

Bab II

Sejarah, Teknis, dan Kontribusi Pengamatan *Sunspot* di Indonesia

Silmie Vidiya Fani, Rian Pramudia Salasa, dan Siska Filawati

A. *Sunspot* dan Aktivitas Matahari

Matahari merupakan bintang yang paling dekat dengan Bumi, memiliki diameter 109 kali Bumi, dan massa 333 kali Bumi. Sebagai sebuah bintang, Matahari memiliki permukaan yang tersusun dari gas, terutama hidrogen dan helium. Inti Matahari memiliki temperatur dan tekanan yang ekstrem dan hal ini menyebabkan terjadinya reaksi nuklir yang menghasilkan cahaya dan panas yang kita rasakan sebagai sinar Matahari. Reaksi nuklir tersebut menyebabkan terjadinya gerakan konvektif material pada inti dan lapisan luar Matahari. Gerakan ini menghasilkan medan magnet yang bervariasi dan saling berinteraksi sehingga konfigurasi magnetik pada permukaan Matahari terus berubah dalam waktu yang singkat.

S. V. Fani*, R. P. Salasa & S. Filawati

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: silm001@brin.go.id

© 2025 Editor & Penulis

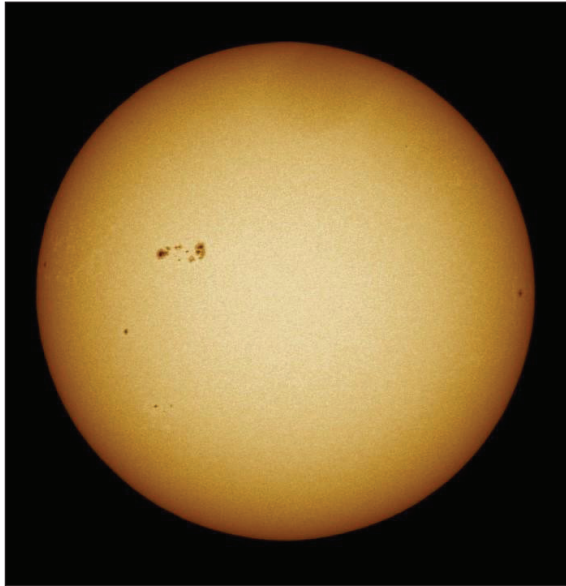
Fani, S. V., Salasa, R. P. & Filawati, S. (2025). Sejarah, Teknis, dan Kontribusi Pengamatan *Sunspot* di Indonesia. Dalam T. Djamaluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (23–57). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1485
E-ISBN: 978-602-6303-86-8

Aktivitas Matahari secara berkelanjutan menciptakan sebuah kondisi dinamis pada wilayah antarplanet yang disebut dengan cuaca antariksa. Cuaca antariksa memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kehidupan di Bumi. Pengamatan terhadap cuaca antariksa dilakukan secara kontinu oleh berbagai badan antariksa, lembaga penelitian, dan organisasi di seluruh dunia. Pengamatan cuaca antariksa melibatkan berbagai jenis kegiatan dan instrumen untuk mengamati fenomena yang terjadi di Matahari yang terkait dengan kondisi di wilayah antarplanet seperti angin Matahari dan medan magnet antarplanet.

Salah satu fenomena pada Matahari yang dapat diamati dari Bumi adalah bintik matahari (*sunspot*). Sunspot merupakan wilayah yang tampak gelap di permukaan Matahari (Gambar 2.1). Aktivitas magnetik yang terjadi di bagian dalam Matahari dapat muncul ke permukaan sebagai daerah unipolar maupun bipolar. Daerah dengan ukuran yang cukup besar biasanya akan muncul sebagai *sunspot*, sebuah fitur gelap pada fotosfer yang menandakan bahwa medan magnet sangat terkonsentrasi di lokasi-lokasi tersebut di permukaan Matahari (Solanki, 2003).

Pengamatan *sunspot* merupakan hal yang penting dalam penelitian Matahari. Kemunculannya sudah lama digunakan sebagai indikator utama aktivitas Matahari karena mudah diamati, bahkan dengan mata telanjang atau dengan bantuan alat sederhana. Penampakan *sunspot* pernah digunakan oleh tokoh astronomi dunia Johannes Kepler (1571-1630) untuk mengkonfirmasi teorinya tentang Matahari yang berotasi (Casanovas, 1997). Jumlah *sunspot* digunakan sebagai penanda siklus Matahari dapat menjadi peringatan awal terjadinya badai geomagnet dan masih banyak manfaat lainnya dalam melakukan pengamatan *sunspot*.

Jumlah *sunspot* digunakan sebagai penanda siklus Matahari yang dapat menggambarkan aktivitas Matahari. Aktivitas Matahari berkaitan dengan gangguan Matahari ke Bumi. Sunspot dengan medan magnet kompleks dapat memicu suar matahari, sedangkan flare dapat memicu *Coronal Mass Ejection* (CME). Pada 10 Maret 1989, terdapat flare yang memicu CME dan terjadi badai geomagnet



Sumber: Dok. BRIN Pasuruan (22 Juni 2022)

Gambar 2.1 *Sunspot* pada Permukaan Matahari

pada 12 Maret 1989 yang mengakibatkan aurora terlihat di wilayah Florida dan Cuba yang merupakan lintang rendah. Pada hari berikutnya, terjadi gangguan listrik di Quebec, Canada yang menyebabkan gangguan listrik selama 12 jam sehingga aktivitas ekonomi, bisnis, sekolah, dan aktivitas transportasi seperti kereta bawah tanah dan bandara terganggu. Pada era teknologi dan komunikasi seperti saat ini, dampak aktivitas Matahari menjadi semakin penting untuk diantisipasi. Komunikasi pada aktivitas penerbangan, kebergantungan pada koneksi internet dan sistem GNSS, aktivitas astronot di luar angkasa, induksi pada pembangkit listrik, hingga sistem kabel bawah laut dapat terdampak oleh aktivitas Matahari (Boteler, 2019). Oleh karena itu, pengamatan *sunspot* yang dapat menggambarkan aktivitas Matahari merupakan hal yang krusial untuk dilakukan dalam rangka mitigasi risiko dari dampak-dampak aktivitas Matahari terhadap kehidupan di Bumi.

B. Sejarah Pengamatan Sunspot

Catatan tentang kemunculan *sunspot* telah ditemukan pada dokumen-dokumen masa lampau dari China pada tahun 200 SM. Sebelum era teleskop, diyakini bahwa para astronom oriental melihat *sunspot* dengan mata telanjang, melalui filter pelemahan batu kristal atau batu giok yang dipoles, atau dengan refleksi melalui genangan cairan berwarna (Eddy et al, 1989). Sejak zaman sejarah hingga abad ke-16, hanya ditemukan sedikit catatan terkait *sunspot* dengan rata-rata satu *sunspot* per dekade. Laporan kemunculan *sunspot* sebelum era teleskop sering ditafsirkan sebagai tanda-tanda puncak siklus Matahari pada masanya, dengan premis bahwa *sunspot* yang terlihat adalah *sunspot* yang berukuran cukup besar yang secara statistik lebih umum terjadi pada masa puncak siklus Matahari.

Baru pada abad ke-17, ketika teleskop telah ditemukan dan dijual secara komersial, muncul ketertarikan terhadap pengamatan *sunspot*. Pada rentang waktu antara tahun 1610-1612, dalam kurun waktu yang hampir bersamaan terdapat beberapa astronom amatir dan ilmuwan yang mengamati Matahari menggunakan teleskop dan menemukan area gelap di permukaan Matahari. Thomas Harriot (1560–1621), seorang matematikawan asal Inggris, diketahui memiliki manuskrip yang berisi 199 sketsa *sunspot* yang observasi pertamanya dilakukan pada Desember 1610. Johan Fabricius (1587–1616), astronom amatir asal Belanda, menemukan bintik hitam yang bergerak secara perlahan dari pinggir ke tengah piringan Matahari. Fabricius mengamati *sunspot* menggunakan berbagai jenis teleskop dan kemudian *camera obscura* untuk memastikan bahwa bintik tersebut merupakan sebuah objek yang nyata, bukan kesalahan penglihatan. Pengamatan pertama Fabricius dilakukan pada Februari 1611, dan hasil observasinya dipublikasi dalam sebuah buku pada Juni 1611. Christoph Scheiner (1576–1650) menyadari penampakan bintik hitam pada saat melakukan observasi Matahari pada Maret 1611. Scheiner kemudian mempersiapkan teleskop dengan filter berwarna untuk mempelajari fenomena tersebut. Baru pada akhir 1611 Scheiner mempublikasikan hasil observasinya terkait *sunspot* melalui tulisan

anonim. Sementara itu, pada awal 1612 Galileo Galilei (1564–1642) mengklaim telah mengobservasi *sunspot* sejak 18 bulan sebelumnya. Namun, tidak ditemukan dokumen yang mendukung klaim tersebut selain dari catatan korespondensi Galileo dengan seorang rekan ilmuwan pada September 1611. Baru pada pertengahan 1612 Galileo mempublikasi hasil observasinya terkait *sunspot* secara komprehensif.

Sejak saat itu, observasi terkait *sunspot* mulai berkembang luas, meski belum dilakukan secara sistematis. Para ilmuwan maupun astronom amatir di berbagai belahan dunia melakukan observasi terhadap kemunculan *sunspot*. Salah satunya adalah Johann Caspar Staudach, seorang astronom amatir yang menggambar kemunculan *sunspot* dalam rentang waktu antara 1749–1796 dengan total lebih dari 1.000 hari pengamatan. Gambar-gambar Staudach ini kelak menjadi peninggalan penting yang menghubungkan hasil pengamatan *sunspot* era Galileo dengan data pengamatan *sunspot* era modern. Sebelumnya, pada pertengahan abad ke-17 hingga awal abad ke-18 tidak banyak catatan mengenai *sunspot* yang terlihat, meskipun terdapat banyak catatan terkait pengamatan *sunspot* yang dilakukan. Periode ini kelak disebut dengan Maunder minimum, berdasarkan pada penelitian Edward Walter Maunder pada tahun 1894.

Pada abad ke-19, Samuel Heinrich Schwabe (1789–1875) melakukan pengamatan *sunspot* selama 42 tahun dan menghasilkan 8.486 gambar serta 3.699 laporan tertulis (Arlt and Vaquero, 2020). Schwabe memulai pengamatan pada 1825 dan 17 tahun setelahnya menemukan bahwa siklus kemunculan *sunspot* memiliki periode sekitar 11 tahun. Siklus ini disebut dengan siklus Matahari (*solar cycle*).

Pada era yang sama dengan Schwabe, Rudolf Johann Wolf (1816–1893), astronom asal Swiss yang tertarik dengan publikasi Schwabe terkait siklus Matahari melakukan penelitian lebih lanjut tentang siklus tersebut. Wolf melakukan pengamatan *sunspot* di Observatorium Zurich untuk memastikan adanya siklus *sunspot* dalam jangka waktu lama dan menyempurnakan penentuan periodenya. Wolf menciptakan indeks yang digunakan untuk karakterisasi tingkat aktivitas *sunspot* yang disebut sebagai *Wolf Number*. Pada waktu yang

sama, Wolf mengumpulkan data historis pengamatan *sunspot* yang pernah dilakukan oleh ilmuwan-ilmuwan sebelumnya. Hasil observasi Staudach dan Schwabe menjadi dasar pencatatan *sunspot* yang dilakukan oleh Wolf. Ia juga melakukan perjalanan mengelilingi Eropa untuk melengkapi data historis observasi *sunspot* dari tahun 1700. Kompilasi data historis ini disebut dengan Wolf Sunspot Number. Observasi Wolf kemudian dilanjutkan oleh para penerusnya di Observatorium Zurich, yaitu Alfred Wolfer, William Otto Brunner, dan Max Waldmeier.

Setelah era Wolf, kegiatan pengamatan *sunspot* di seluruh dunia menjadi lebih institusional. Pada akhir abad ke-19, sejumlah 12 stasiun pengamatan bekerja sama dengan observatorium Zurich untuk menerbitkan buletin yang memuat hasil observasi di seluruh stasiun pengamatan. Jumlah ini kemudian bertambah hingga 40 stasiun pada pertengahan abad ke-20 (Clette, 2018). Sementara itu, pengamatan *sunspot* juga mengikuti kemajuan teknologi dengan melibatkan penggunaan teknologi canggih. Pada pertengahan abad ke-20 perkembangan teknologi ruang angkasa telah memungkinkan untuk melakukan pengamatan Matahari menggunakan satelit dalam berbagai panjang gelombang dan melakukan pemantauan yang kontinu pada aktivitas Matahari. Pada abad ke-21, pengamatan *sunspot* terus berkembang dengan adopsi teknologi baru seperti interferometri dan teleskop Matahari berkinerja tinggi. Selain itu, pemodelan dan analisis data komputer telah menjadi semakin penting dalam memahami perilaku kompleks dari *sunspot* dan aktivitas Matahari secara keseluruhan.

C. Karakteristik Sunspot

Sunspot merupakan area yang memiliki temperatur lebih dingin dibandingkan dengan permukaan Matahari di sekitarnya. Hal ini terjadi karena medan magnet yang kuat mencegah konveksi panas dari dalam Matahari. Temperatur rata-rata permukaan Matahari adalah sekitar 5.800K, sedangkan temperatur pada area *sunspot* berkisar antara 4.000 hingga 5.000K. Perbedaan inilah yang mengakibatkan

sunspot terlihat sebagai bintik-bintik hitam kecil di permukaan Matahari. Sunspot ditandai dengan inti gelap yang disebut dengan umbra dan dikelilingi sebagian atau seluruhnya oleh daerah yang lebih terang yang disebut dengan penumbra. Umbra adalah lokasi utama dari medan magnet vertikal dan penumbra terjadi pada daerah yang terdapat medan magnet horizontal yang kuat (McIntosh, 1981). Baik umbra maupun penumbra memiliki bentuk yang tidak beraturan serta intensitas kecerahan yang tidak seragam. Karakter khas dari formasi umbra-penumbra inilah yang digunakan untuk membedakan antara *sunspot* dengan fitur Matahari lainnya.

Muncul dan menghilangnya *sunspot* disebabkan oleh perubahan pada medan magnet Matahari. Pada awal terbentuknya, *sunspot* terlihat seperti bintik kecil yang disebut pori. Tidak semua pori-pori berkembang menjadi *sunspot* yang lengkap. Pori-pori tersebut mengalami evolusi dalam jangka waktu beberapa jam hingga berhari-hari. Saat proses evolusi tersebut, ukuran pori membesar dan membentuk bagian umbra serta penumbra. Selain itu, sejumlah pori-pori lain dapat muncul di sekelilingnya dan berevolusi menjadi *sunspot* lainnya. Sebuah *sunspot* dapat berumur beberapa hari hingga beberapa bulan dengan ukuran yang berubah-ubah selama masa kemunculannya.

Kemunculan *sunspot* pada Matahari memiliki siklus yang disebut siklus Matahari. Setiap sekitar 11 tahun medan magnet Matahari mengalami perubahan total, ketika kutub utara dan kutub selatan Matahari mengalami pertukaran tempat dan untuk kembali pada posisi kutub-kutub semula dibutuhkan waktu 11 tahun kemudian. Ketika medan magnet berubah, jumlah aktivitas di permukaan Matahari juga berubah. Sunspot akan muncul pada awal siklus di lintang tinggi (lebih dari 40°). Setelah itu, secara perlahan *sunspot* akan bergeser ke arah lintang lebih rendah dan terdistribusi pada lintang rendah ($0-25^\circ$). Awal siklus Matahari dapat diketahui dengan cara menghitung jumlah *sunspot*. Saat *sunspot* yang muncul sedikit berarti aktivitas Matahari berada pada kondisi minimal. Periode ini disebut dengan *solar minimum*, yang biasanya terjadi di awal siklus. Seiring berjalannya waktu jumlah *sunspot* yang muncul akan meningkat. Di pertengahan siklus, Matahari berada di siklus maksimum yang

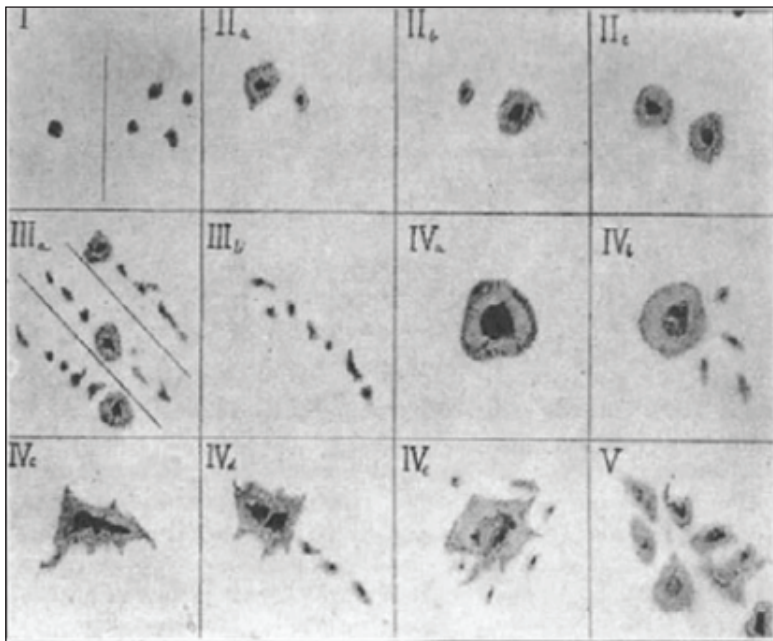
ditandai dengan mulai munculnya banyak *sunspot*. Periode ini disebut dengan *solar maximum*. Ketika siklus berakhir, aktivitas Matahari kembali ke titik minimum dan kemudian siklus baru dimulai. Selama puncak siklus, jumlah *sunspot* yang terlihat bisa lebih dari 100 dalam satu waktu. Meski rata-rata periode sebuah siklus diperkirakan sekitar 11 tahun, tetapi pergantian dari satu siklus ke siklus selanjutnya tidak dapat diketahui secara langsung. Rata-rata jumlah kemunculan *sunspot* pada *solar maximum* suatu siklus dapat berbeda dengan rata-rata pada *solar maximum* siklus-siklus sebelumnya. Begitu juga pada saat *solar minimum*. Suatu *solar minimum* baru dapat diketahui beberapa waktu setelahnya ketika jumlah kemunculan *sunspot* telah kembali meningkat, sehingga waktu pergantian satu siklus ke siklus selanjutnya baru dapat dipastikan beberapa waktu setelahnya, antara beberapa bulan hingga satu tahun.

Sunspot memiliki berbagai macam bentuk dan ukuran. Sunspot dapat terlihat secara soliter maupun berada dalam kumpulan yang berdekatan yang disebut dengan grup *sunspot*. Sebuah *sunspot* tunggal biasanya teramati sebagai sebuah umbra dan dikelilingi oleh penumbra. Namun, pada grup *sunspot* berukuran besar dengan struktur yang kompleks, *sunspot* dapat memiliki beberapa umbra di dalam penumbra. Dalam proses evolusinya, umbra dapat menghilang dan hanya menyisakan penumbra. Meskipun demikian, daerah penumbra tanpa umbra ini biasanya tidak bertahan lebih lama dari satu hari (McIntosh, 1981).

Beberapa grup *sunspot* memiliki struktur magnet yang lebih kompleks dibandingkan grup *sunspot* lainnya. Hal ini juga memungkinkan *sunspot* pada grup tersebut menghasilkan semburan matahari (*flare*). Untuk mengetahui apabila grup *sunspot* memiliki potensi menjadi *flare*, maka ada aturan untuk mengklasifikasikan grup *sunspot*. Pengklasifikasian ini juga bertujuan untuk melihat tingkat kompleksitas grup *sunspot* dan juga aktivitasnya. Ketika grup *sunspot* yang terbentuk cukup besar dengan jumlah umbra banyak dan penumbra yang luas, sering kali grup tersebut dapat memicu suar matahari yang signifikan. Setiap grup *sunspot* memiliki bentuk (susunan *sunspot*) yang berbeda-beda, dan perbedaannya cenderung

beragam pada grup *sunspot* yang lebih besar. Di sisi lain, ada rentang ukuran dan struktur yang terbatas di antara grup *sunspot*, sehingga ukuran dan struktur ini digunakan sebagai fitur untuk melakukan klasifikasi.

Pengamatan *sunspot* dilakukan menggunakan instrumen, metode, dan pada lokasi yang berbeda-beda, sehingga skema klasifikasi yang digunakan juga berbeda. Cortie (1901) membuat klasifikasi grup *sunspot* berdasarkan bentuk dan evolusinya. Klasifikasi Cortie dibentuk berdasarkan studi yang dilakukan pada sekitar 3.500 gambar *sunspot* yang dihasilkan selama dua puluh tahun terakhir di Observatorium Perguruan Tinggi Stonyhurst. Di antara gambar yang diteliti oleh Cortie, terdapat 296 grup yang dipilih untuk didiskusikan, termasuk 117 grup yang menghasilkan gangguan yang besar. Tujuan dari klasifikasi ini adalah menggambarkan fase-fase berbeda yang telah dilalui



Sumber: Carrasco et al. (2015)

Gambar 2.2 Kelompok Sunspot pada Klasifikasi Cortie

sekelompok *sunspot* selama masa evolusinya. Berikut merupakan definisi tipe grup *sunspot* Cortie (Gambar 2.2).

1. Tipe I: satu atau sekelompok bintik kecil.
2. Tipe IIa: kelompok yang mengandung dua bintik yang bintik terdepannya merupakan bintik utama.
3. Tipe IIb: kelompok yang memiliki dua bintik, di mana bintik belakangnya adalah bintik utama.
4. Tipe IIc: kelompok yang mengandung dua bintik dengan kedua bintik merupakan bintik utama.
5. Tipe IIIa: kumpulan bintik-bintik dengan bintik-bintik utama yang jelas.
6. Tipe IIIb: kumpulan bintik-bintik penumbra, di mana umbra tidak beraturan dan bintik utama tidak jelas.
7. Tipe IVa: bintik tunggal dengan bentuk yang beraturan.
8. Tipe IVb: bintik tunggal dengan bentuk yang beraturan dan terdapat bintik kecil sebagai pendamping.
9. Tipe IVc: bintik tunggal dengan bentuk tidak beraturan.
10. Tipe IVd: bintik tunggal dengan bentuk tidak beraturan dan terdapat sekumpulan bintik kecil lainnya.
11. Tipe IVe: bintik tunggal dengan bentuk tidak beraturan dan terdapat pendamping kecil tetapi tidak berada dalam bintik tunggal.
12. Tipe V: kelompok tidak beraturan dengan bintik-bintik besar.

Pada tahun 1947, Waldmeier mengembangkan metode klasifikasi grup *sunspot* yang disebut dengan klasifikasi Zurich dengan cara memodifikasi skema klasifikasi Cortie. Klasifikasi Zurich dikorelasikan dengan adanya suar matahari, tetapi untuk kelas Zurich besar belum tentu menghasilkan kelas suar matahari yang besar (Krivsky, 1972). Klasifikasi Zurich menggunakan dua kriteria, yaitu 1) bentuk dan ukuran grup; 2) morfologi dan evolusinya. Klasifikasi ini memiliki sembilan kelas untuk setiap variasi grup *sunspot* (Gambar 3). Berikut definisi dari sembilan kelas yang dikembangkan oleh Waldmeier.

A				
B				
C				
D				
E				
F				
G				
H				
J				

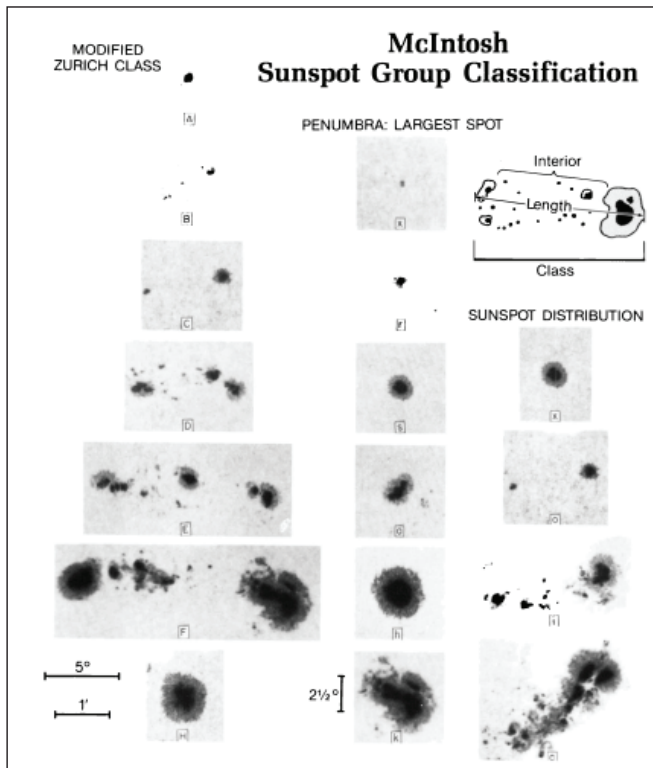
Sumber: (Carrasco et al., 2015)

Gambar 2.3 Kelompok Sunspot pada Klasifikasi Zurich

- 1) Kelas A: terdapat satu atau lebih bintang tanpa penumbra dan tanpa konfigurasi bipolar.
2. Kelas B: kelompok bintang penumbra tanpa konfigurasi bipolar.
3. Kelas C: kelompok bipolar yang memiliki satu bintang dengan penumbra.
4. Kelas D: kelompok bipolar, di mana bintang utamanya memiliki penumbra yang panjang kelompoknya $<10^\circ$.
5. Kelas E: kelompok bipolar yang bintang utamanya mempunyai penumbra dengan panjang antara 10° dan 15° .
6. Kelas F: kelompok bipolar yang sangat besar dengan panjang $>15^\circ$.

7. Kelas G: kelompok bipolar yang memiliki penumbra dan tidak ada bintik kecil di antara kelompok utama, dengan panjang $>10^\circ$.
8. Kelas H: bintik unipolar dengan penumbra dan berdiameter $>2,5^\circ$.
9. Kelas J: bintik unipolar dengan penumbra dan berdiameter $<2,5^\circ$.

Pada tahun 1990, Patrick S. McIntosh (1940-2016) membuat klasifikasi McIntosh yang merupakan modifikasi dari klasifikasi Zurich. Klasifikasi McIntosh memiliki tiga komponen, yaitu kelas Zurich yang dimodifikasi, kelas penumbra, dan distribusi *sunspot* (Gambar 2.4).



Sumber: (McIntosh, 1990)

Gambar 2.4 Tiga Komponen Klasifikasi McIntosh

Modifikasi kelas Zurich ditentukan berdasarkan apakah ada penumbra, distribusi penumbra, dan panjang kelompok. Modifikasi Zurich dibagi menjadi dua kelompok, yaitu kelompok bipolar dan unipolar. Kelompok unipolar terjadi apabila satu titik atau sekelompok titik dengan jarak antar titik terbesar 3° , sedangkan kelompok bipolar terjadi apabila panjang keseluruhan grup titik $>3^\circ$. Modifikasi kelas Zurich memiliki tingkat kelas *sunspot* dari A hingga H, kelompok unipolar meliputi kelas A dan H, sedangkan kelompok bipolar adalah kelas B, C, D, E, dan F.

Penentuan kelas penumbra dilakukan menggunakan simetri dan ukuran penumbra terbesar suatu *sunspot* dalam satu grup. Apabila menggunakan kriteria diameter penumbra maka dapat diukur sumbu utara-selatan (N-S) titik tersebut. Notasi yang dipakai pada penentuan kelas penumbra ini adalah x: tidak ada penumbra; r: penumbra belum sempurna merupakan penumbra yang tidak beraturan dan biasanya lebih terang dari penumbra normal; s: penumbra simetris merupakan penumbra dewasa, berwarna gelap melingkar dengan struktur halus berserabut memiliki diameter $<2,5^\circ$; a: penumbra tidak simetris merupakan penumbra dewasa, berwarna gelap, tidak beraturan dan berstruktur halus memiliki diameter $<2,5^\circ$; h: penumbra simetris dengan diameter $>2,5^\circ$; k: penumbra tidak simetris dengan diameter $>2,5^\circ$ diukur pada arah N-S.

Distribusi *sunspot* menunjukkan kepadatan populasi bintik internal suatu grup *sunspot*. Notasi yang digunakan adalah x: *individual spot*; o: *open distribution* (distribusi terbuka) yaitu tidak ada bintik atau hanya sedikit sekali di zona tengah kelompok; i: *intermediate distribution* (distribusi menengah) yaitu banyak bintik terletak diantara zona kelompok, tetapi tidak memiliki penumbra yang matang; c: *compact distribution* (distribusi rapat) yaitu distribusi yang memiliki bintik besar dan terdapat penumbra yang matang.

D. Indeks Sunspot Global

1. International Sunspot Number

Keberhasilan Wolf dalam melakukan kompilasi data historis *sunspot* dapat dikatakan sebagai awal dari pengamatan *sunspot* era modern. Wolf berhasil mendapatkan nilai *Sunspot Number* (SN) sejak tahun 1749, menghitung *epoch* untuk *solar maximum* dan *solar minimum* dari tahun 1610, serta menyempurnakan siklus *sunspot* milik Schwabe menjadi 11,1 tahun dari sebelumnya 10 tahun. Parameter yang digunakan adalah *Wolf Number*, yaitu sebagai berikut.

$$W = 10 N_g + N_s \quad (1)$$

Pada rumus tersebut, W adalah Wolf Number, N_g adalah jumlah grup *sunspot*, dan N_s adalah jumlah *sunspot* yang teramati. Wolf kemudian melanjutkan deret data historis tersebut menggunakan data dari pengamatan yang dilakukannya sendiri. Wolf menyadari pentingnya mencocokkan hasil pengamatannya sendiri dengan pengamatan yang dilakukan oleh pengamat-pengamat lain demi konsistensi data, mengingat lokasi, instrumen, dan kondisi penglihatan setiap pengamat dapat berbeda. Oleh karena itu, ia lantas mengenalkan faktor reduksi k yang nilainya spesifik untuk tiap-tiap pengamat. Dengan demikian, nilai indeks *sunspot* yang dihasilkan oleh seorang pengamat adalah sebagai berikut.

$$R = k (10g + f) \quad (2)$$

Pada rumus tersebut, R adalah nilai SN, k adalah koefisien pengamat, g adalah jumlah grup *sunspot*, dan f adalah jumlah umbra dan penumbra. Dengan dikenalkannya koefisien k , Wolf dapat mengisi kekosongan data pengamatan dari Observatorium Zurich menggunakan data pengamatan dari stasiun-stasiun pengamatan lain. Nilai koefisien k untuk tiap-tiap stasiun diperoleh dari rasio antara pengamatan *sunspot* dari stasiun tersebut dengan pengamatan dari Observatorium Zurich sebagai stasiun referensi. Nilai SN yang kosong pada Observatorium Zurich kemudian diisi dengan rata-rata nilai R dari semua stasiun tambahan (Clette, 2018).

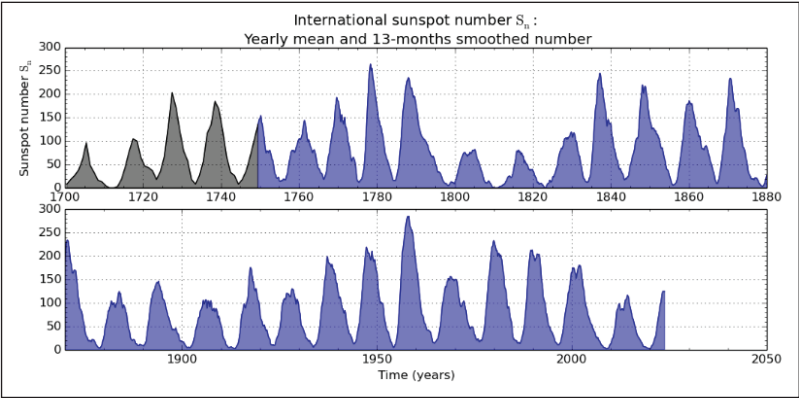
Pengamatan *sunspot* mengalami peningkatan kualitas dengan digunakannya peralatan yang lebih baik oleh penerus Wolf, yaitu Alfred Wolfer. Berbeda dengan sistematika pengamatan Wolf yang mengeliminasi *sunspot* kecil berumur pendek dari perhitungan SN, Wolfer menghitung seluruh *sunspot* yang terlihat oleh pengamat. Hal ini dilakukan untuk mengurangi faktor subjektivitas pengamat. Kemudian untuk menjaga konsistensi dengan deret *sunspot* historis asli milik Wolf, Wolfer membandingkan data pengamatannya dengan data pengamatan Wolf selama 17 tahun (1878-1893) dan mendapatkan nilai k yang konstan sebesar 0,6. Nilai ini kemudian disebut dengan koefisien reduksi Zurich, dinotasikan sebagai k_z , dan digunakan sebagai referensi pada perhitungan *sunspot* setelah tahun 1893. Indeks *sunspot* yang dihasilkan disebut dengan Zurich Sunspot Number (ZSN) dan dinotasikan sebagai R_z .

Metode Wolfer ini selanjutnya digunakan dalam pengamatan *sunspot* setidaknya hingga tahun 1925. Kemudian pada tahun 1961 diketahui bahwa Max Waldmeier memberi bobot pada *sunspot* sesuai dengan ukuran dan struktur umbra pada perhitungan R_z yang diyakini telah diimplementasi sejak era William Otto Brunner, penerus langsung Wolfer. Perubahan metode ini memengaruhi nilai R_z setelah tahun 1945, terlihat dari lonjakan nilai rata-rata R_z sekitar 1,21 kali lebih tinggi dari yang diharapkan (Clette et al., 2014). Sementara itu, pada 1957 stasiun tambahan Zurich dibangun, berlokasi di Locarno. Metode pembobotan Waldmeier juga diaplikasikan pada pengamatan di stasiun ini dan bertahan hingga saat ini. Di tahun yang sama Observatorium Zurich secara resmi dinobatkan sebagai World Data Center (WDC) untuk produksi dan distribusi nilai *sunspot* secara internasional oleh International Union of Radio Sciences (URSI).

Penggunaan ZSN sebagai indeks *sunspot* internasional berlangsung hingga tahun 1980, saat Observatorium Zurich ditutup. Selanjutnya, aktivitas WDC dipindahkan ke Observatorium Kerajaan Belgia dengan nama Sunspot Index Data Center (SIDC) dibawah pengawasan URSI, International Astronomical Union (IAU), dan International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Indeks

sunspot SIDC ini dikenal dengan nama International Sunspot Number (ISN) yang nilainya dinotasikan sebagai R_I . ISN menggunakan nilai dari ZSN untuk data sebelum tahun 1980 dan menggunakan metode perhitungan baru untuk pengamatan setelahnya, efektif dimulai sejak 1982. Nilai R_I tidak bergantung pada pengamatan dari satu stasiun utama melainkan diturunkan dari data pengamatan semua stasiun yang berkontribusi setelah melalui proses pengecekan kelayakan. Untuk menjaga keberlanjutan dengan ZSN, Locarno ditunjuk sebagai stasiun referensi dalam perhitungan nilai k tiap-tiap stasiun dan nilainya diperbarui setiap satu bulan. Seluruh proses perhitungan dilakukan menggunakan pemrosesan komputer (Clette et al., 2007).

Pada tahun 2011, SIDC berganti nama menjadi Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO). Misi SILSO adalah mengembangkan dan menyebarkan pengetahuan tentang variasi aktivitas Matahari dalam jangka panjang, sebagai referensi dalam mempelajari mekanisme siklus Matahari dan pengaruh terhadap iklim Bumi. Revisi besar pada ISN dilakukan oleh SILSO pada tahun 2015, dengan dipilihnya k_z sebagai koefisien referensi baru. Hal ini berarti menghilangkan nilai k_z sebesar 0,6 dari perhitungan , yang menghasilkan kenaikan nilai untuk seluruh SN pada ISN (Clette et al., 2016). Deret ini diberi nama ISN versi 2.0.



Sumber: (SILSO, 2024a)

Gambar 2.5 Grafik *Sunspot Number* Tahun 1700 hingga 2024

Dari data yang dipublikasi oleh SILSO (2024b), tercatat lebih dari 700 stasiun pengamat telah berkontribusi pada ISN. Jumlah ini termasuk peninggalan catatan pengamatan era Galileo, dengan pengamatan dari Thomas Harriot dicatat sebagai kontribusi pertama. Pengamatan dilakukan dengan rata-rata 180 hari pengamatan per tahun, dan sebagian besar kontributor berlokasi di Eropa Barat, kemudian diikuti oleh Eropa Timur, Asia, Amerika Selatan, Amerika Utara, dan Afrika. Kontribusi terbanyak berasal dari Observatorium Kerajaan Belgia yang sudah berjalan selama 102 tahun dengan jumlah 37.465 pengamatan pada 2010 dan masih terus berlangsung hingga saat ini. Dari Indonesia tercatat dua buah stasiun pengamat pernah menjadi kontributor ISN, yakni Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) LAPAN Pasuruan dan Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) LAPAN Sumedang. Pada tahun 2021 LAPAN mengalami perubahan organisasi, bergabung dengan instansi riset lainnya menjadi BRIN. Sejak saat itu, BPAA LAPAN Pasuruan dan BPAA LAPAN Sumedang menjadi BRIN Pasuruan dan BRIN Sumedang. Dalam catatan SILSO, BRIN Sumedang dan BRIN Pasuruan memiliki nama stasiun yaitu TANJUNGSARI dan WATUKOSEK OBSERVATORY. BRIN Sumedang berkontribusi pada rentang waktu 1984–1989 dengan total 1.358 pengamatan. Sementara itu, BRIN Pasuruan berkontribusi pada rentang waktu 1987–2004 dan kemudian pada 2021–2023.

2. Sunspot Group Number

Di akhir abad ke-20, Hoyt dan Schatten (1998) melakukan rekonstruksi data historis *sunspot* untuk 350.000 observasi dari rentang waktu 1610-1993 hanya berdasarkan jumlah grup *sunspot*. Kompilasi data historis versi Hoyt ini dikenal dengan nama *Sunspot Group Number* (GN), nilainya dinotasikan sebagai R_G . Konstruksi GN menggunakan metode yang sama sekali baru. Skala referensi dihitung dari hasil pengamatan modern, sedangkan pengamatan-pengamatan sebelumnya menggunakan nilai referensi ini untuk menghitung faktor reduksi k masing-masing pengamat. Dengan metode ini nilai k dirangkai secara berurutan, terpropagasi mundur ke pengamatan-pengamatan

sebelumnya. Indeks ini menghitung jumlah rata-rata grup *sunspot* dari beberapa pengamat dan mengoreksi angka-angka tersebut ke ISN menggunakan rumus berikut.

$$R_G = \frac{12,08}{N} \sum_{i=1}^N k_i G_i \quad (3)$$

R_G adalah nilai jumlah grup relatif, N adalah jumlah pengamat, k_i adalah faktor koreksi pengamat ke- i , G_i adalah jumlah kelompok *sunspot* yang teramati oleh pengamat i , dan nilai konstan 12,08 untuk normalisasi angka tersebut ke ISN. Nilai konstan tersebut merupakan asumsi jumlah rata-rata *sunspot* dalam sebuah grup.

Pada awalnya koefisien referensi GN diturunkan dari koleksi foto dari katalog milik Observatorium Kerajaan Greenwich pada rentang waktu 1874–1976 dan perhitungan grup dari U.S. Air Force/Solar Observing Optical Network (USAF/SOON) untuk interval 1975–1995. Namun belakangan diketahui bahwa terdapat perbedaan tren jumlah grup *sunspot* antara katalog Observatorium Kerajaan Greenwich dengan hasil pengamatan visual. Katalog tersebut menunjukkan kenaikan jumlah grup *sunspot* sekitar 40% setelah tahun 1880. Hal ini dimungkinkan terjadi karena pengaruh kualitas piringan fotografis yang membaik seiring waktu ataupun karena kemajuan pada metode-metode pengamatan manual (Clette, 2018). Untuk memperbaiki kelemahan ini, Svalgaard & Schatten (2016) mengalihkan perhitungan skala referensi pada lima deret pengamatan utama yaitu pengamatan milik Staudach, Schwabe, Wolfer, Hisako Koyama (1916–1997) dalam rentang 1945–1996, dan Observatorium Locarno. Revisi dari Svalgaard & Schatten kemudian disebut dengan deret Group Number versi 2.0.

Jika dibandingkan dengan ISN, indeks GN memiliki beberapa keunggulan antara lain basis data historis yang lebih banyak, nilainya tidak terlalu bergantung pada visibilitas *sunspot-sunspot* kecil terutama pada pengamatan-pengamatan masa lampau, dan diproses sekaligus oleh ilmuwan yang sama sehingga menghindari kemungkinan *bias* akibat perubahan metode seiring berjalannya waktu.

3. American Sunspot Number

Pada masa Perang Dunia ke II, kebutuhan data indeks *sunspot* untuk komunikasi militer Amerika Serikat meningkat. Periode rilis ZSN dirasa tidak cukup cepat untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Oleh karena itu, Interservice Radio Propagation Laboratory (IRPL) meminta Institut Carneige Washington untuk membuat indeks *sunspot* seperti ZSN. Indeks ini dikenal dengan sebutan American Sunspot Number (ASN), nilainya dinotasikan sebagai R_A .

Pada awalnya dua orang pengamat ditugaskan untuk menentukan aktivitas *sunspot* bulanan, kemudian pada Desember 1944 American Association of Variable Star Observers (AAVSO) mengambil alih tugas tersebut dengan jumlah pengamat sebanyak 20 hingga 40 orang. Namun, tidak tersedianya data baru dari Zurich ini, mereka kesulitan untuk menjaga kesinambungan American Sunspot Number dengan ZSN. Hingga pada tahun 1949 terlihat jelas bahwa American Sunspot Number telah menyimpang dari Zurich Sunspot Number (Shapley, 1949; Berghmans et al, 2006). Selama bertahun-tahun setelahnya, berbagai usaha dilakukan untuk memperbaiki kesesuaian R_A dengan R_Z seperti menggunakan pengolahan statistik dan menambahkan pembobotan, tetapi masih terjadi variasi yang cukup banyak. Penyebabnya baru teridentifikasi pada akhir tahun 1990an (Schaefer, 1997; Hossfield, 2002), ketika ditemukan kelemahan metodologis dalam pemrosesan stasiun AAVSO. Metode ini kemudian diperbaiki dan pemrosesannya semakin ditingkatkan setelah tahun 2008 (Clette, et al., 2018).

ASN tersedia dari tahun 1944 hingga saat ini, dan mulai tahun 1951 hasil observasi yang telah dilakukan oleh AAVSO dikurangi menurut prosedur baru, indeks yang dibangun hanya dengan menggunakan hasil observasi yang berkualitas tinggi saja. Koefisien reduksi pengamat dikalkulasi ulang untuk data 1948-1950, dan deret baru ini dinotasikan sebagai R_A' (NOAA, 2024).

4. Boulder Sunspot Number

Boulder Sunspot Number diturunkan dari Solar Region Summary (SRS) harian yang dihasilkan oleh USAF/NOAA berupa data citra yang diperoleh melalui situs SOON sejak tahun 1977. Boulder Sunspot Number kemudian diperoleh dengan menggunakan persamaan (2) dengan nilai koefisien reduksi $k = 1$. Boulder Sunspot Number ini sekitar 55% lebih besar dari ISN, sesuai dengan faktor koreksi $k = 0,65$ (Hathaway, 2015). Keunggulan Boulder Sunspot Index dibandingkan dengan ISN adalah indeks ini dirilis setiap hari, sementara ISN dirilis setiap bulan.

E. Metode Pengamatan Sunspot

Data hasil pengamatan *sunspot* dapat digunakan untuk berbagai macam kebutuhan. *Flare* dapat muncul dari *sunspot* yang berukuran besar dan mengakibatkan kerugian secara materiel pada Bumi. Catatan jumlah dan lokasi *sunspot* berperan penting dalam mengetahui siklus Matahari. Data *sunspot* juga dapat digunakan untuk mempelajari hubungan antara aktivitas Matahari dan Bumi dengan memperkirakan kekuatan medan magnet dan radiasi Matahari. Identifikasi *sunspot* dapat membantu dalam melakukan prediksi cuaca antariksa, mempelajari rotasi diferensial, radiasi Matahari, dan fenomena lainnya (Djafer et al., 2012). Data yang dihasilkan dari identifikasi *sunspot* dapat digunakan sebagai sumber penting untuk memahami variasi aktivitas Matahari dalam waktu jangka panjang (Vaquero, 2007).

Di zaman modern seperti saat ini, Matahari tidak hanya diamati dari observatorium landas-bumi tapi juga dengan menggunakan satelit. Pengamatan menggunakan satelit dapat dilakukan tanpa terganggu oleh cuaca. Sementara itu, pengamatan landas-bumi sering kali terkendala kondisi pandang yang berkurang akibat cuaca yang buruk atau gangguan pada atmosfer Bumi, yang karenanya membutuhkan banyak lokasi pengamatan. Selain itu, pengamatan satelit dapat

berlangsung selama 24 jam sehingga dapat mengamati Matahari secara jauh lebih intensif dibandingkan dengan pengamatan landas-bumi.

Dari sisi teknik pengamatan, secara umum pengamatan *sunspot* dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu pengamatan secara manual dan pengamatan secara digital. Pada pengamatan secara manual observasi dilakukan oleh pengamat, kemudian hasil pengamatan dicatat secara manual dalam bentuk sketsa dan/atau catatan. Sementara itu, pada pengamatan secara digital hasil pengamatan direkam dalam bentuk citra atau video digital, yang biasanya dilakukan secara otomatis oleh mesin. Perekaman secara digital memungkinkan untuk mendapatkan data pengamatan dengan jumlah yang besar dalam waktu singkat. Selain itu, resolusi spasial yang didapatkan dari pengamatan secara digital jauh lebih baik dibandingkan dengan pengamatan secara manual, serta pemrosesan datanya dapat dilakukan dengan lebih cepat menggunakan metode-metode otomatisasi komputer. Deteksi *sunspot* secara digital juga memungkinkan perhitungan *sunspot* secara objektif dan memungkinkan pengamatan dengan sedikit tenaga kerja.

Meskipun begitu, hingga saat ini komunitas internasional sepakat bahwa pengamatan *sunspot* secara manual tetap penting untuk dilakukan. Data historis pengamatan *sunspot* yang digunakan sebagai standar internasional adalah data yang dihasilkan dari observasi secara manual. Meskipun pengamatan digital mampu menghasilkan gambar lebih baik dan mengurangi subjektivitas, tetapi terdapat beberapa permasalahan yang muncul terkait penggunaan data digital. Data digital biasanya diambil menggunakan perangkat dengan spesifikasi teknis yang berbeda-beda. Sebagai contoh, penggunaan kamera CCD pada pengamatan landas-bumi dapat memiliki resolusi, ukuran gambar, bidang pandang, bahkan tipe sensor yang berbeda-beda untuk tiap-tiap lokasi pengamatan. Hal itu kemudian mengakibatkan munculnya ketidakseragaman data antarpengamat meskipun dilakukan pada saat yang sama. Hingga saat ini belum ada standarisasi untuk pengamatan digital.

Permasalahan lain dapat muncul akibat perubahan teknologi yang sangat cepat. Perangkat digital yang digunakan cenderung

mengikuti kemajuan teknologi dari waktu ke waktu. Ketika perangkat sudah tidak layak pakai, maka akan digantikan dengan perangkat yang lebih modern karena perangkat dengan jenis yang sama sudah tidak lagi beredar di pasaran. Hal ini justru dapat mengurangi konsistensi data secara jangka panjang. Berbeda dengan pengamatan manual yang mengandalkan kemampuan penglihatan manusia yang secara umum akan terus konsisten dari generasi ke generasi. Dengan kondisi seperti itu, akan sangat sulit bagi pengamatan digital untuk menjaga konsistensi data dalam rentang waktu yang sangat panjang. Sebagai tambahan, ketersediaan data historis untuk teknologi digital sangat terbatas sehingga tidak dimungkinkan untuk merangkai deret data historis hingga ratusan tahun ke belakang.

Beberapa permasalahan terkait data pengamatan digital tersebut membuat pengamatan manual masih dibutuhkan, karena menjadi satu-satunya metode yang dapat memberikan keberlangsungan dan konsistensi data sejak lebih dari 400 tahun yang lalu. Dalam konteks pengamatan jangka panjang yang terpenting adalah konsistensi data, bukan terkait resolusi gambar pengamatan. Pengamatan *sunspot* menggunakan metode sketsa menghasilkan data jangka panjang yang telah terbukti dapat diandalkan. Di sisi lain, keunggulan-keunggulan yang dimiliki metode digital dapat memberi pengaruh signifikan untuk riset yang lebih mendetail dalam bingkai waktu yang pendek dan terfokus.

F. Teknis Pengamatan Sunspot

1. Pengamatan Sunspot Manual

Sunspot merupakan fitur aktivitas Matahari yang paling mudah untuk diamati. Sebagian *sunspot* berukuran cukup besar untuk dapat dilihat dengan mata telanjang, bahkan dalam kondisi tertentu, tanpa alat bantu apapun. Misalnya pada saat Matahari baru saja terbit atau dalam proses tenggelam, atau saat sedang tertutup awan tipis. Meskipun begitu metode ini sangat tidak dianjurkan karena akan menyebabkan kerusakan permanen pada retina mata hingga kebutaan. Dalam

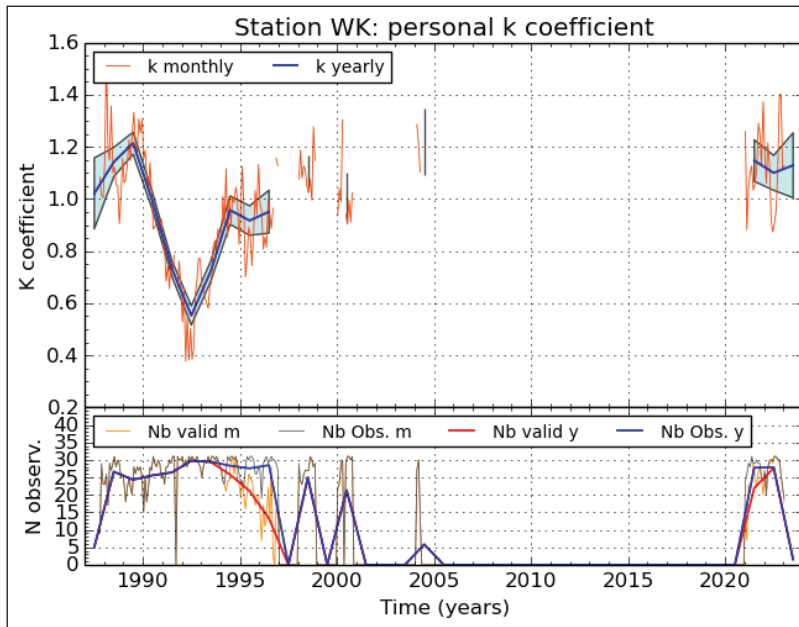
kondisi pengamatan yang baik, pengamat dapat mendeteksi *sunspot* dengan umbra sekecil 0,3 menit busur dengan mata telanjang, hanya dengan bantuan filter Matahari (Mossman, 1989). Metode yang paling umum digunakan adalah dengan cara mengamati langsung menggunakan teleskop. Selain pengamatan langsung, metode proyeksi juga sering digunakan untuk mengamati kemunculan *sunspot*, misalnya menggunakan *camera obscura* atau helioskop.

Untuk dapat mengamati *sunspot* secara aman, baik secara langsung maupun melalui instrumen optik, diperlukan filter khusus yang dapat mereduksi sebagian besar intensitas cahaya Matahari. Filter yang secara khusus digunakan untuk mengamati *sunspot* dalam spektrum cahaya tampak disebut filter *white-light*. Filter jenis ini dapat mereduksi intensitas cahaya yang datang dari Matahari hingga 99,9%.

Berdasarkan catatan sejarah, ada beberapa metode yang pernah digunakan untuk mencatat hasil pengamatan *sunspot* secara manual. Di masa lampau beberapa pengamat hanya menggambar secara detail bagian piringan matahari yang diperbesar, beberapa melaporkan dalam bentuk catatan tanpa gambar (Clette, 2018), tetapi metode yang paling banyak digunakan adalah menggambar sketsa piringan Matahari dengan menggunakan metode proyeksi. Pada metode ini, bayangan piringan matahari diproyeksikan pada kertas, kemudian *sunspot* digambar sesuai dengan bayangan yang ada pada kertas.

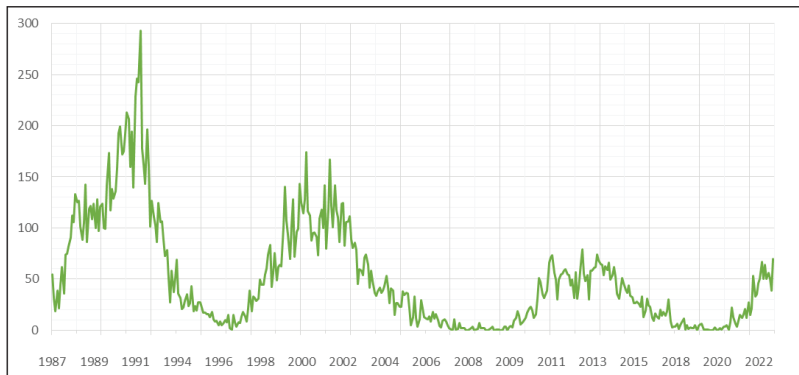
Pengamatan *sunspot* menggunakan metode sketsa pernah dilakukan BRIN Pasuruan sejak di tahun 1987 yang telah bergabung dengan SILSO untuk berperan aktif dalam perhitungan indeks-*k sunspot*. Gambar 2.6 merupakan grafik dari WDC-SILSO yang dikirim melalui akun stasiun pengamatan. Dari hasil indeks-*k* tersebut dihitung nilai *R* BRIN Pasuruan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7.

Untuk bagian selanjutnya pada subbab ini metode sketsa ditulis berdasarkan teknis operasional pengamatan *sunspot* yang pernah dilakukan di BRIN Pasuruan selama lebih dari 35 tahun. Pengamatan manual di BRIN Pasuruan dilakukan menggunakan teleskop proyeksi yang memiliki lensa utama dengan panjang fokus 2.250 mm dan



Sumber: (SILSO, 2024c)

Gambar 2.6 Indeks-k (atas) dan Jumlah Pengamatan Harian per Tahun dari BRIN Pasuruan yang Dikirim ke WDC-SILSO (bawah). Dalam daftar stasiun WDC-SILSO, BRIN Pasuruan disebut sebagai Watukosek Observatory Indonesia (WK103).



Gambar 2.7 Nilai R dari Pengamatan Sunspot BRIN Pasuruan yang Menggambarkan Siklus Matahari ke-22 hingga Awal Siklus Matahari ke-25

diameter 150 mm (Gambar 2.8). Teleskop dilengkapi dengan motor penggerak yang dapat menggerakkan teleskop secara otomatis sehingga mampu mengarah ke Matahari secara terus-menerus. Di ujung teleskop pada sisi pengamat telah terpasang bidang proyeksi untuk meletakkan kertas sketsa. Kertas sketsa adalah kertas khusus yang memiliki pola lingkaran yang digunakan sebagai tempat untuk jatuhnya bayangan Matahari hasil proyeksi.



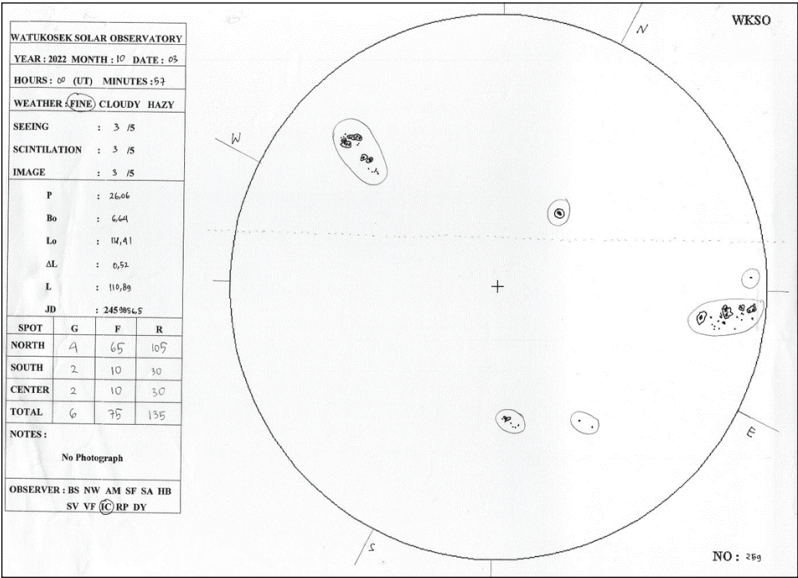
Foto: Dok. BRIN Pasuruan

Gambar 2.8 Teleskop *Sunspot Sketch*

Pengamatan dengan metode sketsa diawali dengan mengarahkan teleskop ke Matahari hingga bayangan Matahari terproyeksi tepat ke pola lingkaran pada kertas sketsa yang telah dipasang. Pemasangan kertas sketsa disesuaikan dengan arah mata angin lokasi pengamatan.

Bayangan Matahari akan terbentuk di pola lingkaran dengan bintik-bintik hitam yang mengindikasikan *sunspot*. Pengamat kemudian menggambar *sunspot* pada kertas sketsa sesuai dengan bentuk *sunspot* yang terproyeksi menggunakan pensil 2B.

Setelah semua *sunspot* selesai digambar, langkah selanjutnya adalah mengetahui orientasi Bumi terhadap Matahari. Hal yang dilakukan adalah menandai lintasan *sunspot* dari timur ke barat dengan cara menggerakkan teleskop sedemikian sehingga proyeksi *sunspot* jatuh pada kertas sketsa di sisi timur lalu mematikan motor penggerak. Setelah motor dimatikan, proyeksi bayangan *sunspot* akan terlihat bergerak seiring waktu akibat bergesernya posisi Matahari relatif terhadap Bumi, kemudian lintasannya ditandai dengan titik-titik. Setelah bayangan *sunspot* sampai di sisi barat pola lingkaran, akan tergambar garis putus-putus yang menandakan orientasi Bumi terhadap Matahari. Gambar 2.9 merupakan hasil pengamatan pada tanggal 03 Oktober 2022.



Sumber: Dok. BRIN Pasuruan (13 Januari 2022)

Gambar 2.9 Sketsa *Sunspot*

Kotak sebelah kiri pada Gambar 9 merupakan keterangan kondisi Matahari pada hari observasi, meliputi tanggal pengamatan; jam pengamatan (UTC); weather: kondisi cuaca saat pengamatan, diisi dengan nilai fine (cerah), hazy (berkabut), atau cloudy (berawan); seeing, scintillation, dan image, yang menjelaskan tangkapan bayangan Matahari pada kertas sketsa, masing-masing diisi dengan skala 1 hingga 5 dari kualitas buruk hingga sangat baik tergantung cuaca saat pengamatan; P: perputaran Matahari terhadap sumbu x; Bo: perputaran Matahari terhadap sumbu y; Lo : perputaran Matahari terhadap sumbu z; ΔL : ketelitian perputaran Matahari terhadap sumbu z tergantung waktu pengamatan; $L = Lo - \Delta L$; JD: Julian Date); G: jumlah group *sunspot*; F: jumlah *sunspot*; R: nilai Wolf Number. Nilai G, F dan R dipisahkan berdasarkan utara (North), selatan (South), dan pusat (Center).

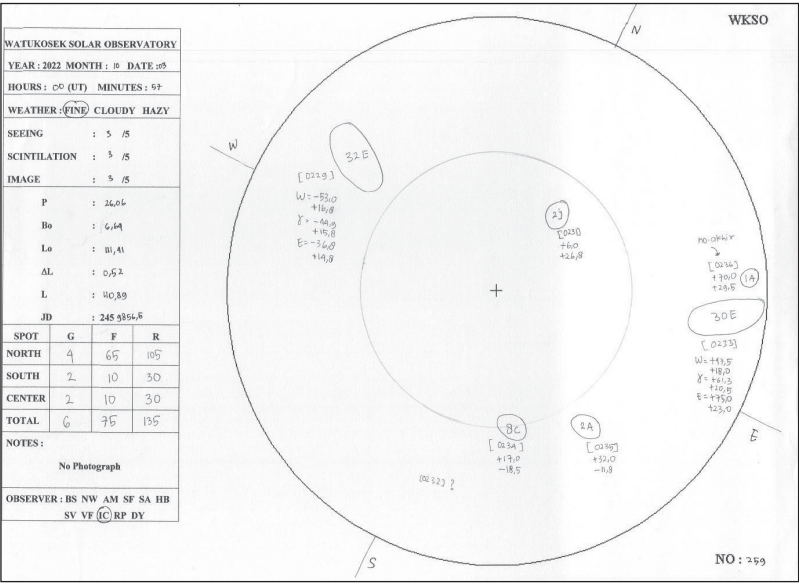
Langkah selanjutnya adalah melakukan pengolahan data koordinat Matahari berdasarkan P, Lo , ΔL . Untuk itu pengamat mempersiapkan kertas data olahan. Kertas data olahan adalah kertas tempat menuliskan data hasil olahan yang didapatkan dari data pengamatan pada kertas sketsa. Kertas data olahan memiliki tampilan yang serupa dengan kertas sketsa. Untuk mengisi kertas data olahan, pengamat memproyeksikan kertas sketsa pada sebuah lembaran peta koordinat heliografik matahari (garis lintang dan bujur Matahari) menggunakan perangkat meja proyeksi. Selanjutnya pengamat menandai posisi grup *sunspot* pada peta koordinat heliografik, kemudian mencatat hasilnya pada kertas data olahan.

Selanjutnya pengamat menentukan grup *sunspot* dari hasil sketsa yang telah dibuat dengan cara menganalisis jarak antar *sunspot*. Apabila dua buah *sunspot* berjarak $<5^\circ$, maka kedua *sunspot* tersebut masuk dalam satu grup. Setelah semua grup *sunspot* ditentukan, pengamat mengklasifikasi kelas masing-masing grup *sunspot* berdasarkan klasifikasi Zurich, kemudian menentukan nomor grup *sunspot*. Nomor grup *sunspot* adalah nomor yang diberikan pada sebuah grup *sunspot* pada saat kemunculannya pertama kali. Nomor ini digunakan untuk mengidentifikasi sebuah grup selama masa kemunculannya.

Nomor ini ditentukan setiap awal tahun dimulai dari nomor 001 dan perhitungan akan berlanjut pada grup *sunspot* baru hingga akhir tahun. Seluruh hasil perhitungan di atas kemudian dituliskan pada kertas data olahan.

Gambar 2.10 menampilkan hasil penentuan koordinat utara-selatan-barat-timur dan koordinat heliografik grup *sunspot*. Pada grup *sunspot* dengan panjang $>5^{\circ}$, koordinat dihitung pada sisi barat dan sisi timur beserta nilai rata-ratanya. Terdapat zona pusat (*central zone*) yang memiliki radius setengah jari-jari sketsa Matahari dengan pusat yang sama dengan piringan Matahari. Zona pusat tersebut merupakan kriteria tambahan dalam pengamatan *sunspot* manual yang diberikan oleh SILSO.

Pada langkah selanjutnya, pengamat mengarsipkan data yang telah diolah ke dalam basis data komputer. Data disimpan dalam bentuk teks yang disimpan dalam berkas berformat ASCII. Terdapat



Sumber: Dok. BRIN Pasuruan (13 Januari 2022)

Gambar 2.10 Data Olahan Sketsa *Sunspot*

dua jenis informasi yang disimpan pada *file* tersebut, yaitu (A) kondisi pengamatan dan (B) grup *sunspot* (Gambar 2.10). Kolom A berisi tanggal pengamatan, Julian Date, waktu pengamatan (UTC), kondisi cuaca, skala *seeing-scintillation-image*, nilai *P*, *Bo*, *Lo*, dan *L*, NP adalah 'No Photograph', yaitu pengamatan tidak direkam secara digital, BS adalah inisial pengamat, 001 adalah urutan pengamatan yang dimulai setiap tahun. Kolom B berisi informasi jumlah grup *sunspot* harian, nomor grup *sunspot*, jumlah spot dalam grup, kelas Zurich, dan lokasi dalam koordinat heliografik. Pada kolom B ini tiap-tiap grup yang teramati ditulis pada baris yang berbeda.

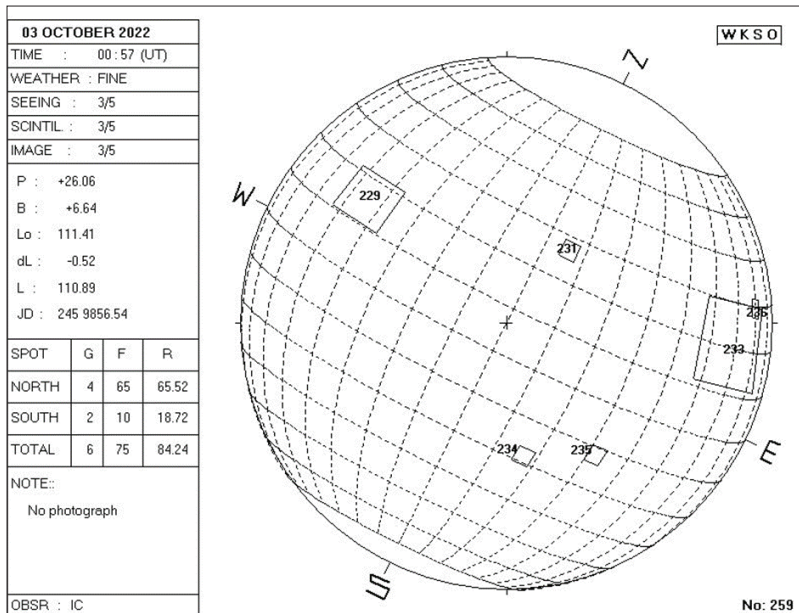
@01 2451910.5 0024 FINE 334 +2.01 -3.04 217.29 217.07 NP BS 001															A
#05	0604	14	C	-47.4	-7.0	-43.5	-11.0	-39.9	-13.6	B					
	0612	54	E	+9.0	-7.0	+15.0	-7.0	+22.7	-6.0						
	0614	9	C	-22.2	+27.4	-18.0	+28.0	-14.8	+28.0						
	0615	9	C	+2.0	-12.0	+5.0	-11.8	+8.0	-12.0						
	0001	2	J	+80.0	+20.9										

Sumber: Dok. BRIN Pasuruan (1 Januari 2001)

Gambar 2.11 Pengamatan Harian Sunspot dari Arsip BRIN Pasuruan

Data pengamatan disimpan dalam satu berkas yang terdiri dari pengamatan selama satu bulan. Pengarsipan data dalam bentuk teks ini dilakukan agar data hasil pengamatan dapat dengan mudah diolah secara komputerisasi untuk digunakan dalam berbagai kebutuhan. Sebagai contoh, pada Gambar 2.12 dapat dilihat hasil rekonstruksi posisi grup *sunspot* dalam visualisasi tiga dimensi menggunakan perangkat lunak yang telah dirancang sebelumnya. Grup *sunspot* ditandai dengan bentuk kotak lengkap dengan nomor grup *sunspot*. Komputer akan membaca berkas, melakukan perhitungan numerik, dan hasilnya ditampilkan dalam bentuk digital.

Data pengamatan kemudian dikirim ke SILSO melalui website <https://www.sidc.be/WOLF>. Data yang dikirim meliputi waktu pengamatan, kualitas pengamatan, jumlah grup *sunspot*, jumlah *sunspot*, serta nilai *R* (Wolf Number) berdasarkan posisi utara, selatan, dan pusat.



Sumber: Dok. BRIN Pasuruan (13 Januari 2023)

Gambar 2.12 Rekonstruksi Hasil Pengamatan *Sunspot* pada Koordinat Heliografik menggunakan Komputer

2. Pengamatan Sunspot Digital

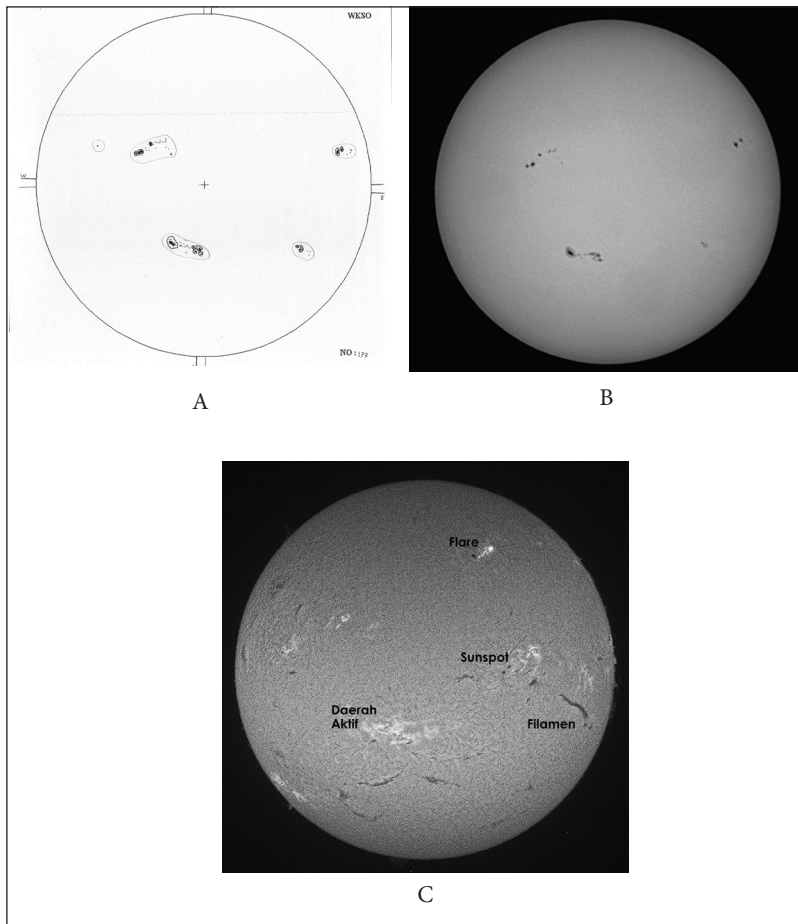
Selain melakukan pengamatan secara manual, BRIN Pasuruan juga melakukan pengamatan secara digital. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan dua buah teleskop dengan filter yang berbeda untuk merekam data pada panjang gelombang yang berbeda, yaitu pada cahaya tampak dan 656 nm. Teleskop pertama adalah teleskop refraktor dengan spesifikasi serupa dengan teleskop yang digunakan untuk sketsa, yaitu dengan panjang fokus 2.250 mm dan diameter 150 mm. Teleskop ini dilengkapi dengan filter *white-light* untuk mengamati Matahari pada panjang gelombang cahaya tampak (400-700 nm). Teleskop kedua adalah teleskop dengan filter H-Alpha, dengan spesifikasi panjang fokus 800 mm dan diameter 90 mm. Teleskop ini dapat mengamati berbagai fitur Matahari, termasuk *sunspot* (Gambar 2.13).



Foto: Dok. BRIN Pasuruan (13 Januari 2023)

Gambar 2.13 Teleskop Matahari Digital

Pada kedua teleskop tersebut terpasang kamera CCD di sisi okulernya yang berfungsi untuk merekam data pengamatan secara otomatis. Kedua teleskop dipasang pada mounting permanen yang sama, sehingga hasil pengamatan keduanya konsisten. Kedua teleskop secara otomatis mengikuti pergerakan Matahari. Citra Matahari direkam dengan interval 1 menit selama 8 jam setiap harinya. Seluruh proses pengamatan hingga perekaman data berjalan secara otomatis tanpa membutuhkan operator. Citra Matahari yang dihasilkan kemudian dianalisis oleh pengamat yang bertugas. Gambar 2.14 merupakan salah satu contoh hasil pengamatan digital.



Keterangan: A. Hasil pengamatan manual. B. Hasil pengamatan digital dengan filter *white-light*. C. Hasil pengamatan digital dengan filter H-Alpha

Sumber: Dok. Arsip BRIN Pasuruan

Gambar 2.14 Contoh Hasil Pengamatan Sunspot di BRIN Pasuruan

G. Penutup

Pengamatan aktivitas Matahari diperlukan untuk meminimalkan dampak negatif Matahari ke Bumi seperti badai geomagnet dan gangguan ionosfer. Aktivitas Matahari yang paling mudah diamati adalah bintik matahari (*sunspot*). Pengamatan *sunspot* telah dilakukan sejak abad ke-17 hingga saat ini. Keberlangsungan data tersebut sangat penting untuk melakukan prediksi siklus Matahari yang berkaitan dengan gangguan Matahari di Bumi. Pengamatan *sunspot* dilakukan di seluruh dunia dan diorganisir oleh WDC-SILSO yang berpusat di Belgia. Data pengamatan *sunspot* di seluruh dunia dikumpulkan untuk dihitung nilai Wolf (R) dan masing-masing stasiun pengamatan memiliki indeks- k yang berubah setiap bulan berdasarkan lokasi dan kualitas pengamatan. Setiap stasiun memiliki waktu, kondisi cuaca, dan kualitas pengamatan yang berbeda sedangkan *sunspot* bergerak seiring waktu. Oleh karena itu, indeks- k ini penting untuk setiap stasiun sebagai nilai penyesuaian data setiap stasiun.

Pengamatan *sunspot* dapat dilakukan secara manual maupun digital. Pengamatan manual dilakukan menggunakan teleskop proyeksi dan hasilnya dicatat dengan metode sketsa. Sementara pengamatan digital dilakukan menggunakan dengan bantuan alat perekam digital yang dipasang pada teleskop ataupun dibawa oleh satelit. Pengamatan manual memiliki keunggulan dalam konsistensi data dan metode pengamatan dalam jangka panjang, sedangkan pengamatan digital unggul dalam resolusi spasial maupun temporal. Data hasil pengamatan manual cocok digunakan dalam pemanfaatan data dengan rentang waktu yang sangat panjang sementara data hasil pengamatan digital lebih cocok digunakan untuk pemanfaatan data dalam rentang waktu yang pendek tetapi membutuhkan resolusi data yang mendetail. Di Indonesia pernah dilakukan pengamatan *sunspot* sejak tahun 1984 hingga 2023 oleh BRIN Pasuruan dan BRIN Sumedang. Pengamatan dilakukan menggunakan metode sketsa maupun metode digital.

Daftar Pustaka

- Arlt, R., & Vaquero, J. M. (2020). Historical *sunspot* records. *Living Reviews in Solar Physics*, 17, 1–60.
- Berghmans, D., Van der Linden, R. A. M., Vanlommel, P., Clette, F., & Robbrecht, E. (2006). History of the Sunspot Index: 25 years SIDC. *Beitrage zur Geschichte der Geophysik und Kosmischen Physik*, 7(1), 288.
- Boteler, D. H. (2019). A 21st Century View of the March 1989 Magnetic Storm. *Space Weather*, 17(10), 1427–1441.
- Carrasco, V. M. S., Lefèvre, L., Vaquero, J. M., & Gallego, M. C. (2015). Equivalence Relations Between the Cortie and Zürich Sunspot Group Morphological Classifications. *Solar Physics*, 290(5), 1445–1455.
- Casanovas, J. (1997). Early observations of *sunspots*: Scheiner and Galileo. In *1st Advances in Solar Physics Euroconference. Advances in Physics of Sunspots* (Vol. 118, p. 3).
- Clette, F. (2018). The *sunspot* number: historical base, current recalibration and scientific impact. In *Proc. Fifth Symp. "Historical Astronomical Records and Modern Science"*, National Astronomical Observatory, Tokyo (Vol. 62).
- Clette, F., Berghmans, D., Vanlommel, P., Van der Linden, R. A., Koeckelenbergh, A., & Wauters, L. (2007). From the Wolf number to the International Sunspot Index: 25 years of SIDC. *Advances in Space Research*, 40(7), 919–928.
- Clette, F., Cliver, E. W., Lefèvre, L., Svalgaard, L., Vaquero, J. M., & Leibacher, J. W. (2016). Preface to topical issue: recalibration of the *sunspot* number. *Solar Physics*, 291, 2479–2486.
- Clette, F., Svalgaard, L., Vaquero, J. M., & Cliver, E. W. (2014). Revisiting the Sunspot Number. A 400-Year Perspective on the Solar Cycle. *Space Science Reviews*, 186, 35–103.
- Cortie, A. L. (1901). On the Types of Sun-Spot Disturbances. *Astrophysical Journal*, 13.
- Djafer, D., Irbah, A., & Meftah, M. (2012). Identification of Sunspots on Full-Disk Solar Images Using Wavelet Analysis. *Solar Physics*, 281(2), 863–875.
- Eddy, J. A., Stephenson, F. R., & Yau, K. K. (1989). On pre-telescopic *sunspot* records. *Royal Astronomical Society, Quarterly Journal (ISSN 0035-8738)*, vol. 30, March 1989, p. 65-73.

- Hathaway, D. H. (2015). The solar cycle. *Living reviews in solar physics*, 12(1), 4.
- Hossfield, C. H. (2002). A history of the Zurich and American relative *sunspot* number indices. *Journal of the American Association of Variable Star Observers*, Vol. 31, No. 1, p. 48–53.
- Hoyt, D. V., & Schatten, K. H. (1998). Group *sunspot* numbers: A new solar activity reconstruction. *Solar physics*, 179, 189–219.
- Vaquero, J. M. (2007). Historical *sunspot* observations: A review. *Advances in Space Research*, 40(7), 929–941.
- Krivsky, L. (1972) dalam McIntosh, P. S. (1990). The Classification of Sunspot Groups. *Solar Physics*, 125(2), 251–267.
- McIntosh, P. S. (1981). The birth and evolution of *sunspots*-Observations. In *The physics of sunspots* (pp. 7–54).
- McIntosh, P. S. (1990). The Classification of Sunspot Groups. *Solar Physics*, 125(2), 251–267.
- Mossman, J. E. (1989). A comprehensive search for *sunspots* without the aid of a telescope, 1981-1982. *Royal Astronomical Society, Quarterly Journal (ISSN 0035-8738)*, vol. 30, March 1989, p. 59–64.
- NOAA (2024). Retrieved Mei 14, 2024. <https://www.ngdc.noaa.gov:https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/ssndata.html>
- Schaefer, B. E. (1997). Automatic Inflation in the AAVSO Sunspot Number. *The Journal of the American Association of Variable Star Observers*, vol. 26, no. 1, p. 40–46.
- Shapley, A. H. (1949). Reduction of *sunspot*-number observations. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 61(358), 13–21.
- SILSO (2024a). Retrieved Mei 2, 2024, from www.sidc.be: <https://www.sidc.be/SILSO/yearlyssnplot>
- SILSO (2024b). Retrieved Mei 17, 2024, from www.sidc.be: https://sidc.be/SILSO/DATA/GroupNumber/GNobservers_JV_V1-12.txt
- SILSO (2024c). Retrieved Mei 2, 2024, from www.sidc.be: https://www.sidc.be/WOLF/products/K_index_V2.php
- Solanki, S. K. (2003). THE ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS Sunspots: An overview. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 1769, 153–286.
- Svalgaard, L., & Schatten, K. H. (2016). Reconstruction of the *sunspot* group number: the backbone method. *Solar Physics*, 291, 2653–2684.