

Skyfield: Jembatan Sains Modern untuk Penentuan Awal Bulan Hijriah yang Akurat dan Seragam

Pendahuluan: Urgensi Kalender Hijriah Terpadu dan Peran Astronomi Komputasi

Umat Islam di seluruh dunia memiliki kebutuhan fundamental akan kalender Hijriah yang akurat dan seragam. Penentuan awal bulan, khususnya Ramadan, Syawal, dan Zulhijah, seringkali menjadi sumber perbedaan karena variasi metode dan kriteria yang digunakan [User Query]. Ketidakteraturan ini memengaruhi kebersamaan dalam merayakan hari-hari besar Islam dan dapat menciptakan tantangan dalam perencanaan kegiatan keagamaan global, seperti ibadah haji.¹

Secara historis, penentuan awal bulan Hijriah diwarnai oleh dua pendekatan utama: *rakyat* (pengamatan langsung hilal atau bulan sabit baru) dan *hisab* (perhitungan astronomi). Di Indonesia, berbagai organisasi keagamaan menerapkan kriteria yang berbeda, seperti Wujudul Hilal yang umumnya digunakan oleh Muhammadiyah, dan Imkanur Rakyat yang diadopsi oleh Nahdlatul Ulama serta negara-negara anggota MABIMS (Brunei, Indonesia, Malaysia, Singapura).² Perbedaan kriteria ini seringkali menghasilkan tanggal awal bulan yang berbeda, memicu diskusi dan upaya untuk mencapai keseragaman.² Gagasan tentang Kalender Hijriah Global Tunggal (KHGT) muncul sebagai solusi untuk menyatukan umat Islam di bawah satu sistem kalender seragam, yang didasarkan pada pendekatan ilmiah dan konsensus global.¹

Di era modern ini, ilmu astronomi komputasi berperan penting dalam menyediakan solusi dengan akurasi dan prediktabilitas tinggi. Salah satu alat canggih yang digunakan para ahli falak (astronomi Islam) adalah pustaka Python bernama Skyfield [User Query]. Skyfield hadir sebagai "kalkulator super" yang mampu menangani kompleksitas gerak benda langit dengan presisi luar biasa, menjadikannya sebuah jembatan yang menghubungkan ilmu falak tradisional dengan kemajuan astronomi modern [User Query].

Skyfield, dengan desainnya yang mengandalkan data ephemeris global standar dan kemampuannya yang komprehensif dalam menangani fenomena astronomi yang kompleks, memberikan fondasi ilmiah yang kokoh. Kemampuan ini secara langsung mendukung aspek keseragaman yang dicari dalam kalender global. Untuk mencapai

kalender global yang benar-benar terpadu dan diterima secara luas, diperlukan metode yang ketat secara ilmiah, dapat diterapkan secara universal, dan memiliki akurasi yang sangat tinggi. Skyfield, melalui presisi dan kemampuannya, secara inheren memenuhi persyaratan ini. Hal ini menjadikan Skyfield bukan sekadar alat perhitungan, melainkan manifestasi dari ketelitian ilmiah dan kekuatan komputasi yang esensial untuk membangun kalender Hijriah yang benar-benar global dan terpadu, sekaligus mengatasi masalah fundamental ketidakseragaman kalender dalam dunia Muslim.

Fondasi Ilmiah Skyfield: Presisi dan Keandalan Perhitungan Astronomi

Akurasi Tinggi dan Pemanfaatan Data Ephemeris JPL

Skyfield dirancang khusus untuk perhitungan astronomi posisi dengan presisi sangat tinggi. Pustaka ini mampu menghitung posisi planet, Bulan, Matahari, dan satelit Bumi dengan akurasi yang setara dengan standar observatorium terkemuka, bahkan mencapai hingga 0.0005 detik busur (setengah mili-detik busur) dibandingkan sumber otoritatif seperti *Astronomical Almanac USNO*.⁵ Tingkat presisi ini sangat penting dalam konteks penentuan hilal, yang sangat sensitif terhadap perubahan sudut yang sangat kecil.

Keunggulan akurasi Skyfield dicapai melalui pemanfaatan data ephemeris Jet Propulsion Laboratory (JPL) NASA, seperti seri DE421, DE440, atau DE430, yang dikenal sebagai "standar emas" untuk data posisi benda Tata Surya.⁶ Ephemeris ini menyediakan tabel posisi dengan akurasi tinggi untuk rentang waktu dekade hingga abad.⁶ Sebagai contoh, ephemeris DE430 dan DE440, meskipun berukuran lebih besar, menawarkan akurasi yang lebih tinggi untuk perhitungan jangka pendek dibandingkan versi jangka panjangnya (DE431 dan DE441) karena mampu memperhitungkan efek inti cair Bulan. Ini menunjukkan tingkat detail dan pembaruan yang terus-menerus dalam data yang digunakan oleh Skyfield.⁶

Meskipun akurasi Skyfield yang mencapai 0.0005 detik busur mungkin tampak berlebihan untuk sebagian besar aplikasi astronomi amatir, tingkat presisi ini menjadi sangat krusial dan relevan dalam konteks penentuan hilal. Perubahan sudut yang sangat kecil pada posisi Bulan relatif terhadap Matahari dan ufuk dapat secara fundamental mengubah hasil prediksi visibilitas, terutama pada "kasus batas" yang

sering menjadi sumber perbedaan dalam penetapan awal bulan. Oleh karena itu, apa yang mungkin terlihat sebagai akurasi yang berlebihan untuk astronomi umum, menjadi sangat penting untuk perhitungan yang tepat dan seringkali diperdebatkan yang diperlukan untuk hilal.

Penanganan Waktu dan Sistem Koordinat yang Canggih

Skyfield secara otomatis menangani berbagai skala waktu astronomi seperti UTC (Coordinated Universal Time), TT (Terrestrial Time), dan TDB (Barycentric Dynamical Time), serta melakukan konversi antar sistem koordinat, misalnya dari geosentris ke toposentris [User Query]. Kemampuan ini sangat penting karena data ephemeris JPL umumnya berbasis barysentris atau geosentris, sementara penentuan hilal memerlukan posisi Bulan yang diamati dari lokasi spesifik di permukaan Bumi (toposentris).

Pustaka ini mengimplementasikan model presesi-nutasi IAU 2000A untuk menentukan orientasi sumbu Bumi pada tanggal tertentu.⁷ Model ini adalah komponen vital untuk akurasi posisi benda langit karena Bumi tidak hanya berotasi, tetapi juga mengalami goyangan (nutasi) dan perubahan orientasi sumbu rotasinya dalam jangka panjang (presesi). Selain itu, Skyfield juga secara cermat memperhitungkan gerak polar (wobble kecil kerak Bumi terhadap sumbu rotasinya) dengan memuat data resmi dari International Earth Rotation Service (IERS).⁷ Efek ini, meskipun kecil (maksimal sekitar 0.6 detik busur), secara langsung memengaruhi posisi pengamat di permukaan Bumi dan semua koordinat alt-azimut, yang krusial untuk observasi toposentris.⁷ Penanganan *leap seconds* juga terintegrasi, dengan kemampuan untuk menggunakan data bawaan atau mengunduh yang terbaru dari NASA/IERS, memastikan sinkronisasi waktu yang akurat dan sesuai standar internasional.⁸

Kemampuan Skyfield untuk secara cermat mengintegrasikan model presesi-nutasi, gerak polar, dan *leap seconds* bukan sekadar fitur teknis tambahan. Sebaliknya, hal ini merupakan fondasi vital untuk memastikan bahwa posisi hilal yang dihitung adalah *posisi tampak yang paling realistis* dari lokasi pengamat di permukaan Bumi. Tanpa akuntansi yang cermat ini, ketinggian dan azimut hilal yang dihitung akan tidak akurat, berpotensi menyebabkan prediksi visibilitas yang salah, terutama untuk hilal dengan ketinggian rendah. Dengan demikian, kemampuan ini secara langsung memengaruhi keandalan prediksi visibilitas hilal, terutama untuk kriteria yang sangat sensitif terhadap ketinggian dan azimut.

Efisiensi Komputasi dan Otomatisasi Tugas Falak

Dengan Skyfield, tugas perhitungan astronomi yang rumit dan berulang dapat diotomatisasi sepenuhnya, menghasilkan efisiensi tinggi yang tidak dapat dicapai dengan metode manual [User Query]. Kementerian Agama Indonesia, misalnya, sebelumnya mengandalkan perhitungan manual untuk penentuan awal bulan Hijriah dan kini sedang mengadopsi perangkat lunak untuk meningkatkan efisiensi.⁹ Perhitungan hisab manual secara inheren melelahkan, memakan waktu, dan rentan terhadap kesalahan manusia, terutama untuk perhitungan multi-parameter yang kompleks.

Otomatisasi ini memungkinkan para ahli falak untuk mengalihkan fokus dari perhitungan dasar yang memakan waktu dan rentan kesalahan, menuju analisis dan interpretasi data yang lebih mendalam, serta evaluasi kriteria yang kompleks [User Query]. Pembebasan waktu dan sumber daya kognitif ini memungkinkan mereka untuk terlibat dalam tugas-tugas tingkat yang lebih tinggi, seperti menafsirkan hasil, membandingkan prediksi dengan berbagai kriteria visibilitas, menganalisis data observasi, dan berkontribusi pada wacana akademik yang lebih luas tentang penentuan kalender Islam. Sebagai pustaka *pure Python* dengan satu-satunya dependensi biner pada NumPy, Skyfield sangat mudah diinstal dan diintegrasikan ke dalam berbagai alur kerja komputasi dan proyek penelitian, menjadikannya alat yang sangat efisien dan dapat diakses.⁵

Efisiensi dan kemampuan otomatisasi Skyfield bukan hanya soal kecepatan komputasi, melainkan juga transformasi metodologi kerja ahli falak. Dengan meminimalkan beban perhitungan manual, Skyfield memungkinkan fokus yang lebih besar pada analisis kritis terhadap data, evaluasi kriteria visibilitas yang kompleks, dan kontribusi pada pengembangan ilmu falak yang lebih luas, sehingga meningkatkan kualitas dan kedalaman studi penentuan awal bulan. Hal ini secara signifikan meningkatkan kualitas dan kedalaman studi penentuan awal bulan.

Mekanisme Perhitungan Parameter Visibilitas Hilal dengan Skyfield

Skyfield menyediakan serangkaian fungsi dan metode yang kuat untuk menghitung parameter-parameter kunci yang diperlukan dalam penentuan visibilitas hilal. Perhitungan ini mempertimbangkan posisi pengamat secara spesifik dan kondisi atmosfer yang memengaruhi pengamatan.

Penentuan Lokasi Pengamat Toposentris dan Efek Paralaks Bulan

Dalam konteks penentuan visibilitas hilal, penggunaan koordinat toposentris—yaitu posisi spesifik dari pengamat di permukaan Bumi (lintang, bujur, dan elevasi)—sangatlah esensial [User Query]. Pentingnya ini disebabkan oleh efek paralaks Bulan, yakni pergeseran semu posisi Bulan di langit yang signifikan akibat perbedaan lokasi pengamat di permukaan Bumi. Efek ini dapat secara substansial memengaruhi nilai ketinggian dan azimuth Bulan yang teramati [User Query]. Sebuah objek Topos atau GeographicPosition dalam Skyfield merepresentasikan lokasi pengamat di Bumi, dan dapat dibuat dengan mudah menggunakan fungsi `wgs84.latlon()`.⁵ Pendekatan toposentris memastikan bahwa perhitungan mencerminkan apa yang sebenarnya akan dilihat oleh pengamat dari titik tertentu di permukaan Bumi.

Identifikasi Waktu-Waktu Kritis: Ijtimak, Matahari Terbenam, dan Bulan Terbenam

Skyfield memfasilitasi identifikasi waktu-waktu astronomi yang krusial untuk penentuan hilal:

- **Waktu Ijtimak (Konjungsi Geosentris):** Skyfield memiliki kemampuan untuk mencari momen ketika Bulan dan Matahari berada segaris secara bujur ekliptika (ijtimak). Momen ini sangat krusial sebagai titik awal siklus bulan baru dan untuk menghitung usia bulan [User Query]. Fungsi `almanac.oppositions_conjunctions()` dapat digunakan untuk menemukan waktu konjungsi ini dengan presisi tinggi.¹²
- **Waktu Matahari Terbenam (Sunset) dan Bulan Terbenam (Moonset):** Pustaka ini menyediakan fungsi `almanac.find_settings()` atau `almanac.find_discrete` yang dapat mencari waktu terbenam Matahari dan Bulan untuk lokasi pengamat pada tanggal tertentu.¹² Skyfield menggunakan definisi resmi dari United States Naval Observatory (USNO) untuk terbit dan terbenam, yang memperhitungkan radius Matahari/Bulan dan rata-rata refraksi atmosfer.¹³

Perhitungan Parameter Kunci Visibilitas

Setelah mendefinisikan lokasi pengamat dan waktu kritis, Skyfield dapat menghitung parameter-parameter kunci yang secara langsung memengaruhi visibilitas hilal:

- **Ketinggian (Altitude) Bulan:** Ini adalah jarak sudut Bulan di atas ufuk pada saat

matahari terbenam. Ketinggian yang lebih besar sangat penting karena menempatkan hilal lebih tinggi dari lapisan atmosfer yang tebal dan terang, sehingga meningkatkan kontrasnya dan kemungkinan terlihat [User Query]. Skyfield menghitung ini menggunakan metode `.altaz()` pada objek posisi bulan yang diamati dari lokasi pengamat.⁵

- **Azimut Bulan:** Ini adalah arah horizontal Bulan, diukur dari Utara ke Timur. Informasi ini sangat berguna untuk mengetahui ke arah mana pengamat harus mencari hilal di langit [User Query]. Azimut juga dihitung melalui metode `.altaz()`.¹⁴
- **Elongasi (Jarak Sudut) Toposentris:** Sudut antara pusat Bulan dan pusat Matahari, sebagaimana terlihat dari lokasi pengamat. Semakin besar elongasi, semakin tebal dan terang sabit bulan, sehingga lebih mudah terlihat [User Query]. Skyfield menyediakan metode `.separation_from()` untuk menghitung jarak sudut ini dengan presisi tinggi.¹⁵
- **Persentase Iluminasi Bulan:** Mengukur bagian dari piringan Bulan yang disinari Matahari. Skyfield menyediakan fungsi `almanac.fraction_illuminated()` untuk mendapatkan nilai ini, yang berkorelasi langsung dengan kecerahan sabit hilal.¹⁵
- **Lag Time:** Selisih waktu antara terbenam Matahari dan terbenam Bulan [User Query]. Parameter ini dapat dihitung dengan membandingkan hasil waktu terbenam dari `almanac.find_settings()` untuk Matahari dan Bulan.

Koreksi Refraksi Atmosfer Berdasarkan Kondisi Aktual

Skyfield memungkinkan perhitungan ketinggian tampak (apparent altitude) yang sudah dikoreksi refraksi atmosfer dengan menyediakan parameter suhu dan tekanan aktual pada metode `.altaz()`.¹⁶ Ini menghasilkan posisi yang lebih realistis dibandingkan ketinggian geometris murni [User Query].

Pustaka ini memiliki fungsi `skyfield.earthlib.refraction` yang mengambil sudut ketinggian, suhu, dan tekanan untuk mengembalikan perkiraan sudut refraksi atmosfer standar United States Naval Observatory (USNO). Ini memungkinkan pengguna untuk memasukkan kondisi cuaca lokal yang spesifik untuk perhitungan yang lebih akurat.¹³ Penelitian juga menunjukkan bagaimana refraksi bervariasi dengan kondisi atmosfer (suhu dan tekanan) dan merupakan sumber kesalahan signifikan dalam penentuan ketinggian objek di dekat ufuk.¹⁷

Meskipun Skyfield menyediakan nilai refraksi standar untuk perhitungan terbit/terbenam, kemampuannya untuk mengoreksi refraksi atmosfer berdasarkan suhu dan tekanan aktual adalah fitur canggih yang secara signifikan meningkatkan realisme dan akurasi prediksi ketinggian hilal. Hal ini sangat penting karena kondisi

atmosfer lokal dapat bervariasi secara drastis dan memengaruhi apakah hilal yang secara astronomis berada di atas ufuk dapat benar-benar terlihat. Dengan memasukkan data meteorologi riil, ahli falak dapat melakukan simulasi yang lebih mendekati kondisi observasi aktual, yang sangat krusial untuk kasus-kasus hilal yang berada pada batas visibilitas.

Penerapan Skyfield dalam Evaluasi Kriteria Visibilitas Hilal

Data parameter yang dihasilkan oleh Skyfield—termasuk ketinggian Bulan, azimut, elongasi, persentase iluminasi, dan *lag time*—menjadi masukan utama yang sangat andal untuk mengevaluasi berbagai kriteria visibilitas hilal yang ada. Skyfield tidak hanya mampu menghitung parameter yang dibutuhkan oleh kriteria visibilitas hilal yang ada, tetapi juga berfungsi sebagai platform fleksibel yang memungkinkan para peneliti dan ahli falak untuk mengimplementasikan, menguji, dan bahkan mengembangkan kriteria visibilitas hilal baru. Ini memfasilitasi eksplorasi ilmiah terhadap faktor-faktor yang memengaruhi visibilitas hilal dan berkontribusi pada penyempurnaan metodologi penentuan awal bulan.

Berikut adalah bagaimana Skyfield dapat diterapkan untuk mengevaluasi kriteria visibilitas hilal utama:

Kriteria Wujudul Hilal

Kriteria Wujudul Hilal secara fundamental mensyaratkan dua kondisi: ijtimak (konjungsi) telah terjadi sebelum matahari terbenam, dan Bulan terbenam setelah Matahari terbenam.² Kriteria ini tidak berfokus pada visibilitas aktual hilal, melainkan pada kondisi astronomis geometris. Skyfield dapat dengan mudah menghitung waktu ijtimak menggunakan fungsi `almanac.oppositions_conjunctions()` dan waktu terbenam Matahari serta Bulan menggunakan `almanac.find_settings()` untuk memverifikasi kedua syarat ini secara presisi.

Kriteria Imkanur Rukyat (MABIMS Neo)

Kriteria Imkanur Rukyat (MABIMS Neo) telah diterapkan di Indonesia sejak Ramadan 1443 H (April 2022).³ Kriteria ini menetapkan ambang batas visibilitas hilal yang lebih ketat dibandingkan sebelumnya, yaitu ketinggian minimal 3 derajat dan elongasi minimal 6.4 derajat pada saat matahari terbenam.³ Kriteria ini diadopsi oleh negara-negara anggota MABIMS (Brunei, Indonesia, Malaysia, Singapura) dan

didasarkan pada standar Odeh.¹⁹ Skyfield secara langsung menghitung ketinggian (.altaz()) dan elongasi (.separation_from()) Bulan pada waktu matahari terbenam, memungkinkan perbandingan langsung dan akurat dengan ambang batas MABIMS Neo.

Kriteria Kalender Hijriah Global Tunggal (KHGT) (Kriteria 5-8)

Gagasan Kalender Hijriah Global Tunggal (KHGT) mengusung konsep *matlak global*, yang bertujuan untuk mencapai keseragaman satu hari satu tanggal di seluruh dunia.¹ Kriteria yang diadopsi oleh Muhammadiyah untuk penerapan KHGT (mulai 1446 H) adalah konjungsi terjadi sebelum pukul 00:00 waktu universal (UTC) dan posisi hilal saat Matahari terbenam di mana pun di permukaan Bumi sudah mencapai ketinggian minimal 5 derajat dan elongasi minimal 8 derajat.²² Skyfield, dengan kemampuan perhitungan globalnya yang tidak terikat pada satu lokasi pengamat dan sinkronisasi UTC, sangat cocok untuk mengevaluasi kriteria KHGT ini, memungkinkan simulasi visibilitas di berbagai lokasi di seluruh dunia pada waktu yang sama.

Kriteria Odeh atau Yallop

Kriteria Odeh atau Yallop lebih kompleks, menggunakan kombinasi parameter lain untuk memprediksi kemungkinan terlihatnya hilal berdasarkan analisis data observasi global.²⁴ Kriteria Odeh (2004) didasarkan pada *arc of vision* (ARCV) dan lebar sabit (W), dengan formula empiris yang mengintegrasikan data observasi.²⁴ Yallop (1997) juga menggunakan pendekatan serupa.²⁴ Skyfield dapat menghitung parameter-parameter dasar seperti ketinggian, elongasi, dan persentase iluminasi yang menjadi masukan esensial untuk kriteria yang lebih kompleks ini. Meskipun perhitungan ARCV dan W mungkin memerlukan sedikit modifikasi atau penambahan kode di luar fungsi bawaan Skyfield, data dasar yang diperlukan sudah tersedia dengan presisi tinggi.

Tabel berikut merangkum perbandingan kriteria visibilitas hilal utama dan relevansi Skyfield dalam evaluasinya:

Tabel 1: Perbandingan Kriteria Visibilitas Hilal Utama

| Kriteria Visibilitas Hilal | Syarat Utama (Saat Matahari Terbenam) | Proponen/Penerapan Utama | Catatan Penting | Relevansi Skyfield |
|---|--|--|--|---|
| Wujudul Hilal | Ijtimak sebelum sunset & Moonset setelah sunset ² | Muhammadiyah (Indonesia) | Tidak berfokus pada visibilitas aktual, melainkan kondisi astronomis geometris. | Perhitungan waktu ijtimak, sunset, dan moonset secara presisi. |
| Imkanur Rukyat (MABIMS Neo) | Ketinggian $\geq 3^\circ$ & Elongasi $\geq 6.4^\circ$ ³ | Brunei, Indonesia, Malaysia, Singapura (sejak 2022) | Kriteria yang lebih ketat dari sebelumnya, bertujuan meningkatkan kemungkinan visibilitas. | Perhitungan ketinggian dan elongasi toposentris yang akurat. |
| Kalender Hijriah Global Tunggal (KHGT) | Konjungsi sebelum 00:00 UTC & Hilal mencapai Ketinggian $\geq 5^\circ$ & Elongasi $\geq 8^\circ$ di suatu lokasi di Bumi ²² | Muhammadiyah (Indonesia, mulai 1446 H), Konferensi Istanbul 1978 | Konsep <i>matlak global</i> untuk keseragaman satu hari satu tanggal di seluruh dunia. | Perhitungan global untuk berbagai lokasi dan sinkronisasi UTC. |
| Odeh/Yallop | Berdasarkan kombinasi Arc of Vision (ARCV) dan Crescent Width (W), dengan formula empiris ²⁴ | Muhammad Odeh (ICOP), Yallop | Model empiris yang kompleks, didasarkan pada data observasi ekstensif. | Menyediakan parameter dasar (alt, elong, iluminasi) sebagai input untuk formula kompleks. |

Tabel ini secara jelas menunjukkan bagaimana Skyfield, dengan kemampuannya menghitung parameter astronomi fundamental dengan presisi tinggi, dapat menjadi alat yang serbaguna untuk mengevaluasi dan membandingkan berbagai kriteria visibilitas hilal. Skyfield dapat menjadi "laboratorium virtual" bagi para ahli falak, memungkinkan mereka untuk menguji validitas kriteria yang ada, mensimulasikan implikasinya di berbagai wilayah geografis dan rentang waktu, dan bahkan

mengembangkan kriteria baru yang lebih akurat berdasarkan data yang dihasilkan.

Skyfield dalam Konteks Indonesia: Studi Kasus dan Perbandingan

Peran Skyfield dalam Mendukung Hisab Rukyat di Indonesia

Kementerian Agama Indonesia secara resmi menggunakan kriteria baru MABIMS sejak 2021/2022 dan secara eksplisit menekankan bahwa hisab digunakan sebagai alat bantu untuk rukyat yang akurat, bukan sebagai penentu tunggal.²⁰ Dalam konteks ini, Skyfield, sebagai alat hisab yang presisi tinggi, dapat memberikan panduan arah (azimut) dan waktu (terbenam Matahari dan Bulan) yang sangat akurat bagi pengamat hilal di lapangan. Ini membantu mereka mengidentifikasi "jendela waktu pengamatan yang tepat" dan "arah yang tepat" untuk rukyat, meminimalkan kesalahan identifikasi objek dan meningkatkan efisiensi observasi.²⁷

Keberadaan proyek penelitian seperti HilalPy, yang menggunakan astrometri Skyfield untuk menganalisis dan mengembangkan kriteria visibilitas hilal di Indonesia, menunjukkan adopsi Skyfield dalam penelitian falak lokal dan kontribusinya pada pengembangan ilmu pengetahuan.²⁸ Hal ini mengindikasikan bahwa kemampuan Skyfield yang canggih dapat berfungsi sebagai katalisator evolusi metode hisab di Indonesia. Dengan menyediakan perhitungan yang sangat akurat dan efisien, Skyfield mentransformasi praktik hisab tradisional. Ini membantu menjembatani kesenjangan antara hisab dan rukyat, menghasilkan pendekatan yang lebih terpadu dan andal untuk penentuan awal bulan, sejalan dengan tujuan Kementerian Agama untuk meningkatkan kualitas layanan keagamaan berbasis teknologi.⁹

Perbandingan dengan Metode Tradisional (Rukyatul Hilal dan Hisab Manual)

Penggunaan Skyfield dalam penentuan hilal dapat dibandingkan dengan metode tradisional yang telah lama digunakan:

- **Rukyatul Hilal:** Metode ini mengandalkan pengamatan langsung terhadap hilal. Apabila hilal tidak terlihat, bulan yang sedang berjalan digenapkan menjadi 30 hari, berdasarkan hadits Nabi Muhammad SAW.² Tantangan utama metode ini meliputi kondisi cuaca yang tidak ideal (misalnya, awan tebal), polusi cahaya, cahaya senja (syafaq) yang kuat yang dapat mengalahkan sabit hilal yang tipis, dan potensi subjektivitas pengamat.²⁷ Skyfield tidak menggantikan rukyat, tetapi

memberikan prediksi yang sangat akurat untuk memandu upaya rukyat, membantu pengamat fokus pada waktu dan arah yang paling mungkin untuk melihat hilal.

- **Hisab Manual:** Metode ini melibatkan perhitungan menggunakan tabel dan rumus manual. Prosesnya memakan waktu, rentan kesalahan manusia, dan sulit untuk mengintegrasikan koreksi kompleks seperti refraksi atmosfer atau gerak polar.⁹ Kementerian Agama sendiri mengakui bahwa perhitungan manual masih sering digunakan dan berupaya beralih ke solusi berbasis teknologi.⁹ Skyfield mengotomatisasi dan meningkatkan akurasi hisab secara drastis, mengeliminasi kesalahan manusia dan memungkinkan perhitungan untuk jangka waktu yang sangat panjang dengan presisi tinggi.

Skyfield berfungsi sebagai jembatan yang menghubungkan hisab dan rukyat, mengatasi kesenjangan metodologis yang seringkali menjadi sumber perbedaan. Dengan menyediakan hasil hisab yang sangat presisi dan dapat diandalkan, Skyfield memungkinkan pengamat rukyat untuk lebih fokus dan akurat dalam upaya mereka. Ini mengurangi ambiguitas dan subjektivitas yang melekat pada rukyat murni, sekaligus memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk hisab yang tidak hanya cepat tetapi juga memperhitungkan detail astronomis yang kompleks. Dengan demikian, Skyfield mendorong konvergensi antara kedua metode, menghasilkan penentuan awal bulan yang lebih koheren dan diterima luas.

Perbandingan dengan Perangkat Lunak Astronomi Lain

Skyfield dapat dibandingkan dengan perangkat lunak astronomi lain yang tersedia:

- **Stellarium:** Perangkat lunak ini populer untuk visualisasi langit malam dan simulasi astronomi. Namun, beberapa peneliti menyatakan bahwa Stellarium mungkin tidak cukup akurat untuk tujuan arkeo-astronomi atau perhitungan presisi tinggi di masa lalu, karena adanya potensi ketidakakuratan dalam model precesi atau koreksi waktu perjalanan cahaya.³² Meskipun sangat baik untuk edukasi dan pengamatan umum, akurasinya mungkin tidak selalu setara dengan standar penelitian yang diperlukan untuk penentuan hilal yang sangat sensitif.
- **Accurate Times:** Ini adalah perangkat lunak yang diadopsi secara resmi oleh beberapa kementerian urusan Islam (misalnya, Yordania dan UEA) untuk menghitung waktu salat dan arah kiblat.³⁵ Accurate Times juga mampu menghitung visibilitas hilal dan dilaporkan memiliki akurasi yang sangat tinggi (dalam satu detik) dibandingkan dengan Astronomical Almanac USNO untuk waktu salat.³⁵ Perangkat lunak ini juga memungkinkan koreksi refraksi berdasarkan

suhu dan tekanan, mirip dengan Skyfield.³⁵ Perbedaan utama mungkin terletak pada sifat *open-source* dan fleksibilitas Skyfield sebagai pustaka Python yang dapat diintegrasikan ke dalam proyek kustom.

- **PyEphem:** Skyfield sebenarnya adalah penulisan ulang PyEphem dari awal dalam *pure Python*.³⁶ Ini berarti Skyfield mewarisi banyak fungsionalitas PyEphem tetapi dengan arsitektur yang lebih modern, lebih mudah diinstal tanpa kompilasi, dan terus dikembangkan.

Skyfield menonjol sebagai pilihan unggul untuk riset dan aplikasi falak kritis karena sifatnya yang *open-source*, desain Pythonic yang memungkinkan fleksibilitas tinggi, dan akurasi tingkat penelitian yang didukung oleh data ephemeris JPL. Ini menjadikannya alat yang ideal untuk studi mendalam, pengembangan kriteria baru, dan integrasi ke dalam sistem kalender yang lebih canggih, melampaui kemampuan perangkat lunak visualisasi umum atau solusi *proprietary* yang mungkin kurang transparan dalam metodologinya.

Tantangan dan Prospek Masa Depan Skyfield dalam Ilmu Falak

Meskipun Skyfield menawarkan kemampuan yang luar biasa untuk penentuan hilal, adopsi dan integrasinya dalam praktik keagamaan dan ilmiah yang lebih luas tidak tanpa tantangan.

Tantangan Adopsi dan Integrasi

Salah satu tantangan utama adalah perlunya penerimaan yang lebih luas dari perangkat lunak berbasis hisab presisi tinggi oleh otoritas keagamaan dan masyarakat umum. Meskipun akurasi ilmiahnya tak terbantahkan, keputusan penentuan awal bulan seringkali melibatkan aspek sosial, budaya, dan keagamaan yang kompleks, bukan hanya teknis.³⁷ Mengintegrasikan alat komputasi canggih seperti Skyfield ke dalam kerangka kerja tradisional yang sudah ada memerlukan dialog berkelanjutan dan pendidikan untuk membangun kepercayaan dan pemahaman. Perbedaan dalam kriteria visibilitas hilal yang digunakan oleh berbagai organisasi Islam juga masih menjadi hambatan untuk unifikasi, meskipun Skyfield dapat mengevaluasi semuanya.

Pengembangan Lebih Lanjut dan Kolaborasi

Prospek masa depan Skyfield dalam ilmu falak sangat cerah. Pustaka ini dapat terus dikembangkan dan diintegrasikan ke dalam aplikasi yang lebih ramah pengguna, membuatnya lebih mudah diakses oleh ahli falak yang tidak memiliki latar belakang pemrograman mendalam. Inisiatif seperti pengembangan perangkat lunak AlFalak 2025 oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) untuk Kementerian Agama Indonesia menunjukkan tren menuju penggunaan solusi berbasis teknologi untuk mempermudah hisab awal bulan Hijriah.⁹ Skyfield, sebagai pustaka *open-source* yang kuat, dapat menjadi komponen inti dalam pengembangan aplikasi semacam itu, mendorong kolaborasi antara komunitas pengembang perangkat lunak dan ahli falak. Kontribusi *open-source* dapat mempercepat pengembangan fitur baru dan memastikan pembaruan berkelanjutan sesuai dengan kemajuan astronomi.

Peran dalam Kalender Hijriah Global Tunggal

Skyfield memiliki peran krusial dalam memfasilitasi terwujudnya Kalender Hijriah Global Tunggal (KHGT). Dengan menyediakan kemampuan untuk menghitung posisi benda langit dengan presisi yang diperlukan untuk kriteria KHGT (misalnya, ketinggian 5 derajat dan elongasi 8 derajat di suatu lokasi di Bumi pada saat konjungsi sebelum 00:00 UTC), Skyfield dapat menjadi tulang punggung komputasi yang kokoh untuk sistem kalender terpadu.²² Ini memungkinkan simulasi dan verifikasi kriteria global secara konsisten di seluruh dunia, mendukung upaya untuk mencapai keseragaman satu hari satu tanggal yang menjadi tujuan utama KHGT.¹

Skyfield berfungsi sebagai pilar inovasi dan harmonisasi dalam ilmu falak. Kemampuannya untuk menyediakan perhitungan astronomi yang sangat akurat, efisien, dan dapat disesuaikan, memberdayakan para ahli falak untuk mengatasi tantangan historis dalam penentuan kalender Hijriah. Dengan terus mendorong adopsi dan integrasinya ke dalam praktik hisab dan rukyat, Skyfield berpotensi besar untuk tidak hanya meningkatkan akurasi dan prediktabilitas, tetapi juga untuk memupuk persatuan umat Islam dalam perayaan hari-hari suci mereka secara global.

Kesimpulan

Skyfield adalah pustaka Python yang revolusioner dalam bidang astronomi komputasi, secara signifikan menjembatani ilmu falak tradisional dengan kemajuan sains modern. Kemampuannya untuk melakukan perhitungan posisi benda langit dengan presisi luar

biasa, didukung oleh data ephemeris JPL yang merupakan "standar emas," serta penanganan canggih terhadap skala waktu dan sistem koordinat, menjadikannya alat yang sangat andal untuk penentuan awal bulan Hijriah.

Pustaka ini tidak hanya mengotomatisasi tugas perhitungan yang rumit, sehingga membebaskan para ahli falak untuk fokus pada analisis dan interpretasi yang lebih mendalam, tetapi juga menyediakan parameter kunci visibilitas hilal—seperti ketinggian, azimut, elongasi, iluminasi, dan *lag time*—dengan akurasi yang tak tertandingi. Kemampuan Skyfield untuk mengoreksi refraksi atmosfer berdasarkan kondisi suhu dan tekanan aktual semakin meningkatkan realisme prediksinya, sebuah faktor krusial dalam pengamatan hilal yang sensitif.

Dalam konteks penentuan awal bulan Hijriah, Skyfield terbukti sangat relevan. Pustaka ini dapat secara efektif digunakan untuk mengevaluasi berbagai kriteria visibilitas hilal yang ada, mulai dari Wujudul Hilal yang berbasis geometris, Imkanur Rukyat MABIMS Neo dengan ambang batas ketinggian dan elongasi spesifik, hingga kriteria Kalender Hijriah Global Tunggal (KHGT) yang ambisius, serta model empiris seperti kriteria Odeh/Yallop. Fleksibilitas ini menjadikan Skyfield sebagai laboratorium virtual yang memungkinkan para peneliti menguji dan mengembangkan kriteria baru.

Di Indonesia, Skyfield berperan sebagai katalisator evolusi hisab, mendukung upaya Kementerian Agama untuk memadukan hisab dengan rukyat. Dengan menyediakan panduan yang akurat bagi pengamat di lapangan dan meningkatkan efisiensi perhitungan, Skyfield membantu mengatasi tantangan yang melekat pada metode tradisional. Meskipun tantangan adopsi dan integrasi masih ada, potensi Skyfield untuk mendorong harmonisasi dan unifikasi kalender Hijriah global sangat besar.

Secara keseluruhan, Skyfield bukan hanya alat hitung biasa; ia adalah jembatan penting yang menghubungkan ilmu falak tradisional dengan kemajuan astronomi modern. Dengan kemampuannya untuk menghitung posisi benda langit dengan presisi luar biasa dan mempertimbangkan berbagai faktor penentu visibilitas, Skyfield memungkinkan para ahli falak untuk menyusun kalender Hijriah yang akurat, prediktif, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah, mendukung upaya persatuan umat Islam dalam penentuan awal bulan yang seragam di seluruh dunia.

Karya yang dikutip

1. Kalender Hijriah Global Tunggal: Jalan Solusi untuk Menyatukan Umat Islam, diakses Juni 29, 2025, <https://suaramuhammadiyah.id/read/kalender-hijriah-global-tunggal-jalan-solusi-untuk-menyatukan-umat-islam>
2. Hisab dan Rukyatul Hilal Oleh Drs, Baidhowi.HB,S.H | (31/10), diakses Juni 29, 2025, <https://www.ms-aceh.go.id/berita-artikel-galeri/artikel/174-hisab-dan-rukayatul-hilal-oleh-drs-baidhowihbsh--3110.html>
3. Implikasi Kriteria Neo-Mabims Pada Penentuan 1 Dzulhijjah 1443 H (Studi Kritis Konsep Matla' dalam Hadis) | Azimuth: Journal of Islamic Astronomy, diakses Juni 29, 2025, <https://jurnalfsh.uinsa.ac.id/index.php/azimuth/article/view/1494>
4. Pentingnya Kalender Islam Global dan Upaya Muhammadiyah Mewujudkannya, diakses Juni 29, 2025, <https://muhammadiyah.or.id/2022/06/pentingnya-kalender-islam-global-dan-upaya-muhammadiyah-mewujudkannya/>
5. Skyfield — documentation - Rhodes Mill, diakses Juni 29, 2025, <https://rhodesmill.org/skyfield/>
6. Planets and their moons: JPL ephemeris files — Skyfield documentation - Rhodes Mill, diakses Juni 29, 2025, <https://rhodesmill.org/skyfield/planets.html>
7. Skyfield's Accuracy and Efficiency - Polar Motion - Rhodes Mill, diakses Juni 29, 2025, <https://rhodesmill.org/skyfield/accuracy-efficiency.html>
8. Installing Skyfield - Rhodes Mill, diakses Juni 29, 2025, <https://rhodesmill.org/skyfield/installation.html>
9. Kemenag Terima Software Alfalak 2025 untuk Permudah Hisab Awal Bulan Hijriah, diakses Juni 29, 2025, <https://kemenag.go.id/nasional/kemenag-terima-software-alfalak-2025-untuk-permudah-hisab-awal-bulan-hijriah-yfnAy>
10. skyfield - PyPI, diakses Juni 29, 2025, <https://pypi.org/project/skyfield/>
11. Observing given barycentric coordinates from Earth #783 - GitHub, diakses Juni 29, 2025, <https://github.com/skyfielders/python-skyfield/discussions/783>
12. API Reference — Almanac — Skyfield documentation - Rhodes Mill, diakses Juni 29, 2025, <https://rhodesmill.org/skyfield/api-almanac.html>
13. Almanac Computation — Skyfield documentation - Rhodes Mill, diakses Juni 29, 2025, <https://rhodesmill.org/skyfield/almanac.html>
14. python-skyfield/skyfield/positionlib.py at master - GitHub, diakses Juni 29, 2025, <https://github.com/skyfielders/python-skyfield/blob/master/skyfield/positionlib.py>
15. Examples — Skyfield documentation - Rhodes Mill, diakses Juni 29, 2025, <https://rhodesmill.org/skyfield/examples.html>
16. Positions — Skyfield documentation - Rhodes Mill, diakses Juni 29, 2025, <https://rhodesmill.org/skyfield/positions.html>
17. Correction of atmospheric refraction errors in radio height finding, diakses Juni 29, 2025, https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/67D/jresv67Dn2p139_A1b.pdf
18. Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees, diakses Juni 29, 2025,

- <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740007037>
19. (PDF) Implementasi Kriteria Visibilitas Neo-MABIMS dalam Penentuan Awal Bulan Hijriah, diakses Juni 29, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/381395055_Implementasi_Kriteria_Visibilitas_Neo-MABIMS_dalam_Penentuan_Awal_Bulan_Hijriah
 20. Indonesia Terapkan Kriteria Baru Penetapan Bulan Hijriah - BRIN, diakses Juni 29, 2025,
<https://www.brin.go.id/news/117816/indonesia-terapkan-kriteria-baru-penetapan-bulan-hijriah>
 21. Tentang Kalender Hijriah Global Tunggal (KHGT) - Suara Muhammadiyah, diakses Juni 29, 2025,
<https://suaramuhammadiyah.id/read/tentang-kalender-hijriah-global-tunggal-khgt>
 22. Satukan Perbedaan, UMS Selenggarakan Sosialisasi Kalender Hijriah Global Tunggal, diakses Juni 29, 2025,
<https://news.ums.ac.id/id/02/2024/satukan-perbedaan-ums-selenggarakan-sosialisasi-kalender-hijriah-global-tunggal/>
 23. Muhammadiyah Kini Gunakan KHGT untuk Penentuan Awal Bulan Hijriah, Apa yang Beda Sebelumnya? - Kompas.com, diakses Juni 29, 2025,
<https://www.kompas.com/tren/read/2024/07/10/180000265/muhammadiyah-kini-gunakan-khgt-untuk-penentuan-awal-bulan-hijriah-apa-yang?page=all>
 24. (PDF) New Criterion for Lunar Crescent Visibility - ResearchGate, diakses Juni 29, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/225099773_New_Criterion_for_Lunar_Crescent_Visibility
 25. When Astronomy Meets AI: Manazel For Crescent Visibility Prediction in Morocco - arXiv, diakses Juni 29, 2025, <https://arxiv.org/html/2503.21634v1>
 26. Hilal Awal Syawal di Indonesia Penuhi Kriteria Baru MABIMS - Kemenag DKI, diakses Juni 29, 2025,
<https://dki.kemenag.go.id/berita/hilal-awal-syawal-di-indonesia-penuhi-kriteria-baru-mabims-9xamR>
 27. Problem Kontras dan Visibilitas Hilal Penentu Awal Syawal 1444 H - langitselatan, diakses Juni 29, 2025,
<https://langitselatan.com/2023/04/30/problem-kontras-dan-visibilitas-hilal-penentu-awal-syawal-1444-h/>
 28. (PDF) Analysis Tool for Lunar Crescent Visibility Criterion Based on ..., diakses Juni 29, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/370961599_Analysis_Tool_for_Lunar_Crescent_Visibility_Criterion_Based_on_Integrated_Lunar_Crescent_Database
 29. Kementerian Agama ungkap kemajuan hisab dan rukyat di Indonesia - ANTARA News, diakses Juni 29, 2025,
<https://www.antaraneews.com/berita/4001160/kementerian-agama-ungkap-kemajuan-hisab-dan-rukyat-di-indonesia>
 30. Ahli BRIN Beber Keterbatasan Teknologi Buat Cek Hilal Ramadhan - CNN Indonesia, diakses Juni 29, 2025,

- <https://www.cnnindonesia.com/teknologi/20240310162654-199-1072780/ahli-brin-beber-keterbatasan-teknologi-buat-cek-hilal-ramadhan>
31. Measurements of sky brightness at Bosscha Observatory, Indonesia - ResearchGate, diakses Juni 29, 2025, https://www.researchgate.net/publication/343737781_Measurements_of_sky_brightness_at_Bosscha_Observatory_Indonesia
 32. Accuracy for archeo-astronomy · Stellarium stellarium · Discussion #3120 - GitHub, diakses Juni 29, 2025, <https://github.com/Stellarium/stellarium/discussions/3120>
 33. realism and accuracy · Stellarium stellarium · Discussion #1504 - GitHub, diakses Juni 29, 2025, <https://github.com/Stellarium/stellarium/discussions/1504>
 34. GRS :Who's wrong, Stellarium, skyandtelescope or me (I can guess!) - Stargazers Lounge, diakses Juni 29, 2025, <https://stargazerslounge.com/topic/208677-grs-whos-wrong-stellarium-skyandtelescope-or-me-i-can-guess/>
 35. مركز الفلك الدولي | International Astronomical Center (IAC), diakses Juni 29, 2025, <https://astronomycenter.net/accut.html?l=en>
 36. Skyfield versus PyEphem - python - Stack Overflow, diakses Juni 29, 2025, <https://stackoverflow.com/questions/45066882/skyfield-versus-pyephem>
 37. Analisis Perbandingan Antara Metode Hisab dan Rukyat dalam Menentukan Awal Bulan Ramadhan di Indonesia - JIIP, diakses Juni 29, 2025, <http://www.jiip.stkipyapisdmpu.ac.id/jiip/index.php/JIIP/article/download/6203/4647>
 38. A Semantic Literature Review on Crescent Visibility: Trends, Models, and Implications for the Islamic Calendar, diakses Juni 29, 2025, <https://journal.walisongo.ac.id/index.php/al-hilal/article/view/26099/6756>