan dan Matahari, tetapi tidak boleh dipahami sebagai jaminan bahwa hilal pasti terlihat oleh setiap mata di setiap lokasi. Keadaan atmosfer, kecerahan langit, kondisi ufuk, kemampuan pengamat, dan alat optik tetap memengaruhi pengamatan nyata. Karena itu, istilah "parameter kalender terpenuhi" lebih tepat daripada pernyataan mutlak bahwa hilal pasti terlihat.

Istilah yang Digunakan

KHGT. Kalender Hijriah Global Tunggal yang menggunakan satu tanggal kalender bagi seluruh dunia dengan parameter yang dinyatakan secara eksplisit.

PKG 1. Cabang keputusan ketika tinggi Bulan geosentris minimal 5 derajat dan elongasi geosentris minimal 8 derajat terpenuhi saat terbenam Matahari sebelum pukul 00.00 UTC.

PKG 2. Cabang koreksi ketika parameter 5 derajat dan 8 derajat terpenuhi sesudah 00.00 UTC di daratan Amerika dan ijtimak telah terjadi sebelum fajar pada kawasan acuan zona waktu paling timur.

Geosentris. Besaran posisi yang dihitung dengan pusat Bumi sebagai titik acuan. Nilai ini dibedakan dari besaran toposentris yang bergantung pada lokasi pengamat di permukaan Bumi.

Dokumen ini juga membedakan Parameter Kalender Global 1 dan Parameter Kalender Global 2, yang selanjutnya disingkat PKG 1 dan PKG 2. PKG 1 menangani keadaan ketika syarat tinggi dan elongasi terpenuhi pada saat terbenam Matahari sebelum pukul 00.00 UTC. PKG 2 menangani kasus koreksi ketika syarat tersebut baru terpenuhi sesudah pukul 00.00 UTC di daratan Amerika, dengan pengaman bahwa ijtimak telah terjadi sebelum fajar di kawasan zona waktu paling timur yang digunakan sebagai acuan.

Pukul 00.00 UTC tidak menggantikan Magrib. Tinggi Bulan dan elongasi tetap diperiksa pada saat Matahari terbenam di lokasi yang dihitung. UTC dipakai sebagai garis waktu bersama agar peristiwa Magrib yang berlangsung bertahap dari timur ke barat dapat ditempatkan dalam satu urutan global. Dengan perbedaan ini, pembaca

dapat melihat bahwa KHGT menggabungkan peristiwa astronomis lokal dengan keputusan tanggal yang berlaku global.

Artikel ilmiah berikut menguraikan bagaimana prinsip tersebut diterjemahkan ke dalam KHGT Times versi 7.7 dan menunjukkan bagian perangkat lunak yang masih memerlukan penyempurnaan. Setelah kesimpulan artikel, disediakan dua puluh pertanyaan kritis beserta pembahasannya. Bagian tanya-jawab itu ditujukan untuk membantu masyarakat, pendidik, pengelola kalender, dan pengembang perangkat lunak memahami dasar pemikiran KHGT tanpa menghilangkan batas antara temuan astronomi, pilihan kriteria, dan keputusan kelembagaan.

Pendahuluan

Kalender Hijriah sederhana dalam landasan astronominya, tetapi rumit dalam pengelolaan globalnya. Dua belas bulan kamariah mengikuti siklus sinodis, namun tanggal kalender yang digunakan suatu komunitas bergantung pada cara aturan hukum atau kelembagaan menafsirkan ijtimaq, terbenam Matahari, visibilitas hilal pertama, cakupan wilayah, dan batas tanggal sipil. Komputer dapat menghitung posisi Bulan dengan presisi numerik tinggi, tetapi tetap menghasilkan kalender yang diperselisihkan apabila aturan keputusan tidak lengkap atau diterapkan secara tidak konsisten. Karena itu, komputasi kalender memiliki dua lapisan yang berbeda: mekanika benda langit menyediakan waktu dan posisi, sedangkan kriteria kalender mengubah besaran tersebut menjadi tanggal normatif. Literatur penanggalan telah lama menekankan bahwa algoritma konversi hanya akan sestabil aturan dan epok yang menjadi dasarnya. Kajian historis juga menunjukkan bahwa keseragaman kalender merupakan persoalan kelembagaan sekaligus matematis.¹²

Dalam kalender Islam, peralihan dari praktik observasi ke komputasi di muka menambahkan satu tuntutan lain: algoritma harus mempertahankan makna kriteria. Aturan visibilitas lokal menanyakan apakah hilal dapat diamati pada ufuk tertentu. Aturan kalender global menanyakan apakah konfigurasi yang memenuhi syarat di mana pun dalam domain bumi yang diterima dapat memberlakukan awal bulan bagi seluruh pengguna. Kedua pertanyaan itu memakai sebagian variabel astronomis yang sama, tetapi berbeda dalam cakupan spasial dan penanganan batas tanggal sipil internasional. Ilyas membingkai

¹E. M. Reingold and Nachum Dershowitz, *Calendrical Calculations: The Ultimate Edition*, 4th ed. (Cambridge: Cambridge University Press, 2018), 87-121.

²E. G. Richards, *Mapping Time: The Calendar and Its History* (Oxford: Oxford University Press, 1998), 231-248.

persoalan modern melalui garis tanggal Bulan dan distribusi global visibilitas pertama, dengan menunjukkan bahwa perhitungan lokal tidak dapat sekadar diberi label ulang sebagai kalender global. Sintesisnya kemudian menempatkan kriteria hilal dalam kerangka kalender internasional dan menegaskan perlunya menghubungkan peta visibilitas dengan keputusan kalender.³⁴

Penelitian hilal modern juga mengingatkan agar satu ambang tidak diperlakukan sebagai gambaran universal visibilitas mata telanjang. Odeh menyusun suatu kriteria dari 737 pengamatan dengan memakai busur pandang toposentrik dan lebar sabit, disertai kelas visibilitas yang berbeda untuk pengamatan tanpa alat dan dengan alat optik. Doggett dan Schaefer membandingkan garis tanggal Bulan hasil prediksi dengan pengamatan terkoordinasi dan menunjukkan bahwa umur Bulan atau selang waktu saja tidak dapat diandalkan. Belakangan, Faid dan rekan-rekan meninjau kriteria modern terhadap basis data pengamatan yang jauh lebih besar dan menemukan perbedaan penting dalam tingkat kontradiksi serta perilaku prediktifnya. Kajian mereka tentang metodologi konfirmasi juga menunjukkan bahwa laporan rukyat memerlukan waktu, lokasi, metode optik, konteks atmosfer, dan geometri yang konsisten secara internal sebelum dapat dijadikan bukti. Kajian-kajian ini membahas visibilitas pengamatan. Kriteria kalender terpadu yang diterapkan dalam KHGT Times adalah ambang kalender dengan aturan pemberlakuan global; karena itu, kriteria tersebut harus dinilai sebagai algoritma keputusan, bukan disajikan sebagai model psikofisis visibilitas yang lengkap.⁵⁶⁷⁸

Program sumber yang dikaji di sini adalah revisi KHGT Times versi 7.7, yaitu aplikasi desktop Python yang mengintegrasikan kalender Hijriah dan Gregorian, analisis hilal, peta global, waktu salat, perhitungan kiblat, modul gerhana, dan ekspor laporan. Penguraian statis

³Mohammad Ilyas, *A Modern Guide to Astronomical Calculations of Islamic Calendar, Times and Qibla* (Kuala Lumpur: Berita Publishing, 1984), 77-115.

⁴Mohammad Ilyas, "Lunar Crescent Visibility Criterion and Islamic Calendar," *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 35 (1994): 425-461.

⁵ Mohammad Sh. Odeh, "New Criterion for Lunar Crescent Visibility," *Experimental Astronomy* 18 (2004): 39-64.

⁶Leroy E. Doggett and Bradley E. Schaefer, "Lunar Crescent Visibility," *Icarus* 107, no. 2 (1994): 388-403.

⁷Muhamad Syazwan Faid et al., "Assessment and Review of Modern Lunar Crescent Visibility Criterion," *Icarus* 412 (2024): 115970.

⁸Muhamad Syazwan Faid et al., "Confirmation Methodology for a Lunar Crescent Sighting Report," *New Astronomy* 103 (2023): 102063.

menemukan 17.834 baris, empat kelas, 329 definisi fungsi, dan 231 simpul impor, termasuk impor berulang dan impor lokal-fungsi. Kelas utama memuat efemeris biner JPL DE441 melalui Skyfield dan menyediakan beberapa jalur yang berkaitan dengan penentuan awal bulan: laporan visibilitas lokal, pemindaian global, pencarian titik pertama pada lokasi berpenduduk, konversi kalender, dan pembangun basis data Hijriah. Cakupan yang luas ini berguna, tetapi menimbulkan risiko rekayasa perangkat lunak. Jika setiap modul menerapkan aturan awal bulan secara mandiri, ijtihak yang sama dapat memperoleh tanggal berbeda bergantung pada menu yang memanggilnya.

Artikel ini mengajukan pertanyaan: sejauh mana KHGT Times mengintegrasikan kriteria kalender Hijriah terpadu ke dalam algoritma mekanika benda langit yang koheren, dan perubahan apa yang diperlukan untuk penggunaan operasional yang dapat direproduksi? Tujuannya bukan menetapkan kewenangan keagamaan suatu kalender. Tujuannya ialah mengevaluasi apakah kode menyatakan aturannya secara transparan, memisahkan kerangka acuan, menerapkan kondisi batas global secara konsisten, dan menghasilkan tanggal melalui satu jalur keputusan yang dapat diaudit. Kontribusinya berupa pemetaan kriteria ke kode, penilaian arsitektur, dan spesifikasi pengembangan untuk kernel awal bulan bersama.

Kajian perangkat lunak sebelumnya sering berfokus pada perhitungan atau perbandingan indeks visibilitas. HilalPy, misalnya, menyediakan lingkungan Python yang dapat digunakan kembali untuk menerapkan kriteria rukyat hilal. Ruang lingkup KHGT Times berbeda karena berupaya menghubungkan efemeris berpresisi tinggi, logika pemberlakuan global, konversi tanggal, dan basis data kalender persisten dalam satu aplikasi. Kebaruan yang dibahas di sini bukan kurva regresi baru, melainkan persoalan integrasi antara mesin peristiwa astronomis dan mesin keadaan kalender global.⁹

Metode

Penelitian menggunakan analisis kasus sains desain yang dipadukan dengan audit kode sumber terstruktur. Artefaknya adalah berkas sumber revisi KHGT Times versi 7.7 yang disediakan. Audit pertama-tama mengidentifikasi setiap fungsi yang terlibat dalam pemuatan efemeris, pencarian ijtihak, pencarian terbenam Matahari, konversi

⁹Muhamad Syazwan Faiz et al., "HilalPy: Software to Analyse Lunar Sighting Criteria," *Software Impacts* 18 (2023): 100593.

koordinat, evaluasi kriteria, pemindaian global, pemilihan titik pertama, konversi tanggal, dan pembangunan basis data. Selanjutnya, audit menelusuri variabel yang diteruskan di antara fungsi-fungsi tersebut dan membandingkan cabang yang diterapkan dengan aturan yang dijelaskan dalam dokumentasi aplikasi. Bagian kode yang relevan mencakup `get_new_moons_in_range`, `calculate_khgt_1st_of_month`, `generate_visibility_report`, `calculate_global_hilal`, `calculate_first_point`, dan `_build_hijri_db_thread`.¹⁰

Tahap kedua memetakan setiap kondisi kalender ke keadaan program yang dapat diamati. Kondisi 5-8 direpresentasikan sebagai tinggi Bulan geosentrik sekurang-kurangnya 5 derajat dan elongasi Matahari-Bulan geosentrik sekurang-kurangnya 8 derajat, yang dievaluasi saat Matahari terbenam setempat. Parameter Kalender Global 1 direpresentasikan oleh terpenuhinya kondisi tersebut sebelum pukul 00.00 UTC pada akhir tanggal ijtima. Parameter Kalender Global 2 direpresentasikan oleh pemenuhan kondisi setelah pukul 00.00 UTC di daratan Amerika, disertai ijtima sebelum fajar astronomis di Gisborne, Selandia Baru. Audit juga mencatat pengecualian, resolusi grid, perkiraan zona waktu, cabang cadangan, dan perbedaan antara grid global kasar dengan basis data kota.

Tahap ketiga memeriksa provenans numerik. Program menggunakan skala waktu Skyfield dan vektor posisi JPL untuk Bumi, Matahari, dan Bulan; pencarian almanak Skyfield untuk bulan baru serta peristiwa terbit-terbenam; posisi terestrial WGS84 untuk perhitungan toposentrik; PyEphem dalam beberapa pencarian yang dipercepat; serta persamaan astronomi bola standar untuk tinggi geosentrik. Peninjauan memeriksa apakah besaran yang diberi label geosentrik atau toposentrik dihasilkan dari titik asal yang sesuai dan apakah masukan atmosfer hanya memasuki jalur toposentrik semu. Perlakuan standar astronomi bola dan perhitungan posisi praktis menjadi model acuan untuk peninjauan ini.^{11,12}

Tahap keempat memperlakukan konsistensi sebagai sifat perangkat lunak yang dapat diuji. Untuk setiap ijtima C dan efemeris E, semua

¹⁰Kasmui, KHGT Times version 7.7 revision, Python source code, 2026, lines 7333-7375, 7745-8149, 9984-10092, and 14796-14883.

¹¹Peter Duffett-Smith and Jonathan Zwart, *Practical Astronomy with Your Calculator or Spreadsheet*, 4th ed. (Cambridge: Cambridge University Press, 2011), 35-64.

¹²W. M. Smart, *Textbook on Spherical Astronomy*, 6th ed., rev. R. M. Green (Cambridge: Cambridge University Press, 1977), 39-71.

modul aplikasi harus menghasilkan tanggal awal bulan D yang sama apabila diberi konfigurasi kriteria K yang sama. Hal ini dapat dinyatakan sebagai $D = F(C, E, K)$, dengan F sebagai satu fungsi keputusan yang berwenang. Audit membandingkan F efektif yang digunakan laporan visibilitas lengkap dengan jalan pintas yang digunakan pembangun basis data. Persentase akurasi pengamatan tidak dihitung karena artefak yang diberikan tidak menyertakan korpus validasi berversi, tabel resmi awal bulan KHGT yang dapat dibaca mesin, atau pengujian unit otomatis. Karena itu, temuan penelitian bersifat arsitektural dan algoritmis, bukan sertifikasi kalender yang dihasilkan.

Hasil dan Pembahasan

Pengodean Aturan Kalender Terpadu

KHGT Times menyatakan tiga komitmen konseptual dalam dokumentasi internalnya: kesatuan domain ufuk bumi, pemberlakuan visibilitas yang memenuhi syarat, dan satu tanggal untuk seluruh dunia. Ambang inti dioperasikan sebagai tinggi sekurang-kurangnya 5 derajat dan elongasi sekurang-kurangnya 8 derajat. Dalam rutin visibilitas terperinci, kedua besaran tersebut bersifat geosentrik. Pilihan ini penting. Tinggi Bulan toposentrik dapat berbeda secara berarti dari tinggi geosentrik karena paralaks Bulan besar, terutama di dekat ufuk. Suatu kriteria tidak dapat direproduksi jika satu implementasi menerapkan 5 derajat pada nilai geosentrik, sedangkan implementasi lain menerapkannya pada nilai semu toposentrik.

Kode menangani perbedaan ini dengan jelas dalam `generate_visibility_report`. Kode mengamati Bulan dan Matahari dari pusat Bumi, memperoleh asensio rekta dan deklinasi semu, menghitung waktu sideris lokal dari waktu sideris semu Greenwich dan bujur, menurunkan sudut jam, serta mengevaluasi tinggi melalui hubungan standar $\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H$. Elongasi adalah jarak sudut semu antara vektor Matahari dan Bulan geosentrik. Secara paralel, kode membangun pengamat WGS84 dan meminta Skyfield menghitung tinggi serta azimuth semu toposentrik dengan memakai suhu dan tekanan yang dimasukkan pengguna. Kedua jalur ditampilkan secara terpisah, bukan dicampur tanpa penjelasan.¹³

Pemisahan ini tepat secara ilmiah karena perbandingan pengamatan memerlukan ufuk lokal, refraksi, dan paralaks, sedangkan ambang KHGT

¹³Jean Meeus, *Astronomical Algorithms*, 2nd ed. (Richmond, VA: Willmann-Bell, 1998), 91-103, 341-349.

dalam kode secara eksplisit menggunakan nilai geosentrik. Program juga menghitung umur Bulan, selang antara terbenam Matahari dan terbenam Bulan, fraksi tersinari, tinggi relatif, semidiameter Bulan, lebar sabit, dan nilai q Yallop. Besaran-besaran tersebut memperkaya laporan, tetapi tidak menggantikan keputusan 5-8. Literatur batas Danjon menjelaskan mengapa elongasi kecil memerlukan diagnosis terpisah: panjang fisik dan kecerlangan sabit yang sangat tipis berkurang di dekat Matahari, tetapi perkiraan batas praktis bergantung pada asumsi optik dan atmosfer. Perangkat lunak paling kuat ketika menyajikan model-model tersebut sebagai perbandingan, bukan meleburkannya menjadi satu putusan universal.¹⁴

Masalah terminologi yang tersisa adalah frasa 'kriteria visibilitas'. Uji 5-8 dalam kode merupakan kondisi kalender biner, bukan prediksi lengkap pengamatan tanpa alat. Uji tersebut tidak secara langsung memodelkan ekstingsi, transparansi ufuk, luminans langit, ketajaman pengamat, atau bukaan instrumen. Antarmuka sebaiknya memberi label hasil sebagai 'ambang kalender KHGT terpenuhi' dan memakai istilah 'terlihat' hanya untuk keluaran dari model pengamatan yang dinyatakan. Rumusan tersebut akan mengurangi kekeliruan kategori ketika pengguna membandingkan KHGT dengan nilai MABIMS, Odeh, Ilyas, Danjon, atau Yallop.

Mekanika Benda Langit dan Penanganan Waktu

Landasan numeriknya adalah Development Ephemeris JPL yang dibaca melalui Skyfield. Efemeris JPL merupakan integrasi numerik yang dicocokkan, bukan rumus orbit rata-rata sederhana. DE440 dan DE441 memasukkan model dinamika modern serta data pengamatan yang luas; DE441 mengorbankan sebagian presisi Bulan pada era kini demi rentang integrasi yang jauh lebih panjang. KHGT Times memuat berkas bernama `de441-new.bsp` dan memerlukan segmen Bumi, Matahari, dan Bulan. Pilihan ini mendukung geometri vektor yang konsisten pada ijtimak, elongasi, dan transformasi koordinat, asalkan berkas biner yang didistribusikan diberi versi dan cakupan sebenarnya dicatat pada setiap keluaran.¹⁵

Skyfield menyediakan objek skala waktu dan mengubah vektor efemeris menjadi posisi semu. Susunan ini menyerahkan presesi, nutasi,

¹⁴Amir Hasanzadeh, "Study of Danjon Limit in Moon Crescent Sighting," *Astrophysics and Space Science* 339 (2012): 211-221.

¹⁵Ryan S. Park et al., "The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441," *Astronomical Journal* 161, no. 3 (2021): 105.

aberasi, rotasi Bumi, dan transformasi kerangka acuan kepada pustaka astronomi yang dipelihara. Transformasi tersebut bukan rincian implementasi yang dapat diganti sembarangan. Praktik almanak standar membedakan waktu terestrial, waktu universal, rotasi Bumi, dan koordinat yang bergantung pada pengamat. Literatur presesi IAU dan asal-intermediat-langit menunjukkan pilihan presisi serta konvensi yang tertanam dalam transformasi modern. Program memperoleh manfaat dari pustaka yang menerapkan konvensi ini secara konsisten daripada mereproduksi deret panjang di dalam kode GUI.¹⁶¹⁷¹⁸

Ijtimak ditemukan dengan memanggil fungsi diskret fase Bulan Skyfield pada interval waktu terbatas dan memilih indeks fase nol. Waktu bulan baru disimpan secara internal sebagai tanggal Julian Waktu Terestrial. Keluaran kalender kemudian mengubah peristiwa terpilih ke UTC untuk batas sipil. Ini merupakan pola umum yang tepat: perhitungan dinamika menggunakan skala waktu seragam, sedangkan keputusan politik atau kalender menggunakan skala waktu sipil yang dinyatakan. Literatur pewaktuan mengingatkan bahwa stempel waktu tanpa skala eksplisit dapat menimbulkan kesalahan yang jauh lebih besar daripada presisi numerik efemeris. Karena itu, KHGT Times sebaiknya menyertakan TT, UTC, pengenalan efemeris, dan versi perangkat lunak dalam keluaran yang dapat dibaca mesin, meskipun laporan untuk pembaca hanya menampilkan waktu lokal.¹⁹

Terbenam Matahari diperoleh dengan almanak terbit-terbenam Skyfield pada lokasi WGS84. Masukan lokal diubah ke UTC dengan selisih numerik. Untuk grid global, kode memperkirakan waktu terbenam UTC dari bujur dan mencari dalam jendela empat jam di sekitar perkiraan tersebut. Untuk pemindaian kota, kode menurunkan selisih zona waktu kasar dari bujur. Peristiwa astronomis itu sendiri dihitung dari lokasi, sehingga perkiraan zona waktu terutama memengaruhi interval pencarian dan tampilan. Meskipun demikian, selisih tetap berbasis bujur

¹⁶Sean P. Urban and P. Kenneth Seidelmann, eds., *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 3rd ed. (Mill Valley, CA: University Science Books, 2013), 15-66.

¹⁷N. Capitaine, P. T. Wallace, and J. Chapront, "Expressions for IAU 2000 Precession Quantities," *Astronomy and Astrophysics* 412, no. 2 (2003): 567-586.

¹⁸N. Capitaine and P. T. Wallace, "High Precision Methods for Locating the Celestial Intermediate Pole and Origin," *Astronomy and Astrophysics* 450, no. 2 (2006): 855-872.

¹⁹Jason Eastman, Robert Siverd, and B. Scott Gaudi, "Achieving Better than 1 Minute Accuracy in the Heliocentric and Barycentric Julian Dates," *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 122, no. 894 (2010): 935-946.

tidak merepresentasikan zona waktu resmi, perubahan waktu musim panas, atau zona setengah jam. Mesin kalender produksi harus memisahkan pencarian peristiwa astronomis dari inferensi zona waktu sipil dan memakai pengenalan zona IANA hanya untuk penyajian.

Algoritma posisi Matahari dapat mencapai ketidakpastian sudut yang sangat kecil apabila waktu, koordinat, dan konvensi dikendalikan. Ketidakpastian kalender praktis yang dibahas di sini berbeda. Di dekat ambang tegas, perubahan kecil pada tinggi atau elongasi dapat membalik tanggal biner. Karena itu, perangkat lunak harus menampilkan nilai tanpa pembulatan yang digunakan dalam keputusan, menyatakan apakah pertidaksamaan bersifat inklusif, dan mempertahankan presisi yang memadai untuk audit. KHGT Times memakai $\geq$ untuk kedua batas, tetapi kebanyakan laporan membulatkan menjadi satu atau dua desimal. Tinggi yang ditampilkan sebesar 5,00 derajat dapat menyembunyikan nilai internal yang sedikit di bawah atau di atas batas. Laporan sebaiknya menunjukkan sekurang-kurangnya empat tempat desimal dalam lampiran provenans sambil mempertahankan pembulatan yang ramah pembaca pada tabel utama.²⁰

Pemindaian Global dan Dua Parameter Kalender

Jalur keputusan lengkap dimulai dari terbenam Matahari setempat lalu meluas secara global. Jika titik lokal terpilih memenuhi kondisi geosentrik 5-8 dan terbenam Matahari terjadi sebelum batas 00.00 UTC berikutnya, kode menandai Parameter 1 sebagai terpenuhi. Jika titik lokal belum menyelesaikan kasus, aplikasi memindai bujur dari 180 derajat timur sampai 180 derajat barat dalam langkah 15 derajat dan lintang dari 60 derajat selatan sampai 60 derajat utara dalam langkah 15 derajat. Pada setiap titik grid, kode mencari waktu terbenam Matahari, memeriksa apakah peristiwa mendahului 00.00 UTC, menghitung elongasi dan tinggi geosentrik, lalu berhenti pada titik pertama yang memenuhi syarat.

Perulangan ini membuat aturan global dapat dijalankan, tetapi semantiknya memerlukan kehati-hatian. Grid mencakup titik laut sekalipun laporan memberi label hasil sebagai 'darat/laut'. Spesifikasi kalender terpadu yang mensyaratkan daratan utama tidak dapat menyamakan titik grid di laut dengan lokasi daratan utama berpenduduk. Di bagian lain, perangkat lunak memakai basis data kota

²⁰Ibrahim Reda and Afshin Andreas, "Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications," *Solar Energy* 76, no. 5 (2004): 577-589.

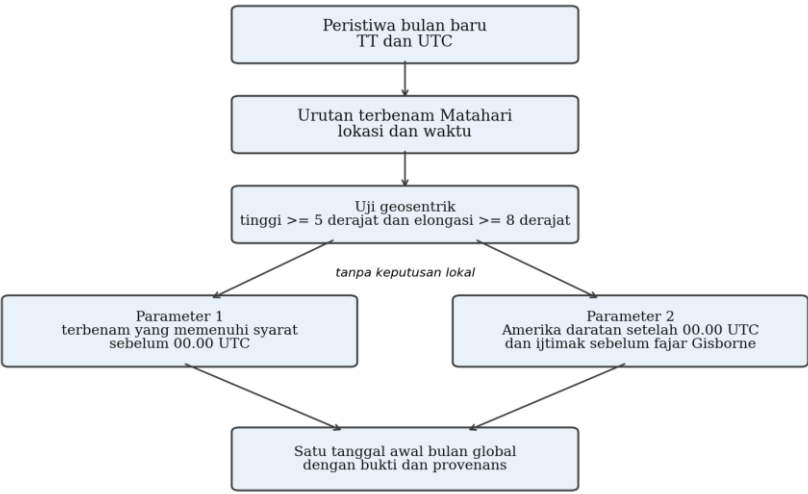
dan secara eksplisit mengecualikan pulau tertentu dalam modul titik pertama. Kedua pendekatan itu menentukan domain pencarian yang berbeda. Kernel keputusan harus menerima mask domain bervariasi: seluruh permukaan bumi, hanya daratan, hanya daratan utama, atau himpunan titik administratif bernama. Setiap keluaran harus melaporkan domain yang diterapkan.

Parameter 2 dievaluasi ketika Parameter 1 tidak terpenuhi. Kode menghitung fajar astronomis di Gisborne dengan ufuk Matahari -18 derajat dan memeriksa apakah ijtimak terjadi sebelum fajar tersebut. Selanjutnya, kode mencari kelompok kota terpilih di daratan Amerika untuk waktu terbenam setelah 00.00 UTC yang memenuhi 5-8. Jika kedua kondisi terpenuhi, hari sipil berikutnya ditetapkan sebagai hari pertama global; jika tidak, awal bulan ditunda. Cabang ini mewujudkan perlindungan yang dimaksudkan agar tanggal tidak dimulai di timur jauh sebelum ijtimak, sekaligus memungkinkan zona pengamatan barat yang memenuhi syarat memberlakukan tanggal secara global.

Gambar 1 merangkum logika yang diterapkan. Ciri pentingnya adalah bahwa ijtimak saja tidak menentukan tanggal dalam jalur lengkap. Ijtimak memicu rangkaian peristiwa terbenam Matahari, perhitungan kerangka acuan, uji domain spasial, dan cabang batas UTC. Inilah alasan utama mengapa jalan pintas dalam pembangun basis data menimbulkan konsekuensi.

Tabel 1. Pemetaan aturan kalender terpadu ke operasi program

Komponen kriteria	Operasi yang diterapkan	Temuan audit
Ijtimak	Pencarian fase Bulan Skyfield; indeks fase 0	Memakai TT secara internal dan UTC untuk batas sipil
Tinggi ≥ 5 derajat	Asensio rekta/deklinasi semu geosentrik ditransformasikan dengan waktu sideris lokal	Kerangka acuan sesuai dengan aturan KHGT yang dinyatakan
Elongasi ≥ 8 derajat	Jarak sudut semu Matahari-Bulan geosentrik	Dievaluasi secara inklusif dengan $\geq$
Parameter 1	Terbenam Matahari yang memenuhi syarat sebelum 00.00 UTC	Grid kasar dapat mencakup titik laut
Parameter 2	Terbenam Matahari di daratan Amerika setelah 00.00 UTC ditambah ijtimak sebelum fajar - 18 derajat di Gisborne	Cakupan kota dan klasifikasi daratan utama memerlukan pemberian versi
Basis data kalender	Hari berikutnya jika jam ijtimak < 15 UTC; jika tidak, dua hari berikutnya	Jalan pintas tidak setara dengan keputusan global 5-8 yang lengkap



Gambar 1. Alur keputusan yang diterapkan oleh jalur visibilitas KHGT lengkap

Deteksi Titik Pertama dan Pembentukan Kalender

Modul titik pertama memakai pencarian lokasi bernama yang lebih rapat daripada grid 15 derajat. Dimulai dari ijtimak sebelumnya dan berikutnya di sekitar tanggal yang diminta, modul mengevaluasi hingga empat hari berturut-turut. PyEphem mencari waktu terbenam Matahari untuk setiap kota, sedangkan Skyfield menghitung elongasi dan tinggi geosentrik pada peristiwa tersebut. Kota yang memenuhi syarat diurutkan menurut waktu terbenam, lalu peristiwa paling awal pada hari pertama yang memenuhi syarat dipilih. Desain hibrida ini pragmatis: PyEphem menyediakan perkiraan peristiwa dengan cepat, sedangkan Skyfield dan efemeris JPL menyediakan geometri kriteria.

Pendekatan hibrida juga menimbulkan kewajiban validasi. Waktu peristiwa dari dua pustaka dapat berbeda karena nilai bawaan refraksi, konvensi tepi Matahari, masukan orientasi Bumi, dan toleransi pencarian numerik. Kode mengubah waktu terbenam PyEphem menjadi waktu Skyfield sehingga geometri berikutnya tetap konsisten secara internal, tetapi peristiwa yang dipilih harus dibandingkan dengan perhitungan murni Skyfield. Rangkaian uji regresi dapat mengambil sampel titik khatulistiwa, lintang menengah, dekat kutub, timur, dan barat, lalu menetapkan selisih maksimum waktu terbenam yang terdokumentasi.

Rangkaian yang sama harus mencakup tanggal dekat 00.00 UTC dan nilai dalam jarak 0,05 derajat dari setiap ambang 5-8.

Basis data Hijriah persisten dibentuk tahun demi tahun. Hubungan perkiraan bulan sinodis memperkirakan bulan baru yang diharapkan, pencarian almanak menemukan peristiwa fase sebenarnya, dan `calculate_khgt_1st_of_month` menghasilkan awal hari sipil. Awal bulan berikutnya dihitung dengan cara yang sama, lalu selisih yang dibulatkan menjadi 29 atau 30 hari. Konstruksi ini lebih baik daripada pergiliran panjang bulan karena mempertahankan hasil keputusan bagi setiap lunasi. Konstruksi tersebut juga memungkinkan konversi Gregorian-Hijriah tanpa menghitung ulang seluruh langit untuk setiap permintaan pengguna.

Temuan kritisnya adalah `calculate_khgt_1st_of_month` tidak memanggil rutin global 5-8. Fungsi tersebut mengambil jam UTC ijtimak dan menghasilkan hari berikutnya jika jamnya sebelum 15.00 UTC; jika tidak, menghasilkan dua hari berikutnya. Komentarnya menafsirkan 15.00 UTC sebagai pengganti fajar di Selandia Baru. Hal itu mungkin merupakan perkiraan praktis untuk sebagian kasus, tetapi mengabaikan tinggi, elongasi, kronologi terbenam Matahari, domain pencarian, dan dua cabang parameter eksplisit. Akibatnya, laporan visibilitas dan basis data kalender yang dihasilkan dapat berbeda meskipun memakai efemeris yang sama.

Ketidakkonsistenan ini bukan sekadar persoalan mutu kode. Identitas kalender bergantung pada fungsi awal bulan. Jika satu menu memakai pemindaian global lengkap, sedangkan konversi dan tampilan kalender bergantung pada basis data yang dihasilkan melalui jalan pintas, pengguna dapat memperoleh jawaban yang bertentangan tanpa penjelasan yang terlihat. Perangkat lunak harus mengganti jalan pintas itu dengan fungsi bersama seperti `decide_month_start(conjunction, ephemeris, criterion, domain)`. Fungsi tersebut harus menghasilkan tanggal beserta objek bukti terstruktur yang memuat titik yang memenuhi syarat, waktu terbenam UTC, tinggi, elongasi, cabang parameter, fajar Gisborne, dan alasan cadangan. Laporan, konverter, peta titik pertama, dan pembangun basis data harus menggunakan hasil yang sama.

Arsitektur Perangkat Lunak dan Keterulangan

KHGT Times diterapkan sebagai kelas besar yang berpusat pada GUI. Hal ini memudahkan fitur ditampilkan secara interaktif, tetapi mengikat perhitungan astronomis dengan keadaan widget, pemformatan teks,

akses jaringan, pembuatan plot, dan utas latar belakang. Sebagai contoh, `generate_visibility_report` membaca kolom masukan secara langsung, menghitung astronomi, memindai dunia, dan menyusun string penyajian dalam satu fungsi. Pembangun basis data juga memperbarui widget ketika melakukan perhitungan. Keterikatan seperti ini menyulitkan pengujian otomatis karena kriteria tidak dapat dipanggil tanpa membangun keadaan aplikasi.

Desain yang lebih andal akan memisahkan empat lapisan. Lapisan efemeris menyediakan fungsi murni untuk ijtimak, terbenam Matahari, vektor semu, tinggi, dan elongasi. Lapisan kriteria menerima peristiwa numerik dan menghasilkan keputusan tanpa akses GUI. Lapisan kalender menyimpan awal bulan, panjang bulan, provenans, dan indeks konversi. Lapisan penyajian menampilkan tabel, peta, kalender, dan label multibahasa. Pemisahan ini memungkinkan kernel kriteria yang sama dijalankan dalam aplikasi desktop, validator baris perintah, layanan web, atau pembangun kalender secara kelompok.

Keterulangan juga memerlukan pemberian versi data secara eksplisit. Pemuat saat ini mensyaratkan `de441-new.bsp`, tetapi nama berkas saja tidak membuktikan segmen kernel atau pemotongan yang didistribusikan. Aplikasi harus menghitung dan mencatat intisari SHA-256, cakupan kernel, versi Skyfield, versi data skala waktu, dan konfigurasi kriteria. Basis data kalender tidak seharusnya hanya menyimpan tanggal dan panjang bulan, melainkan juga bukti yang diperlukan untuk membangun kembali tanggal tersebut. Bukti itu dapat berupa JSON ringkas dan dapat berdampingan dengan struktur berorientasi tampilan yang ada.

Audit tidak menemukan kerangka pengujian unit atau asersi bawaan dalam sumber yang disediakan. Ketiadaan ini sangat penting pada batas percabangan. Rangkaian minimum harus mencakup: ijtimak tepat sebelum dan sesudah batas fajar Gisborne; terbenam Matahari tepat sebelum dan sesudah 00.00 UTC; tinggi 4,9999 dan 5,0000 derajat; elongasi 7,9999 dan 8,0000 derajat; kondisi tanpa terbenam pada lintang tinggi; titik laut yang memenuhi syarat diikuti daratan utama yang tidak memenuhi; serta pasangan bulan yang menghasilkan 29 dan 30 hari. Uji properti harus memastikan bahwa setiap bulan memiliki 29 atau 30 hari, awal yang berurutan selalu meningkat, dan setiap modul menghasilkan tanggal yang sama untuk objek keputusan yang sama.

Validasi eksternal harus memakai dua acuan independen. Pertama, ijtimak dan posisi semu dapat dibandingkan dengan JPL Horizons atau implementasi lain yang memakai kernel serta skala waktu yang sama.

Kedua, awal bulan akhir dapat dibandingkan dengan tabel resmi KHGT berversi. Perbedaan harus diklasifikasikan, bukan dirata-ratakan: perbedaan efemeris, konvensi terbenam Matahari, ketidakcocokan kerangka koordinat, perbedaan mask domain, batas ambang, atau penafsiran aturan kalender. Persentase kesesuaian keseluruhan tanpa kategori tersebut tidak akan mengungkap penyebab perbedaan.

Astronomi Islam tradisional mengembangkan tabel dan instrumen agar aturan penentuan waktu dapat diperiksa dan diulang dalam konvensi ilmiah pada zamannya. Perangkat lunak modern harus mempertahankan keutamaan epistemik tersebut. Pengguna seharusnya dapat menelusuri tanggal kalender cetak kembali ke ijtimak, waktu-waktu terbenam yang relevan, geometri yang memenuhi syarat, dan cabang kriteria. Otomatisasi dapat dipercaya ketika memperpendek rantai itu tanpa menyembunyikannya.²¹

Tabel 2. Risiko utama terhadap keterulangan dan kendali pengembangan

Risiko	Akibat	Kendali yang diperlukan
Banyak implementasi awal bulan	Menu yang berbeda dapat menetapkan tanggal berbeda	Satu kernel keputusan murni digunakan di semua bagian
Grid global kasar	Titik pertama yang memenuhi syarat dapat terlewat atau salah lokasi	Penghalusan kronologis dari kasar ke halus
Ambiguitas laut dan daratan utama	Aturan spasial berubah tanpa terlihat	Mask domain daratan/daratan utama berversi
Keluaran ambang yang dibulatkan	Keputusan batas tidak dapat diperiksa secara independen	Simpan dan tampilkan nilai keputusan dengan presisi penuh
Perhitungan yang terikat GUI	Pengujian otomatis menjadi sulit	Pisahkan lapisan efemeris, kriteria, kalender, dan penyajian
Artefak efemeris tanpa versi	Hasil tidak dapat direproduksi secara tepat	Catat hash kernel, cakupan, pustaka, dan versi skala waktu

Strategi Verifikasi dan Bukti Pengujian

Verifikasi harus dimulai dengan pengujian unit deterministik untuk transformasi matematis. Dengan asensio rekta, deklinasi, lintang

²¹David A. King, In Synchrony with the Heavens: Studies in Astronomical Timekeeping and Instrumentation in Medieval Islamic Civilization, vol. 1 (Leiden: Brill, 2004), 3-32.

pengamat, bujur, dan waktu sideris semu Greenwich yang tetap, fungsi tinggi geosentrik harus mereproduksi nilai astronomi bola yang dihitung secara independen dalam toleransi yang dinyatakan. Rutin jarak sudut harus diuji dengan konfigurasi yang geometrinya diketahui secara analitis, termasuk jarak nol, kuadratur, oposisi, dan posisi yang melintasi batas asensio rekta 0 derajat. Pengujian ini memisahkan kesalahan matematis dari perbedaan efemeris atau pencarian peristiwa. Pengujian juga harus memastikan bahwa tipe hasil skalar dan larik NumPy menghasilkan nilai numerik yang sama karena sumber saat ini memuat beberapa cabang yang mengekstrak nilai dengan `item()` hanya ketika tersedia.

Tingkat berikutnya harus memverifikasi pencarian peristiwa. Untuk setiap lokasi uji, fixture harus memuat intisari efemeris, koordinat, elevasi, interval pencarian UTC, dan transisi terbit atau terbenam yang diharapkan. Lokasi khatulistiwa berguna untuk kasus biasa, sedangkan fixture lintang tinggi harus menguji perilaku `AlwaysUp`, `NeverUp`, dan peristiwa yang tidak ditemukan. Aplikasi saat ini mengabaikan sebagian pengecualian kutub dan memunculkan galat pada jalur lain. API peristiwa bersama harus menghasilkan status eksplisit seperti ditemukan, tanpa terbenam, tanpa terbit, atau di luar cakupan efemeris. Jika tidak, penanganan pengecualian diam-diam dalam pemindaian global dapat mengubah kegagalan komputasi menjadi kegagalan semu kriteria kalender.

Uji kriteria harus dibangun di sekitar batas keputusan, bukan hanya di sekitar kasus lulus dan gagal yang nyaman. Perbandingan tinggi dan elongasi memakai operator inklusif sehingga tepat 5,0000 dan 8,0000 derajat harus lulus. Nilai satu langkah representasi mesin di bawah salah satu ambang harus gagal. Matriks dua dimensi harus mencakup kedua variabel karena kelulusan salah satunya tidak menutupi kegagalan yang lain. Uji serupa diperlukan untuk terbenam Matahari satu detik sebelum, tepat pada, dan satu detik setelah 00.00 UTC. Spesifikasi harus menentukan kasus kesetaraan pada 00.00 UTC; kode saat ini hanya memperlakukan peristiwa yang benar-benar lebih awal dari batas sebagai Parameter 1 dan peristiwa pada atau setelahnya sebagai calon Parameter 2.

Uji pencarian global memerlukan keadaan langit sintetis selain lunasi nyata. Fixture sintetis dapat menempatkan wilayah yang memenuhi syarat pada sel grid yang diketahui, di antara sel grid, di atas laut, pada pulau yang dikecualikan, dan di daratan utama Amerika. Tujuannya ialah menguji semantik pencarian secara independen dari

dinamika Bulan. Implementasi kasar-ke-halus harus menemukan sel kandidat, memperhalus batas, menerapkan mask domain, dan menghasilkan waktu terbenam paling awal yang memenuhi syarat dalam UTC. Pengurutan ulang basis data kota tidak boleh mengubah jawaban. Jika pengurutan ulang mengubah titik terpilih, algoritma memilih urutan penyisipan alih-alih kronologi astronomis.

Uji integrasi harus memanggil setiap jalur kalender publik dengan ijtimak dan konfigurasi yang sama. Invarian yang diharapkan adalah kesamaan tanggal yang dihasilkan laporan visibilitas terperinci, modul titik pertama, konversi Gregorian-Hijriah, kalender Hijriah berjalan, dan pembangun basis data. Sumber saat ini tidak dapat memenuhi invarian ini untuk semua kasus karena pembangun basis data memakai jalan pintas 15.00 UTC. Setelah kernel bersama menggantikan jalan pintas tersebut, invarian menjadi pelindung yang dapat dijalankan terhadap regresi. Rekaman basis data harus menyertakan versi kriteria sehingga perubahan aturan pada masa depan membentuk seri data baru, bukan menulis ulang tanggal lama secara diam-diam.

Perbandingan astronomis independen harus memakai besaran, bukan hanya tanggal akhir. Untuk kumpulan ijtimak berstrata, berkas validasi harus mencatat UTC ijtimak, UTC terbenam setempat, asensio rekta dan deklinasi geosentrik semu, tinggi toposentrik, tinggi geosentrik, elongasi, serta fraksi tersinari. Setiap kolom dapat dibandingkan dengan JPL Horizons atau implementasi tepercaya lain dengan pengamat, refraksi, waktu rambat cahaya, dan pengaturan kerangka acuan yang setara. Perbedaan harus diselidiki sebelum aturan kalender diterapkan. Kesesuaian tanggal akhir dapat terjadi secara kebetulan ketika dua kesalahan numerik berada pada sisi ambang yang sama, sedangkan perbedaan satu hari dapat timbul dari perbedaan domain atau kebijakan yang dinyatakan, bukan dari mekanika benda langit yang salah.

Bukti penerimaan harus diterbitkan bersama rilis perangkat lunak. Laporan validasi ringkas dapat menyatakan hash kernel, versi dependensi, jumlah dan rentang lunasi uji, residual sudut dan waktu maksimum, seluruh kasus batas, serta setiap perbedaan dari tabel pembandingan resmi. Laporan tidak boleh mengklaim akurasi umum hanya dari sejumlah kecil bulan seremonial. Ramadan, Syawal, dan Zulhijah penting, tetapi seluruh dua belas bulan kamariah harus diuji sepanjang musim, lintang Bulan, dan perkembangan terbenam Matahari dari timur ke barat. Bukti ini memungkinkan penelaah membedakan

implementasi yang dapat direproduksi secara ilmiah dari kalender yang kebenarannya bergantung pada pemeriksaan manual keluaran terpilih.

Kerangka yang sama mendukung pengujian kinerja tanpa melemahkan kebenaran. Pemindaian global dapat menyimpan vektor ijtimak dalam tembolok, mengevaluasi titik kandidat secara paralel, dan menggunakan kembali irisan mask daratan, tetapi optimasi harus mempertahankan hasil kronologis. Karena itu, tolok ukur harus melaporkan waktu eksekusi sekaligus kesetaraan keputusan terhadap implementasi acuan yang lebih lambat. Hanya optimasi yang menghasilkan objek bukti identik untuk setiap fixture yang boleh menggantikan jalur acuan. Pendekatan ini memungkinkan KHGT Times mempertahankan pengalaman desktop interaktif sambil menjaga perhitungan yang berwenang tetap kecil, deterministik, dan dapat diuji secara independen.

Implikasi bagi Perangkat Lunak Kalender Hijriah Terpadu

Kasus ini menunjukkan bahwa integrasi memiliki dua makna. Integrasi numerik merujuk pada perhitungan efemeris gerak benda langit. Integrasi sistem merujuk pada penggunaan satu aturan kalender secara konsisten di seluruh modul perangkat lunak. KHGT Times telah memakai landasan numerik yang cakap dan mencakup penalaran lokal maupun global. Tahap pengembangan berikutnya harus memprioritaskan integrasi sistem daripada penambahan luas menu.

Kernel bersama juga akan memperjelas hubungan antara KHGT dan kriteria pembanding. Diagnosis yang berkaitan dengan MABIMS, Odeh, Ilyas, Yallop, dan Danjon harus diterapkan sebagai evaluator bernama dan berversi yang memakai keadaan langit yang sama tetapi menghasilkan hasil terpisah. Antarmuka kemudian dapat menampilkan matriks perbandingan tanpa membiarkan variabel toposentrik suatu kriteria masuk ke aturan geosentrik kriteria lain. Setiap evaluator harus menyatakan kerangka masukan, perlakuan atmosfer, inklusivitas ambang, modalitas pengamatan yang dimaksudkan, dan cakupan spasial.

Pemindaian global harus bergerak dari penemuan kasar menuju penghalusan terverifikasi. Grid 15 derajat berguna untuk menemukan wilayah kandidat, bukan mengidentifikasi titik pertama yang memenuhi syarat. Setelah ditemukan titik kasar, mesin dapat memperhalus bujur, lintang, dan waktu terbenam di sekitar batas, memotong hasil dengan mask daratan terpilih, serta mengevaluasi lokasi bernama di sekitarnya. Langkah ini menghasilkan perkiraan titik pertama yang dapat dipertanggungjawabkan sambil mengendalikan waktu komputasi.

Aturan penghentian harus bersifat kronologis dalam UTC karena urutan iterasi berdasarkan bujur atau penyisipan basis data tidak selalu setara dengan waktu terbenam paling awal yang memenuhi syarat.

Akhirnya, penerbitan kalender harus membedakan status hasil perhitungan dari adopsi kelembagaan. Perangkat lunak dapat melaporkan bahwa suatu kriteria telah terpenuhi dan algoritmanya menetapkan tanggal. Perangkat lunak tidak boleh menyiratkan bahwa hasil tersebut mengikat secara hukum atau agama kecuali lembaga berwenang telah mengadopsi konfigurasi dan versi perangkat lunak yang tepat itu. Pernyataan provenans dapat mendukung transparansi ilmiah sekaligus tata kelola kelembagaan yang tepat.

Kesimpulan

KHGT Times menunjukkan bahwa kriteria kalender Hijriah terpadu dapat dihubungkan dengan mekanika benda langit modern dalam sistem desktop yang praktis. Jalur visibilitas terperinci memisahkan secara tepat besaran geosentrik KHGT dari besaran pengamatan toposentrik, menghitung ijtimaq dan terbenam Matahari dari efemeris JPL, serta merepresentasikan cabang global sebelum 00.00 UTC dan setelah 00.00 UTC. Implementasi saat ini belum seragam secara internal karena pembangun basis data Hijriah mengganti jalur keputusan lengkap tersebut dengan batas ijtimaq pukul 15.00 UTC. Langkah pengembangan yang menentukan adalah membuat satu kernel awal bulan yang murni dan teruji, lalu mewajibkan setiap laporan, pencarian titik pertama, konverter, dan pembangun basis data memanggilnya. Rilis produksi harus menambahkan domain bumi yang dinyatakan, pemindaian kronologis yang diperhalus, provenans efemeris berversi, pengujian yang berfokus pada batas, serta perbandingan eksternal dengan layanan astronomi independen dan tabel resmi KHGT. Perubahan ini akan mengubah aplikasi astronomi yang luas menjadi mesin kalender yang dapat diaudit, dengan tanggal yang dapat ditelusuri dari keluaran terbitan hingga keputusan langit dan kalender yang tepat yang menghasilkannya.

Pertanyaan Kritis dan Jawaban tentang KHGT

Bagian ini menerjemahkan pokok-pokok ilmiah artikel ke dalam pertanyaan yang sering muncul dalam sosialisasi KHGT. Jawaban disusun dengan membedakan fakta astronomis, definisi parameter kalender, pilihan implementasi perangkat lunak, dan keputusan kelembagaan. Perbedaan tersebut penting agar angka atau hasil program tidak diberi makna yang melebihi cakupan perhitungannya.

Dalam bagian ini, istilah PKG 1 digunakan untuk cabang pemenuhan parameter sebelum 00.00 UTC, sedangkan PKG 2 digunakan untuk cabang koreksi sesudah 00.00 UTC dengan syarat tambahan. Kedua istilah mengikuti pemetaan operasional dalam artikel dan membantu menjelaskan alur algoritma kepada pembaca umum.

1. Apa perbedaan mendasar KHGT dengan penentuan awal bulan secara lokal

Jawaban. KHGT tidak hanya memeriksa keadaan hilal di suatu kota. KHGT membangun satu sistem kalender yang bertujuan menetapkan satu hari dan satu tanggal Hijriah untuk seluruh dunia.

Pembahasan. Sistem lokal menilai keadaan Bulan pada setiap wilayah sehingga negara atau kawasan yang berbeda dapat memulai bulan pada tanggal yang berbeda. KHGT memakai prinsip kesatuan matlak: ketika parameter yang ditetapkan telah terpenuhi pada wilayah yang diakui oleh aturan, hasilnya dapat diberlakukan secara global. Karena itu, KHGT harus menjawab dua hal sekaligus, yaitu apakah keadaan astronomis yang disyaratkan sudah tercapai dan bagaimana hasil tersebut diberlakukan tanpa membentuk tanggal yang berbeda di kawasan lain.

2. Apa yang dimaksud dengan PKG 1

Jawaban. PKG 1 adalah cabang utama yang menetapkan awal bulan apabila tinggi Bulan geosentris minimal 5 derajat dan elongasi geosentris minimal 8 derajat telah terpenuhi saat Matahari terbenam di suatu lokasi sebelum pukul 00.00 UTC.

Pembahasan. PKG 1 merupakan jalur keputusan normal. Istilah "di suatu lokasi" tetap penting karena tinggi Bulan dihitung terhadap ufuk lokasi pada saat terbenam Matahari. Setelah syarat itu tercapai, hasilnya tidak hanya berlaku bagi lokasi tersebut, tetapi menjadi dasar tanggal kalender global. Jika PKG 1 terpenuhi, algoritma tidak perlu menggunakan cabang koreksi PKG 2.

3. Apa yang dimaksud dengan PKG 2

Jawaban. PKG 2 adalah cabang koreksi ketika syarat 5 derajat dan 8 derajat belum terpenuhi sebelum pukul 00.00 UTC, tetapi kemudian terpenuhi sesudahnya di daratan Benua Amerika, sementara ijtimaq telah terjadi sebelum fajar di kawasan acuan zona waktu paling timur.

Pembahasan. PKG 2 tidak menghapus syarat 5 derajat dan 8 derajat. Kedua ambang itu tetap harus tercapai. PKG 2 memperpanjang jendela keputusan dengan dua pengaman: kawasan timur tidak boleh memasuki bulan baru terlalu dini sebelum ijtimaq, sedangkan kawasan barat tidak ditahan ketika geometri Bulan telah memenuhi parameter kalender. Dalam KHGT Times, kawasan timur itu diwakili oleh Gisborne, Selandia Baru.

4. Mengapa dipilih tinggi Bulan minimal 5 derajat dan elongasi minimal 8 derajat

Jawaban. Angka 5 derajat dan 8 derajat digunakan sebagai ambang kalender KHGT karena kombinasi tersebut menempatkan Bulan pada geometri yang secara umum telah memasuki wilayah kemungkinan terlihat. Angka itu bukan hukum alam yang mutlak dan bukan jaminan hilal pasti terlihat.

Pembahasan. Tinggi 5 derajat memberikan jarak vertikal dari ufuk, sedangkan elongasi 8 derajat menunjukkan bahwa Bulan telah cukup terpisah dari Matahari sehingga sabit mulai terbentuk secara berarti. Parameter itu diadopsi sebagai batas operasional kalender global. Pembenaannya terletak pada kesepakatan kriteria, kemampuan dihitung jauh ke depan, dan konsistensi penerapan. Karena itu, angka tersebut tetap dapat dikaji secara ilmiah, tetapi perangkat lunak tidak boleh menggantinya secara diam-diam dengan angka lain.

5. Mengapa tinggi dan elongasi harus dipenuhi bersama

Jawaban. Kedua besaran mengukur aspek geometri yang berbeda dan tidak dapat saling menggantikan.

Pembahasan. Tinggi menunjukkan posisi Bulan terhadap ufuk, sedangkan elongasi menunjukkan jarak sudut Bulan dari Matahari. Bulan dapat berada cukup tinggi tetapi masih terlalu dekat dengan Matahari sehingga sabitnya sangat tipis. Sebaliknya, elongasi dapat cukup besar ketika Bulan berada sangat rendah dan segera terbenam. Oleh karena itu, kelulusan salah satu parameter tidak menutupi kegagalan parameter yang lain.

6. Apakah nilai 5 derajat dan 8 derajat menjamin hilal terlihat dengan mata telanjang

Jawaban. Tidak. Nilai tersebut merupakan ambang keputusan kalender, bukan jaminan pengamatan untuk setiap tempat dan setiap keadaan atmosfer.

Pembahasan. Visibilitas aktual dipengaruhi oleh transparansi atmosfer, awan, kelembapan, ekstingsi dekat ufuk, kecerahan langit senja, ketebalan sabit, selisih azimuth, kualitas mata pengamat, ketinggian lokasi, dan alat optik. Oleh sebab itu, perangkat lunak sebaiknya menampilkan pernyataan "parameter kalender KHGT terpenuhi". Istilah "hilal terlihat" seharusnya digunakan hanya ketika model pengamatan dan syarat observasinya dinyatakan dengan jelas.

7. Mengapa KHGT memakai 5 derajat dan 8 derajat, bukan kriteria yang lebih rendah seperti 3 derajat dan 6,4 derajat

Jawaban. Karena tujuan penerapannya berbeda. Angka 3 derajat dan 6,4 derajat lazim dibahas dalam konteks imkan rukyat lokal atau regional, sedangkan 5 derajat dan 8 derajat dipakai KHGT sebagai parameter kalender global.

Pembahasan. Tidak tepat menyimpulkan bahwa angka yang lebih rendah pasti salah atau bahwa 5 derajat dan 8 derajat merupakan satu-satunya ukuran visibilitas. Untuk pengamatan lokal, model perlu mempertimbangkan keadaan toposentris dan atmosfer. Untuk kalender global, diperlukan ambang yang tegas, dapat dihitung jauh ke depan, dan dapat diterapkan secara konsisten pada seluruh dunia. Perbandingan kriteria harus memakai keadaan langit yang sama, tetapi hasil setiap kriteria harus tetap dipisahkan.

8. Mengapa KHGT menggunakan tinggi dan elongasi geosentris, bukan toposentris

Jawaban. Parameter resmi KHGT didefinisikan secara geosentris agar kerangka acuannya seragam dan hasilnya dapat direproduksi.

Pembahasan. Posisi toposentris bergantung pada lokasi pengamat di permukaan bumi dan dipengaruhi oleh paralaks Bulan. Di dekat ufuk, perbedaan tinggi geosentris dan toposentris dapat cukup besar. Jika satu program memakai tinggi geosentris dan program lain memakai tinggi toposentris semu, keduanya dapat menghasilkan keputusan tanggal yang berbeda. Data toposentris tetap penting untuk analisis pengamatan,

tetapi tidak boleh dicampurkan ke dalam ambang geosentris tanpa penjelasan.

9. Jika parameternya geosentris, mengapa tetap dihitung saat Matahari terbenam setempat

Jawaban. Karena kriteria tetap memerlukan waktu evaluasi, dan KHGT memilih saat terbenam Matahari pada lokasi yang sedang diperiksa.

Pembahasan. Geosentris menjelaskan kerangka posisi Bulan dan Matahari, bukan berarti perhitungannya terlepas dari lokasi. Bujur dan lintang diperlukan untuk menentukan waktu terbenam, orientasi ufuk, sudut jam, dan tinggi Bulan terhadap ufuk lokasi. Jadi, posisi benda langit yang digunakan bersifat geosentris, sedangkan waktu evaluasinya tetap terbenam Matahari setempat.

10. Mengapa menggunakan batas 00.00 UTC dan tidak cukup memakai waktu Magrib

Jawaban. KHGT sebenarnya memakai keduanya. Magrib menentukan saat tinggi dan elongasi diperiksa pada setiap lokasi, sedangkan 00.00 UTC menjadi batas waktu global untuk membedakan PKG 1 dan PKG 2.

Pembahasan. Tidak ada satu waktu Magrib yang berlaku serentak di seluruh dunia. Ketika Matahari terbenam di Indonesia, Eropa masih siang dan Amerika masih pagi. UTC menyediakan satu garis waktu yang sama untuk mengurutkan semua peristiwa terbenam tersebut. Karena itu, 00.00 UTC tidak menggantikan Magrib; ia mengklasifikasikan posisi peristiwa Magrib setempat dalam keputusan kalender global.

11. Apakah pukul 00.00 UTC mempunyai keistimewaan astronomis

Jawaban. Tidak. Pukul 00.00 UTC adalah batas konvensional sistem waktu sipil, bukan saat terjadinya fenomena astronomis khusus.

Pembahasan. Ijtimak dan gerak Bulan berlangsung terus-menerus. Alam tidak berubah secara mendadak tepat pada 00.00 UTC. Kalender, sebaliknya, memerlukan batas diskret agar dapat memberikan keputusan mulai atau tunda. Oleh karena itu, 00.00 UTC harus dipahami sebagai kebijakan algoritmik kalender yang harus diterapkan secara konsisten, bukan sebagai batas fisik visibilitas hilal.

12. Mengapa PKG 2 masih diperlukan jika sudah ada PKG 1

Jawaban. PKG 2 diperlukan agar kawasan barat tidak dipaksa menunda bulan ketika syarat 5 derajat dan 8 derajat baru tercapai setelah batas 00.00 UTC.

Pembahasan. Magrib bergerak dari kawasan timur menuju barat. Seiring berjalannya waktu setelah ijtimak, elongasi dan ukuran sabit umumnya bertambah. Bisa terjadi tidak ada lokasi yang memenuhi syarat sebelum 00.00 UTC, tetapi beberapa saat kemudian kondisi tersebut tercapai dengan jelas di Amerika. PKG 2 menangani keadaan peralihan itu dengan tetap melindungi urutan kronologis di kawasan timur.

13. Mengapa PKG 2 mensyaratkan ijtimak sebelum fajar di Selandia Baru

Jawaban. Syarat tersebut melindungi kawasan zona waktu paling timur agar tidak dipaksa memasuki bulan baru ketika ijtimak belum terjadi sebelum dimulainya aktivitas hari baru di sana.

Pembahasan. Ketika Amerika mengalami sore dan Magrib, Selandia Baru telah memasuki hari berikutnya. Jika hasil di Amerika langsung diberlakukan tanpa memeriksa ijtimak di timur, kawasan timur dapat memasuki bulan baru secara kalender terlalu dini. Namun, implementasi harus menjelaskan lokasi acuan dan definisi fajar. KHGT Times memakai Gisborne dan fajar astronomis ketika tinggi Matahari minus 18 derajat. Pilihan ini harus terdokumentasi dan diuji karena beberapa menit dapat menentukan hasil pada kasus batas.

14. Mengapa PKG 2 mensyaratkan daratan Benua Amerika, bukan titik di lautan atau pulau terpencil

Jawaban. Pembatasan itu mencegah keputusan global ditentukan oleh titik ekstrem di samudra yang tidak mewakili kawasan masyarakat pengguna kalender.

Pembahasan. Tanpa batas domain, pemindaian dapat menemukan koordinat laut yang memenuhi syarat beberapa menit lebih awal daripada daratan. Karena itu, istilah daratan Amerika harus diterjemahkan ke dalam mask geografis yang jelas dan berversi. Perangkat lunak perlu menyatakan apakah Amerika Tengah, Greenland, Kepulauan Aleut, dan pulau-pulau Karibia termasuk dalam domain. Daftar kota yang dipilih secara manual tidak cukup untuk menjamin cakupan geografis yang konsisten.

15. Bagaimana memperlakukan peristiwa yang terjadi tepat pukul 00.00 UTC

Jawaban. Spesifikasi harus menyatakan secara eksplisit apakah kesetaraan pada 00.00 UTC masuk PKG 1 atau PKG 2.

Pembahasan. Kode yang dikaji memperlakukan peristiwa yang benar-benar lebih awal dari 00.00 UTC sebagai PKG 1, sedangkan kejadian tepat pada atau setelah 00.00 UTC menjadi calon PKG 2. Pengujian harus mencakup 23.59.59 UTC, tepat 00.00.00 UTC, dan 00.00.01 UTC. Keputusan harus memakai nilai waktu berpresisi penuh, bukan waktu yang telah dibulatkan untuk tampilan.

16. Apakah satu tanggal global bertentangan dengan kenyataan bahwa hari Islam dimulai saat Magrib

Jawaban. Tidak harus bertentangan apabila tanggal kalender global dibedakan dari waktu pelaksanaan ibadah lokal.

Pembahasan. KHGT menyelaraskan nama hari dan tanggal, sedangkan Magrib, Subuh, puasa, salat, serta ibadah lain tetap mengikuti waktu Matahari setempat. Masyarakat Indonesia dan Amerika dapat berada pada tanggal Hijriah yang sama, tetapi memulai puasa dan berbuka pada jam lokal masing-masing. Dokumentasi aplikasi harus membedakan pergantian tanggal sipil, pergantian hari ibadah saat Magrib, dan keputusan global awal bulan.

17. Mengapa tidak cukup menggunakan ijtima' sebelum terbenam atau wujudul hilal

Jawaban. Kriteria tersebut bekerja pada konteks lokal dan belum dengan sendirinya menyelesaikan kebutuhan satu tanggal untuk seluruh dunia.

Pembahasan. Ijtima' sebelum terbenam hanya menjawab apakah konjungsi terjadi sebelum Magrib di lokasi tertentu. Kriteria itu belum menetapkan lokasi acuan global, hubungan kawasan timur dan barat, perlakuan terhadap Garis Tanggal Internasional, atau kasus ketika parameter baru terpenuhi di Amerika. KHGT menambahkan ambang geometri dan aturan pemberlakuan global agar keputusan tanggal tidak bergantung pada satu lokasi lokal saja.

18. Apakah adil apabila keadaan di satu tempat diberlakukan bagi seluruh dunia

Jawaban. Dalam logika KHGT, pemberlakuan tersebut merupakan konsekuensi kesatuan matlak. Penerimaannya tetap memerlukan keputusan fikih dan kelembagaan, bukan kesimpulan astronomi semata.

Pembahasan. Satu kalender tidak dapat terwujud apabila setiap wilayah mempertahankan tanggalnya sendiri. KHGT berusaha menghindari dua keadaan: suatu kawasan memulai bulan sebelum parameter terpenuhi di mana pun, dan suatu kawasan ditahan ketika keadaan hilal telah memenuhi kriteria di kawasan lain. Perangkat lunak dapat membuktikan bahwa parameter astronomis telah terpenuhi, tetapi kewajiban hukum atau keagamaan tetap bergantung pada lembaga yang berwenang mengadopsinya.

19. Apakah pemindaian global dengan grid setiap 15 derajat sudah cukup akurat

Jawaban. Belum cukup untuk menentukan titik pertama secara presisi. Grid 15 derajat hanya layak sebagai pencarian awal.

Pembahasan. Selisih 15 derajat bujur setara kira-kira satu jam rotasi bumi. Wilayah pertama yang memenuhi syarat dapat berada di antara dua titik grid. Algoritma juga dapat salah apabila berhenti berdasarkan urutan bujur atau urutan kota dalam basis data, bukan berdasarkan waktu terbenam paling awal dalam UTC. Pemindaian yang dapat dipertanggungjawabkan harus dimulai dari grid kasar, dilanjutkan dengan penghalusan bujur, lintang, dan waktu, lalu diurutkan secara kronologis dan dipotong dengan mask daratan yang dinyatakan.

20. Mengapa jalan pintas ijtimak sebelum atau sesudah pukul 15.00 UTC tidak dapat menggantikan PKG 1 dan PKG 2

Jawaban. Waktu ijtimak saja tidak memuat informasi tentang tinggi Bulan, elongasi, terbenam Matahari, wilayah yang memenuhi syarat, dan cabang koreksi global.

Pembahasan. Dua ijtimak pada jam UTC yang hampir sama dapat menghasilkan keadaan 5 derajat dan 8 derajat yang berbeda karena deklinasi Bulan, musim, lintang, dan geometri terbenam. Batas 15.00 UTC hanya pendekatan kasar dan tidak identik dengan fajar aktual di Gisborne ataupun terpenuhinya parameter di daratan Amerika. Semua modul KHGT Times harus memanggil satu fungsi keputusan bersama

yang menghitung ijtimak, memeriksa PKG 1, memeriksa PKG 2 bila diperlukan, menetapkan tanggal, dan menyimpan bukti perhitungannya.

Penutup Sosialisasi

Dua puluh pertanyaan tersebut menunjukkan bahwa perdebatan tentang KHGT tidak cukup dijawab dengan satu angka atau satu hasil aplikasi. Sosialisasi perlu menjelaskan kerangka koordinat, waktu evaluasi, cakupan wilayah, cabang keputusan, dan kedudukan lembaga yang mengadopsi kalender. Dengan penjelasan itu, masyarakat dapat menilai KHGT secara lebih tepat, sedangkan pengembang perangkat lunak mempunyai spesifikasi yang dapat diuji dan ditelusuri.

Daftar Pustaka

- Capitaine, N., and P. T. Wallace. "High Precision Methods for Locating the Celestial Intermediate Pole and Origin." *Astronomy and Astrophysics* 450, no. 2 (2006): 855-872. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054550>.
- Capitaine, N., P. T. Wallace, and J. Chapront. "Expressions for IAU 2000 Precession Quantities." *Astronomy and Astrophysics* 412, no. 2 (2003): 567-586. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031539>.
- Doggett, Leroy E., and Bradley E. Schaefer. "Lunar Crescent Visibility." *Icarus* 107, no. 2 (1994): 388-403. <https://doi.org/10.1006/icar.1994.1031>.
- Duffett-Smith, Peter, and Jonathan Zwart. *Practical Astronomy with Your Calculator or Spreadsheet*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- Eastman, Jason, Robert Siverd, and B. Scott Gaudi. "Achieving Better than 1 Minute Accuracy in the Heliocentric and Barycentric Julian Dates." *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 122, no. 894 (2010): 935-946. <https://doi.org/10.1086/655938>.
- Faid, Muhamad Syazwan, Mohd Saiful Anwar Mohd Nawawi, Mohd Hafiz Mohd Saadon, Muhamad Syauqi Nahwandi, Nur Nafhatun Md Shariff, Zety Sharizat Hamidi, Raihana Abdul Wahab, Mariah P. Norman, and Nazhatulshima Ahmad. "Confirmation Methodology for a Lunar Crescent Sighting Report." *New Astronomy* 103 (2023): 102063. <https://doi.org/10.1016/j.newast.2023.102063>.
- Faid, Muhamad Syazwan, Mohd Saiful Anwar Mohd Nawawi, Raihana Abdul Wahab, and Nazhatulshima Ahmad. "HilalPy: Software to Analyse Lunar Sighting Criteria." *Software Impacts* 18 (2023): 100593. <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2023.100593>.
- Faid, Muhamad Syazwan, Mohd Saiful Anwar Mohd Nawawi, Mohd Hafiz Mohd Saadon, Raihana Abdul Wahab, Nazhatulshima Ahmad, Muhamad Syauqi Nahwandi, Ikramullah Ahmed, and Ibrahim Mohamed. "Assessment and Review of Modern Lunar Crescent Visibility Criterion." *Icarus* 412 (2024): 115970. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.115970>.
- Hasanzadeh, Amir. "Study of Danjon Limit in Moon Crescent Sighting." *Astrophysics and Space Science* 339 (2012): 211-221. <https://doi.org/10.1007/s10509-012-1004-y>.

- Ilyas, Mohammad. A Modern Guide to Astronomical Calculations of Islamic Calendar, Times and Qibla. Kuala Lumpur: Berita Publishing, 1984.
- Ilyas, Mohammad. "Lunar Crescent Visibility Criterion and Islamic Calendar." Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society 35 (1994): 425-461.
- Kasmui. KHGT Times version 7.7 revision. Python source code, 2026.
- King, David A. In Synchrony with the Heavens: Studies in Astronomical Timekeeping and Instrumentation in Medieval Islamic Civilization. Vol. 1. Leiden: Brill, 2004.
- Meeus, Jean. Astronomical Algorithms. 2nd ed. Richmond, VA: Willmann-Bell, 1998.
- Odeh, Mohammad Sh. "New Criterion for Lunar Crescent Visibility." Experimental Astronomy 18 (2004): 39-64. <https://doi.org/10.1007/s10686-005-9002-5>.
- Park, Ryan S., William M. Folkner, James G. Williams, and Dale H. Boggs. "The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441." Astronomical Journal 161, no. 3 (2021): 105. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd414>.
- Pimpinan Pusat Muhammadiyah. Kalender Hijriah Global Tunggal (KHGT). Yogyakarta: Pimpinan Pusat Muhammadiyah, 2025. https://tarjih.or.id/wp-content/uploads/2025/06/KHGT_Indonesia.pdf.
- Reda, Ibrahim, and Afshin Andreas. "Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications." Solar Energy 76, no. 5 (2004): 577-589. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003>.
- Reingold, E. M., and Nachum Dershowitz. Calendrical Calculations: The Ultimate Edition. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- Richards, E. G. Mapping Time: The Calendar and Its History. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- Smart, W. M. Textbook on Spherical Astronomy. 6th ed. Revised by R. M. Green. Cambridge: Cambridge University Press, 1977.
- Urban, Sean P., and P. Kenneth Seidelmann, eds. Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. 3rd ed. Mill Valley, CA: University Science Books, 2013.