

Analisis Periode Rotasi Matahari Berdasarkan Pergerakan Bintik Matahari AR 4207 pada Citra SolarHam Tanggal 1–8 September 2025

Rustaman^{1*}, Rodika Utama²

^{1,2}Magister Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Ahmad Dahlan

*Email: rodika@ruangguru.com

Received 22/01/2026 ; Revised 03/02/2026 ; Accepted 03/02/2026 ; Published 04/02/2026

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menentukan periode rotasi Matahari menggunakan metode analisis pergerakan bintik Matahari pada citra cakram Matahari. Bintik Matahari aktif AR 4207 diamati pada dua citra yang diambil pada tanggal 1 dan 8 September 2025. Posisi bintik pada masing-masing citra diproyeksikan ke dalam diagram lingkaran dengan meridian tengah sebagai acuan untuk menentukan sudut perpindahan. Hasil pengukuran menunjukkan sudut posisi masing-masing sebesar $\theta_p \approx 43^\circ$ dan $\theta_R \approx 50^\circ$, sehingga total sudut perpindahan adalah $\theta_{total} = 93^\circ$ dalam selang waktu tujuh hari. Dengan memasukkan nilai tersebut ke dalam persamaan $T = t \times \left(\frac{360^\circ}{\theta}\right)$, diperoleh periode rotasi Matahari sebesar $T \approx 27,1$ hari. Nilai ini konsisten dengan periode rotasi sinodik Matahari yang umum terjadi pada lintang rendah. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa analisis bintik Matahari dapat digunakan sebagai metode sederhana dan efektif untuk menentukan rotasi Matahari dalam kegiatan pembelajaran astronomi.

Kata Kunci: bintik matahari, periode rotasi matahari, AR 4207, SolarHam, alat peraga.

Abstract

This study aims to determine the rotational period of the Sun by analyzing the motion of a sunspot across the solar disk. The active sunspot region AR 4207 was examined using solar continuum images acquired on 1 and 8 September 2025. The position of the sunspot on each date was projected onto a circular diagram with the central meridian as the reference axis in order to measure its angular displacement. The projected angles relative to the central meridian were found to be $\theta_p \approx 43^\circ$ on 1 September and $\theta_R \approx 50^\circ$ on 8 September, yielding a total displacement of $\theta_{total} = 93^\circ$ over a seven-day interval. By applying the relation $T = t \times \left(\frac{360^\circ}{\theta}\right)$, the solar rotation period was calculated to be $T \approx 27,1$ days. This result aligns with the typical synodic rotation period of the Sun at low latitudes. The findings demonstrate that sunspot tracking provides a simple and effective method for estimating the Sun's rotation, making it well suited for educational and observational activities in astronomy.

Keywords: sunspot, solar rotation period, AR 4207, SolarHam, teaching aid.

PENDAHULUAN

Rotasi Matahari merupakan salah satu parameter fundamental dalam kajian fisika Matahari karena berperan besar dalam pembentukan medan magnet, dinamika plasma, serta evolusi siklus aktivitas Matahari (Thompson et al., 2003; Babcock, 1961; Petrovay, 2010). Sejumlah penelitian observasional menunjukkan bahwa Matahari tidak berotasi sebagai benda padat, melainkan mengalami rotasi diferensial, di mana bagian ekuator memiliki periode rotasi lebih pendek dibandingkan lintang tinggi (Beck, 2000; Rieutord & Rincon, 2010).

Kajian modern mengenai rotasi diferensial ini menunjukkan bahwa periode rotasi Matahari berkisar sekitar 25 hari di wilayah ekuator dan meningkat hingga lebih dari 30 hari menuju daerah kutub, berdasarkan pengamatan sistematis fitur fotosferik seperti bintik Matahari. Penjelasan ilmiah yang konsisten mengenai variasi rotasi tersebut dapat ditemukan

dalam studi komprehensif mengenai siklus aktivitas Matahari dan dinamika fotosfer (Hathaway, 2015).

Sebagai salah satu penanda utama aktivitas magnetik Matahari, bintik Matahari (*sunspots*) telah lama digunakan sebagai *tracer* untuk menelusuri rotasi Matahari (Babcock, 1961). Pendekatan pelacakan bintik Matahari telah digunakan sejak era awal pengamatan teleskopik hingga penelitian modern dan terbukti efektif sebagai metode observasi untuk mengkaji rotasi Matahari. Analisis jejak bintik Matahari dalam rentang waktu panjang menunjukkan bahwa metode ini bersifat reliabel dan stabil dalam menentukan profil rotasi diferensial pada berbagai lintang (Poljančić Beljan et al., 2017).

Hasil serupa menunjukkan bahwa karakteristik rotasi fotosfer berkaitan erat dengan variasi siklus aktivitas Matahari dan dapat dimonitor secara akurat melalui pergerakan bintik Matahari dari hari ke hari (Li et al., 2013). Seiring dengan kemajuan teknologi observasi, metode pelacakan bintik Matahari terus berkembang, termasuk melalui pendekatan semi-otomatis berbasis pengolahan citra kontinu yang memanfaatkan data dari instrumen *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) pada wahana *Solar Dynamics Observatory* (SDO) (Brown & Walker, 2021).

Kajian terbaru mengenai rotasi Matahari dan rotasi diferensial menunjukkan bahwa berbagai pendekatan observasional terus digunakan untuk mengkuantifikasi pergerakan bintik Matahari dan karakteristik rotasi permukaan Matahari. Sebagai contoh, analisis rotasi kelompok *sunspot* jangka panjang dari data observasi *Watukosek Solar Observatory* mengonfirmasi pola rotasi diferensial di berbagai lintang Matahari (Widodo et al., 2025). Selain itu, studi terhadap kelompok *sunspot* yang berulang membantu memperkirakan laju rotasi sinodik dan pergeseran lintang secara lebih detail (McCann et al., 2024). Sementara itu, pengukuran profil rotasi Matahari menggunakan data *Kodaikanal Solar Observatory* menyajikan parameter rotasi yang konsisten dengan model dinamika Matahari modern (Jha et al., 2021). Meskipun demikian, berbagai penelitian menunjukkan bahwa pendekatan geometris sederhana, seperti pengukuran perpindahan sudut bintik Matahari terhadap meridian tengah, tetap relevan dan efektif baik untuk penelitian dasar maupun tujuan pembelajaran. Pendekatan ini memanfaatkan bintik Matahari sebagai indikator yang relatif mudah diamati untuk memahami struktur dan rotasi fotosfer (Clark et al., 1979).

Dalam konteks pendidikan astronomi di Indonesia, telah dikembangkan model pembelajaran berbasis alat peraga bintik Matahari yang memanfaatkan LED dan mikrokontroler Arduino. Pada pendekatan tersebut, periode rotasi Matahari dihitung melalui proyeksi posisi bintik ke dalam diagram lingkaran dan divisualisasikan sebagai simulasi rotasi. Metode ini terbukti efektif sebagai media pembelajaran karena tidak memerlukan instrumen observasi tingkat lanjut (Silta & Pramudya, 2017).

Sejalan dengan pendekatan tersebut, penelitian ini mengusulkan perbedaan fokus dibandingkan penelitian-penelitian sebelumnya, yaitu dengan menggabungkan data observasi Matahari profesional yang bersumber dari SolarHam dengan metode analisis geometris sederhana berbasis proyeksi visual. Berbeda dari studi terdahulu yang umumnya memanfaatkan data arsip jangka panjang, koordinat heliografis formal, atau algoritma pelacakan otomatis, penelitian ini menggunakan dua citra observasi Matahari aktual dan terkini yang diperoleh pada tahun 2025 untuk melacak pergerakan bintik Matahari aktif AR 4207 secara manual. Pemanfaatan data observasi terbaru ini memberikan representasi langsung kondisi aktivitas Matahari pada periode pengamatan. Pendekatan yang digunakan tidak ditujukan untuk meningkatkan presisi teknis, melainkan untuk menunjukkan bahwa periode rotasi sinodik Matahari tetap dapat diestimasi secara akurat melalui metode yang

sederhana, transparan, dan mudah direplikasi dalam konteks pembelajaran astronomi. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi sebagai contoh implementasi metode observasi Matahari berbasis data nyata yang aplikatif dan relevan untuk kegiatan edukatif, khususnya pada pembelajaran fisika dan astronomi tingkat perguruan tinggi.

METODE PENELITIAN

Sumber Data Citra Matahari

Penelitian ini menggunakan dua citra cakram penuh Matahari yang diperoleh dari laman SolarHam, sebuah portal observasi Matahari yang menyediakan data harian hasil pengamatan instrumen *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) pada wahana *Solar Dynamics Observatory* (SDO) (Schou et al., 2012). Citra yang dianalisis merupakan citra kontinu tanggal 1 September 2025 dan 8 September 2025, yang keduanya menampilkan bintik Matahari aktif AR 4207 sedang bergerak dari sisi timur menuju sisi barat piringan Matahari akibat rotasi fotosfer.

Kedua citra diunduh dalam format JPG dengan resolusi penuh dan dianalisis secara visual menggunakan perangkat lunak tampilan gambar standar, tanpa penerapan teknik pemrosesan citra lanjutan. Pendekatan ini dipilih secara sengaja untuk mempertahankan kesederhanaan metode serta menekankan aspek geometris dasar dalam penentuan sudut rotasi bintik Matahari, sehingga relevan untuk tujuan pembelajaran dan analisis tingkat dasar.

Pemilihan rentang waktu tujuh hari didasarkan pada pertimbangan bahwa selang tersebut menghasilkan pergeseran longitudinal bintik yang cukup signifikan, namun masih berada dalam fase evolusi struktur bintik yang relatif stabil. Dengan demikian, sudut perpindahan dapat diukur secara jelas dan konsisten, sekaligus meminimalkan ketidakpastian akibat perubahan morfologi bintik Matahari.

Penentuan Pusat dan Sumbu Referensi Piringan Matahari

Untuk setiap citra, analisis diawali dengan menentukan pusat piringan Matahari sebagai acuan geometris utama. Titik pusat ditentukan secara visual dengan mengidentifikasi tepi piringan, kemudian menarik garis horizontal dan vertikal yang menyentuh batas tepi kiri–kanan serta atas–bawah piringan sehingga perpotongan kedua garis menghasilkan pusat cakram. Setelah pusat diperoleh, garis vertikal melalui titik tersebut ditetapkan sebagai meridian tengah yang berfungsi sebagai garis referensi longitude. Selanjutnya, garis horizontal yang melalui pusat digunakan sebagai garis ekuator proyeksi. Kedua garis ini membentuk sistem referensi ortogonal yang memungkinkan penentuan sudut posisi bintik Matahari secara konsisten pada kedua citra.

Proyeksi Posisi Bintik Matahari ke Diagram Lingkaran

Posisi bintik Matahari aktif AR 4207 pada masing-masing citra diproyeksikan ke dalam diagram lingkaran yang merepresentasikan piringan Matahari secara skematis. Diagram tersebut dibangun dengan menggambar ulang lingkaran sebagai model ideal piringan Matahari yang dilengkapi dengan meridian tengah dan garis ekuator proyeksi. Posisi bintik pada citra asli kemudian ditransfer ke dalam diagram dengan mempertahankan arah relatif terhadap pusat piringan (timur–barat) serta jaraknya secara proporsional.

Dua titik proyeksi, yaitu titik P untuk tanggal 1 September dan titik R untuk tanggal 8 September, dihubungkan masing-masing dengan pusat lingkaran menggunakan garis radius. Konstruksi ini memudahkan pengukuran sudut perpindahan bintik serta memberikan

representasi visual lintasan rotasi Matahari yang jelas dan terukur, sebagaimana diterapkan dalam pendekatan edukatif sebelumnya (Silta & Pramudya, 2017).

Pengukuran Sudut Posisi Bintang

Setelah diagram proyeksi terbentuk, sudut posisi bintang terhadap meridian tengah diukur menggunakan busur derajat. Sudut pertama, θ_P , merupakan sudut antara meridian tengah dan radius yang mengarah ke bintang AR 4207 pada citra tanggal 1 September 2025. Sudut kedua, θ_R , merupakan sudut serupa untuk citra tanggal 8 September 2025. Kedua sudut ini dihitung dalam nilai absolut untuk menghilangkan arah timur–barat, sehingga total sudut perpindahan bintang selama interval tujuh hari diperoleh melalui penjumlahan sederhana: $\theta_{total} = \theta_P + \theta_R$. Pengukuran secara manual melalui diagram proyeksi ini dipilih karena sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu memperlihatkan bahwa rotasi Matahari dapat dianalisis menggunakan pendekatan geometris sederhana tanpa memerlukan perangkat astrofisika tingkat lanjut.

Perhitungan Periode Rotasi Sinodik Matahari

Perhitungan periode rotasi sinodik Matahari dilakukan berdasarkan hubungan linier antara sudut perpindahan bintang dan selang waktu pengamatan. Setelah total sudut perpindahan θ_{total} diperoleh dari penjumlahan sudut posisi bintang pada dua tanggal pengamatan, nilai tersebut digunakan dalam persamaan dasar rotasi Matahari, yaitu $T = t \times \left(\frac{360^\circ}{\theta}\right)$. Persamaan ini menyatakan bahwa Matahari menyelesaikan satu putaran penuh sebesar 360° dalam periode T , sehingga sudut rotasi yang dihasilkan dalam waktu t hari berbanding lurus dengan persentase putaran penuh yang telah ditempuh. Dalam penelitian ini, selang waktu antara dua citra pengamatan adalah tujuh hari, sementara θ_{total} ditentukan melalui pengukuran manual menggunakan diagram proyeksi. Metode ini merupakan pendekatan sederhana namun efektif yang banyak digunakan dalam studi pelacakan bintang Matahari, baik dalam konteks observasi pendidikan maupun penelitian astrofisika dasar.

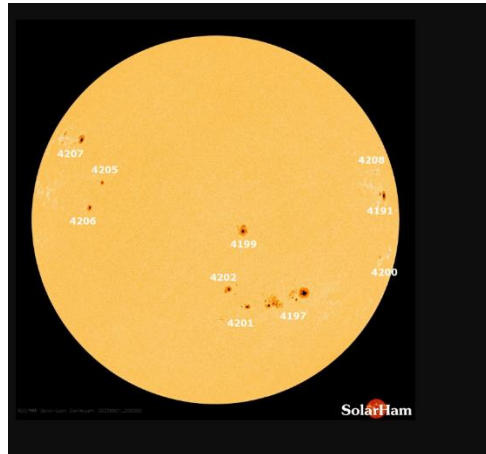
Validitas dan Keterbatasan Metode

Metode pelacakan bintang Matahari melalui proyeksi visual memiliki tingkat validitas yang cukup baik dalam penentuan periode rotasi sinodik, khususnya untuk rentang waktu pengamatan yang relatif singkat dan citra dengan resolusi memadai. Bintang Matahari telah lama digunakan sebagai *tracer* yang efektif untuk memantau rotasi permukaan Matahari, baik dalam studi jangka panjang maupun analisis berbasis data observasi modern (Poljančič Beljan et al., 2017; Li et al., 2013; Brown & Walker, 2021).

Pendekatan ini juga sejalan dengan metode pembelajaran berbasis media visual yang memungkinkan rotasi Matahari dihitung melalui konstruksi geometris sederhana. Meskipun demikian, metode ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain ketelitian pengukuran sudut secara manual, variasi posisi bintang terhadap lintang Matahari, serta kemungkinan perubahan morfologi bintang dari waktu ke waktu. Namun, dalam konteks penelitian ini, pendekatan tersebut tetap memberikan estimasi periode rotasi sinodik yang cukup akurat dan konsisten dengan nilai yang diterima secara umum dalam literatur astrofisika (Silta & Pramudya, 2017).

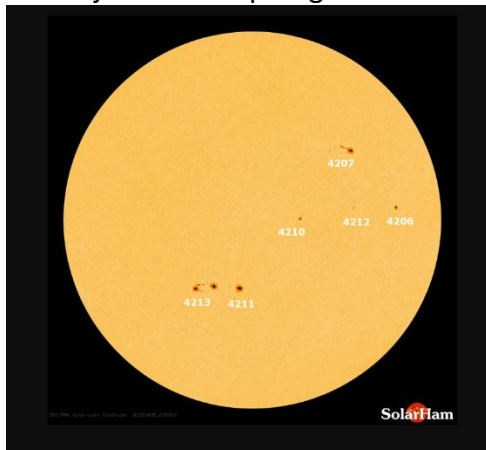
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis citra pada tanggal 1 September 2025 seperti diperlihatkan pada **Gambar (1)** menunjukkan bahwa bintik Matahari aktif AR 4207 berada di sisi timur piringan Matahari dengan kemiringan yang relatif moderat terhadap meridian tengah.



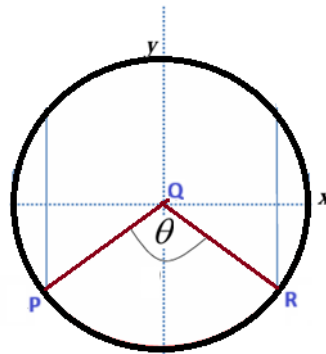
Gambar 1. Citra Bintik Matahari AR 4207 pada 1 September 2025 (sumber: solarham.net)

Pada citra tanggal 8 September 2025 seperti diperlihatkan pada **Gambar (2)**, AR 4207 telah bergeser secara signifikan menuju sisi barat piringan.



Gambar 2. Citra Bintik Matahari AR 4207 pada 8 September 2025 (sumber: solarham.net)

Selama rentang waktu (t) 7 hari bintik matahari telah bergeser posisinya mengikuti gerak rotasi matahari. Pergeseran posisi bintik matahari dapat dinyatakan dengan terlihat seperti **Gambar (3)**. Sudut dibentuk oleh segitiga PQR. Titik P adalah titik posisi matahari pada waktu ke-1 (1 September) dan titik R adalah titik posisi matahari pada waktu ke-2 (8 September). Titik Q adalah titik tengah diameter tampak piringan matahari. Setelah diproyeksikan ke diagram lingkaran, sudut posisi bintik terhadap meridian tengah pada tanggal 1 september sebesar $\theta_P \approx 43^\circ$, sedangkan sudut proyeksi di tanggal 8 september terhadap meridian tengah sebesar $\theta_R \approx 50^\circ$. Kedua nilai sudut ini merupakan hasil pengukuran manual menggunakan busur derajat pada diagram proyeksi yang dibangun dari citra asli.



Gambar 3. Pergeseran Bintik Matahari selama 7 hari

Perpindahan total bintik Matahari dalam rentang tujuh hari tersebut dihitung dengan menjumlahkan kedua sudut proyeksi sehingga diperoleh total sudut rotasi:

$$\begin{aligned}\theta_{total} &= \theta_P + \theta_R \\ \theta_{total} &= 43^\circ + 50^\circ \\ \theta_{total} &= 93^\circ\end{aligned}$$

Selang waktu antara dua citra pengamatan adalah:

$$\begin{aligned}t &= 8 \text{ september } 2025 - 1 \text{ september } 2025 \\ t &= 7 \text{ hari}\end{aligned}$$

Dengan demikian, periode rotasi sinodik Matahari dapat dihitung menggunakan persamaan dasar rotasi:

$$T = t \times \left(\frac{360^\circ}{\theta} \right)$$

Yang memberikan hasil numerik:

$$T = (7 \text{ hari}) \times \left(\frac{360^\circ}{93^\circ} \right) = 27,1 \text{ hari}$$

Nilai periode rotasi Matahari yang diperoleh dalam penelitian ini, yaitu $T = 27,1$ hari, berada sangat dekat dengan nilai periode rotasi sinodik Matahari yang telah diterima secara luas dalam literatur ilmiah. Periode rotasi sekitar 27 hari merupakan karakteristik rotasi Matahari sebagaimana diamati dari Bumi pada lintang rendah. Selain itu, analisis variasi aktivitas Matahari menunjukkan adanya komponen periodisitas dominan di sekitar 27 hari yang berkaitan langsung dengan rotasi fotosfer. Hasil-hasil tersebut mengonfirmasi bahwa sinyal aktivitas Matahari, termasuk variasi fotosfer dan radiasi kosmik, memiliki periodisitas sinodik pada kisaran 26–27 hari (NASA, 2013; Balthasar, 2007; Modzelewska & Alania, 2018).

Kedekatan hasil perhitungan dalam penelitian ini dengan nilai-nilai yang dilaporkan dalam literatur menunjukkan bahwa metode proyeksi geometris sederhana yang digunakan tetap mampu menghasilkan estimasi periode rotasi Matahari yang akurat, meskipun tidak memanfaatkan koordinat heliografis formal maupun algoritma pelacakan otomatis. Penggunaan bintik Matahari sebagai tracer telah terbukti konsisten dalam berbagai studi observasional heliofisika, baik untuk analisis rotasi jangka panjang maupun variasi rotasi antar siklus Matahari (Poljančić Beljan et al., 2017; Li et al., 2013). Temuan ini menegaskan bahwa pelacakan bintik melalui citra kontinu sebagaimana diterapkan dalam penelitian ini tetap relevan, khususnya dalam konteks pembelajaran astronomi.

Beberapa faktor, seperti posisi lintang bintik Matahari, perubahan morfologi, serta ketelitian pengukuran sudut secara manual, berpotensi menimbulkan deviasi kecil dari nilai ideal. Namun, pengaruh faktor-faktor tersebut tidak signifikan dalam konteks penentuan periode rotasi sinodik dasar. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan visual-

geometris sederhana sudah memadai untuk mengukur rotasi Matahari dan sejalan dengan model pembelajaran berbasis konstruksi geometris yang telah dikembangkan sebelumnya, sekaligus memberikan dasar empiris bagi pemahaman mahasiswa mengenai rotasi diferensial dan dinamika Matahari (Silta & Pramudya, 2017).

KESIMPULAN

Penelitian ini telah menerapkan metode pelacakan bintik Matahari untuk menentukan periode rotasi sinodik Matahari menggunakan citra cakram penuh tanggal 1 dan 8 September 2025. Berdasarkan proyeksi posisi bintik AR 4207 ke dalam diagram lingkaran dan pengukuran sudut terhadap meridian tengah, diperoleh sudut awal sebesar 43° dan sudut akhir sebesar 50° , sehingga total sudut perpindahan bintik dalam selang tujuh hari adalah 93° . Dengan menggunakan hubungan antara sudut rotasi dan waktu, diperoleh periode rotasi sinodik Matahari sebesar sekitar 27,1 hari.

Hasil ini menunjukkan bahwa metode proyeksi geometris sederhana dapat memberikan estimasi periode rotasi Matahari yang akurat meskipun tidak menggunakan analisis koordinat heliografis maupun pemrosesan citra tingkat lanjut. Pendekatan ini efektif sebagai sarana pembelajaran dan dapat digunakan dalam kegiatan eksperimen astronomi untuk memperkenalkan konsep rotasi Matahari dan dinamika fotosfer secara langsung berdasarkan data observasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Babcock, H. W. (1961). The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-Year Cycle. *The Astrophysical Journal*, 133. <https://doi.org/10.1086/147060>
- Balthasar, H. (2007). Rotational Periodicities in Sunspot Relative Numbers. *Astronomy & Astrophysics*, 471(1), 281–287. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077475>
- Beck, J. G. (2000). A Comparison of Differential Rotation Measurements. *Solar Physics*, 191, 47–70. <https://doi.org/10.1023/A:1005226402796>
- Brown, D., & Walker, A. (2021). A Semi-Automatic Method to Measure the Rotation of a Sunspot. *Solar Physics*, 296(48). <https://doi.org/10.1007/s11207-021-01787-4>
- Clark, D. H., Yallop, B. D., Richard, S., Emerson, B., & Rudd, P. J. (1979). Differential Rotation depends on Solar Activity. *Nature*, 280, 299–300. <https://doi.org/10.1038/280299a0>
- Hathaway, D. H. (2015). The Solar Cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 12(4). <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>
- Jha, B. K., Priyadarshi, A., Mandal, S., Chatterjee, S., & Banerjee, D. (2021). Measurements of Solar Differential Rotation Using the Century Long Kodaikanal Sunspot Data. *Solar Physics*, 296, 25.
- Li, K. J., Shi, X. J., Xie, J. L., Gao, P. X., Liang, H. F., Zhan, L. S., & Feng, W. (2013). Solar-Cycle-Related Variation of Solar Differential Rotation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 433(1), 521–527. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt744>
- McCann, A. D., Cadavid, A. C., Parthibhan, S., & Choudhary, D. P. (2024). Differential Rotation Rates of Recurrent Sunspot Groups Lasting Two or Three Passages in the Debrecen Photoheliographic Data Catalogue. *Solar Physics*, 299, 138.
- Modzelewska, R., & Alania, M. V. (2018). Quasi-Periodic Changes in the 3D Solar Anisotropy of Galactic Cosmic Rays for 1965–2014. *Astronomy & Astrophysics*, 609, A32. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731697>

- NASA. (2013). *Solar Rotation Varies by Latitude*. National Aeronautics and Space Administration. <https://www.nasa.gov/image-article/solar-rotation-varies-by-latitude/>
- Petrovay, K. (2010). Solar Cycle Prediction. *Living Reviews in Solar Physics*, 7(6). <https://doi.org/10.12942/lrsp-2010-6>
- Poljančič Beljan, I., Jurdana-Šepić, R., Brajša, R., Sudar, D., Ruždjak, D., Hržina, D., Pötzi, W., Hanslmeier, A., Veronig, A., Skokić, I., & Wöhl, H. (2017). Solar Differential Rotation in the Period 1964–2016 Determined by the Kanzelhöhe Data set. *Astronomy & Astrophysics*, 606, A72. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731047>
- Rieutord, M., & Rincon, F. (2010). The Sun's Supergranulation. *Living Reviews in Solar Physics*, 7(2). <https://doi.org/10.12942/lrsp-2010-2>
- Schou, J., Scherrer, P. H., Bush, R. I., Wachter, R., Couvidat, S., Rabello-Soares, M. C., & Tarbell, T. D. (2012). Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Physics*, 275, 229–259. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9842-2>
- Silta, Y. N., & Pramudya, Y. (2017). Pengembangan Alat Peraga Bintik Matahari Menggunakan LED Berbasis Arduino. *SPEKTRA: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 2(3), 195–202. <https://doi.org/10.21009/SPEKTRA.023.05>
- Thompson, M. J., Christensen-Dalsgaard, J., Miesch, M. S., & Toomre, J. (2003). The Internal Rotation of the Sun. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41, 599–643. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.41.011802.094848>
- Widodo, N., Muhamad, J., Pangestu, A. D., et al. (2025). Differential Rotation of Long-Lived Sunspot Groups in Solar Cycles 22–24 Determined by Watukosek Solar Observatory Data. *Solar Physics*, 300, 107.