



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



**PERAN KEILMUAN FISIKA MATAHARI
DALAM PENGEMBANGAN TEKNOLOGI ANTARIKSA
MENUJU INDONESIA EMAS**

Profesor Dhani Herdiwijaya

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB
17 Februari 2024

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**PERAN KEILMUAN FISIKA MATAHARI
DALAM PENGEMBANGAN TEKNOLOGI
ANTARIKSA MENUJU INDONESIA EMAS**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

PERAN KEILMUAN FISIKA MATAHARI DALAM PENGEMBANGAN TEKNOLOGI ANTARIKSA MENUJU INDONESIA EMAS

Prof. Dhani Herdiwijaya

17 Februari 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

**PERAN KEILMUAN FISIKA MATAHARI DALAM PENGEMBANGAN
TEKNOLOGI ANTARIKSA MENUJU INDONESIA EMAS**

Penulis : Prof. Dhani Herdiwijaya

Reviewer : Prof. Taufiq Hidayat

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-406-7

e-ISBN : 978-623-297-407-4 (PDF)



© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Alhamdulillah Rabbil'aalamiin, segala puji dan syukur Penulis panjatkan kehadirat Allah Swt., Tuhan semesta alam yang atas rahmat dan rida-Nya, Penulis dapat menyelesaikan buku orasi ilmiah guru besar ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tinggi dihaturkan kepada segenap pimpinan dan anggota Forum Guru Besar (FGB) ITB yang telah memberikan kesempatan kepada Penulis untuk menyampaikan orasi ilmiah pada sidang terbuka FGB ITB. Dengan niat tulus, diiringi semangat berbagi pengalaman, wawasan serta motivasi mempertinggi kualitas, sinergi dan nilai manfaat Tridarma Perguruan Tinggi dari insan ITB untuk masyarakat dan bangsa Indonesia. Penulis bersyukur dapat menyampaikan kontribusi yang kecil ini terhadap masyarakat ITB dengan tradisi keilmuan yang tinggi.

Bidang keilmuan Fisika Matahari merupakan bagian kecil dari keilmuan Astronomi. Secara umum, keilmuan Astronomi merupakan muara dari berbagai cabang keilmuan, demikian pula halnya Fisika Matahari. Matahari sebagai objek bintang telah membentuk budaya manusia dan evolusi energi Matahari telah melahirkan keanekaragaman hayati yang tidak terhitung. Meskipun demikian perilaku fisis Matahari masih menjadi problema fundamental astrofisika. Dalam era teknologi berbasis antariksa, variabilitas aktivitas matahari menyebabkan badai matahari yang mengganggu semua teknologi antariksa dan mengancam keselamatan antariksawan. Dampak aktivitas matahari ini melahirkan cuaca antariksa

Terima kasih kepada kolega dosen, karyawan, dan semua mahasiswa yang telah mengikuti perkuliahan yang Penulis ampu. Juga kepada mahasiswa yang telah mengambil tugas akhir, tesis, ataupun disertasi terkait keilmuan Fisika Matahari. Kesempatan meraih jabatan guru besar bukanlah hasil pekerjaan individual semata, tetapi proses integratif dan berkesinambungan untuk membangun ikatan tali-temali silaturahmi para dosen dan kolega peneliti di lingkungan keilmuan Astronomi dan FMIPA ITB dengan budaya ilmiah dan atmosfer akademik yang sejuk di institusi tercinta ITB, serta jiwa Observatorium Bosscha yang terus menyala. Penulis dengan segala kerendahan hati menghaturkan rasa terima kasih kepada semua pihak di atas.

Penulis juga mengucapkan terima kasih serta doa tulus kepada kepada Ayahnda H. D. Soedikto, S.H., Ibunda Hj. H. Suprapti, Bapak H. S. Saryawijaya, dan Ibu Hj. N. Sumiati, yang selama hidupnya senantiasa mendukung dan memanjatkan doa bagi keberkahan kiprah Penulis berkarir sebagai dosen di ITB. Semoga Allah Swt. selalu melimpahkan rahmat-Nya untuk mereka. Terima kasih juga untuk istri tercinta Hj. Lina Tarliyah, keluarga ananda Tania D. Shonnareta dan Mokhamad Arif Saifullah, serta ananda Muhammad D. Aska (alm.) yang terus bersama dalam doa dan harapan untuk mengarungi lautan ilmu dan qalbu. Ucapan terima kasih juga kepada keluarga besar Pandawa, Mas Dadit, Mas Ikha, Dik Djarot dan Dik Djoni, serta keluarga besar Bapak H. S. Saryawijaya untuk semua semangat, kesejukan, dan kebersamaannya. Semoga capaian sampai detik ini menjadi momen untuk selalu bersyukur.

Perjalanan waktu hanyalah sekejap mata cahaya bagi semesta, cahaya waktu lampau dan sekarang hanyalah untuk bersyukur, dan cahaya waktu pula untuk menerangi esok yang lebih baik. Semoga Allah Swt. memberikan keridaan dan cahaya-Nya untuk waktu yang diberikan.

Bandung, 17 Februari 2024

Dhani Herdiwijaya

SINOPSIS

Fisika matahari adalah ilmu yang mempelajari fisis dari Matahari dengan komposisi materi plasma. Bidang ini mencakup semua aspek penelitian terkait matahari, mulai dari struktur internal dan evolusi Matahari hingga lapisan-lapisan atmosfer, dari fotosfer hingga korona, dan angin matahari di ruang antarplanet. Permukaan dan atmosfer Matahari selalu berubah-ubah, didorong oleh gaya magnetik yang dihasilkan oleh plasma yang dinamis.

Matahari melepaskan energi sebagai aliran gelombang elektromagnetik, dan lontaran partikel plasma energi tinggi, dan medan magnet yang kuat. Proses transien rekoneksi magnetik dari medan magnet kelompok bintik matahari menyebabkan fenomena ledakan matahari dengan emisi sinar-X, dan lontaran massa korona, atau pelepasan partikel bermuatan yang sangat cepat. Periode panjang aktivitas matahari mengikuti siklus sekitar 11 tahun, dengan medan magnet matahari mengalami perubahan arah dan kembali setiap 22 tahun sekali.

Aktivitas matahari mendorong dinamika parameter-parameter angin matahari di ruang antarplanet. Energi yang besar ini dapat mengganggu semua sistem teknologi antariksa, baik sistem elektronik, komunikasi, navigasi, dll. dan para antariksawan, sehingga dikenal dengan cuaca antariksa. Peningkatan kerapatan atmosfer menyebabkan hambatan orbit satelit dan menimbulkan ancaman bagi satelit-satelit yang berada di orbit rendah Bumi. Cuaca antariksa sebagai pembawa energi, materi dan gelombang, sehingga memengaruhi struktur dan komposisi lapisan magnetosfer, ionosfer, termosfer, dan eksosfer Bumi dan planet-planet lain.

Pengetahuan terhadap aktivitas Matahari, beserta dampak iklim antariksa, membantu kita untuk mempelajari pengaruhnya terhadap kelayakhunian Bumi jangka panjang. Selain itu, penelitian ini juga sebagai pembandingan tentang aktivitas bintang-bintang lain di alam semesta.

Kunci pemahaman aktivitas Matahari adalah mempelajari fenomena di permukaan Matahari, yaitu bintik matahari di lapisan fotosfer. Penulis melakukan penelitian gerak bintik matahari, sebagai konsentrasi medan magnet yang kuat. Dinamika gerak dan perubahan morfologi bintik matahari

mencerminkan dinamika di lapisan interior, di mana terjadi pembentukan medan magnet melalui proses dinamo. Pemahaman evolusi bintik matahari menggambarkan variabilitas kuat medan magnet, baik secara transien ataupun jangka panjang. Medan magnet bintik dipengaruhi oleh lapisan konveksi dan lapisan radiasi di bagian interior. Energi yang tersimpan dalam medan magnet dapat dilepaskan secara tiba-tiba menjadi energi termal atau disebut ledakan matahari. Dengan demikian, dinamika gerak bintik matahari berkaitan dengan fenomena energi tinggi di Tata Surya, yaitu ledakan matahari dan lontaran massa korona.

Kemanfaatan keilmuan dalam proses pembelajaran akan tumbuh karena kewajiban untuk berbagi keilmuan dalam menjawab kebutuhan masyarakat. Apapun bentuk uluran tangan dan senyum keilmuan akan menjadi kenangan bagi masyarakat dan lingkungan. Alam semesta selalu memberikan kesempatan dan tantangan kepada kita untuk memuliakan manusia dan alam.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
1. PENDAHULUAN	1
2. AWAL PENGEMBANGAN KEILMUAN FISIKA MATAHARI	7
2.1 Pengembangan Keilmuan Fisika Matahari.....	9
3. PENGAMATAN BINTIK MATAHARI	11
3.1 Metode Baru dalam Studi Gerak Diri Bintik Matahari.....	13
3.2 Rotasi Diferensial dan Aliran Meridional	18
3.3 Gerak Bintik Matahari dan Ledakan Matahari	21
3.4 Pengamatan Lapisan Kromosfer	25
4. PENGEMBANGAN TRIDARMA BIDANG KEILMUAN FISIKA MATAHARI.....	27
4.1 Perkuliahan.....	27
4.2 Cuaca dan Iklim Antariksa	31
4.3 Sinar Kosmik	35
4.4 Kaitan Aktivitas Matahari dengan Gempa Bumi dan Letusan Gunung Berapi.....	39
4.5 Kaitan Aktivitas Matahari dengan Kecerahan Langit Malam ...	41
5. KEMANFAATAN BAGI MASYARAKAT DAN LINGKUNGAN	45
6. PENUTUP.....	49
7. UCAPAN TERIMA KASIH	53
DAFTAR PUSTAKA.....	55
CURRICULUM VITAE.....	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Partisipasi dalam program <i>International School for Young Astronomer (ISYA)</i> tahun 1990 (ketiga dari kanan). Prof. Tomokazu Kogure, Universitas Kyoto (ketiga dari kiri) dan paling kanan, Prof. Sadanori Okamura (Universitas Tokyo), dan sekarang Prof. Nandhita Srivastava, pernah menjabat sebagai Kepala <i>Udaipur Solar Observatory</i> , India (kedelapan dari kiri).8
Gambar 2	Teleskop di atap Gedung Departemen Astronomi, Universitas Kyoto (kiri), dan kamera DSLR manual Nikon F3. 12
Gambar 3	Pemotretan jejak matahari dengan metode <i>multiple exposure</i> tiga piringan matahari pada tanggal 16 Mei 2000 jam 04:12:05 UT dengan Fuji film Minicopy ASA6 di Observatorium Bosscha (atas), dan citra magnetogram instrumen MDI dari satelit SoHO. 15
Gambar 4	<i>Nikon Profile Projector</i> dengan akurasi ketelitian pergeseran 3,5 μm 16
Gambar 5	Gerak diri bintik matahari dalam koordinat Carrington, bujur dan lintang 17
Gambar 6	Rotasi diferensial berdasarkan pengukuran gerak diri bintik matahari tunggal (kiri) dan gerak meridional (kanan). Warna hitam putih menunjukkan polaritas magnetik yang berbeda. 20
Gambar 7	Pergerak bintik matahari yang cepat. Kiri bawah menunjukkan arah utara dan barat, serta skala pergeseran 0,14 km/s (menurut Herdiwijaya 1997) 23
Gambar 8	Gerak rotasi bintik dalam kelompok bintik matahari AR12158 berdasarkan data satelit <i>Solar Dynamic Observatory (SDO)</i> , menurut Herdiwijaya & Chandra (2024b). 23
Gambar 9	Gerak gesek (<i>shear motion</i>) bintik dalam kelompok bintik matahari AR11158 berdasarkan data satelit <i>Solar Dynamic</i>

	<i>Observatory</i> (SDO), menurut Herdiwijaya & Chandra (2024b).....	23
Gambar 10	Perubahan arah dan kecepatan gerak bintik dalam bujur dan lintang, serta perubahan luas bintik untuk sebelum dan sesudah ledakan matahari berdasarkan data satelit <i>Solar Dynamic Observatory</i> (SDO), menurut Herdiwijaya & Chandra (2024b).	24
Gambar 11	Gedung (kiri) dan teleskop bernama Sartorius dengan detektor CCD Kodak Megaplug 1.4 dan <i>tunable H-alpha Lyot filter</i> serta kamera Nikon F3 (kanan) di Observatorium Kwasan, Universitas Kyoto.....	26
Gambar 12	Teleskop Surya terdiri atas tiga teleskop Matahari mengambil citra secara simultan, yaitu teleskop Ca II (kiri), teleskop visual (tengah), dan teleskop H-alpha (kanan).	28
Gambar 13	Variasi sinar kosmik untuk 3 stasiun, yaitu <i>South Pole - SOPO</i> (lintang 90 S), OULU (65° U), dan Newark – NEWK (39° U) dan perbedaan dengan model (Putri et al. 2024).....	38
Gambar 14	Distribusi kejadian gempa terhadap jumlah bintik matahari untuk skala magnitudo 4 (a), 5 (b), 6 (c), dan 7 (d) menurut Herdiwijaya et al. (2014).....	41
Gambar 15	Kecerahan langit malam sebagai fungsi siklus matahari. Fase maksimum terjadi tahun 2014, dan fase minimum tahun 2018 (Herdiwijaya et al., 2020).....	43
Gambar 16	Kecerahan langit malam sebagai fungsi jarak Bumi dan Matahari (Herdiwijaya et al. 2020).	43
Gambar 17	Kecerahan langit relatif dalam sehari untuk 22 hari bulan Juli 2021 di Cimahi. Angka menunjukkan perkiraan waktu salat malam (1), Subuh (2), Dhuha (3), Dhuhur (4), Ashr (5), Maghrib (6) dan Isya (7).....	45
Gambar 18	Relasi antara sudut elevasi (diambil sebagai nilai positif) dan kecerahan langit malam (kiri); durasi fajar (kanan) dalam Herdiwijaya (2020).	47
Gambar 19	Gradien kecerahan langit terhadap panjang gelombang untuk pagi (kiri) dan sore hari (kanan).....	47

1. PENDAHULUAN

Matahari merupakan bintang terdekat dengan planet Bumi yang berjarak sekitar 150 juta km atau 1 satuan astronomi. Secara fisis, ukuran bola plasma Matahari 100 kali lebih besar dan 300.000 kali lebih berat daripada planet Bumi. Temperatur inti mencapai 15 juta K dan 6000 K di permukaan. Matahari telah berumur sekitar 5 miliar tahun dengan mengubah setengah miliar ton Hidrogen setiap detiknya untuk menghasilkan energi.

Umat manusia sudah menggunakan dan mempelajari pergerakan Matahari. Saat itu kenampakan Matahari membentuk dan menyempurnakan budaya manusia yang tinggi. Peradaban manusia berkembang bersama dengan pemahaman pergerakan semu Matahari di langit dalam penentuan waktu. Adanya siang dan malam serta panjang bayangan Matahari di siang hari dipergunakan sebagai parameter waktu harian dan tahunan. Fenomena alam gerhana matahari total (Han & Qiao, 2009), kenampakan ekor komet (Yeomans, 1991), bahkan fenomena permukaan Matahari, yaitu pengamatan bintik matahari dengan mata telah diketahui dan tercatat ribuan tahun sebelum Masehi (Eddy et al., 1989). Baik fenomena alam yang menyapa tiap hari ataupun frekuensi rentang puluhan sampai ratusan tahun akan selalu memicu rasa keingintahuan ilmuwan. Peristiwa yang rutin dan biasa menutupi peristiwa yang luar biasa.

Fenomena alam lainnya yang berjalan bersama peradaban manusia adalah komet. Sayangnya masyarakat terjebak dalam kungkungan asumsi keburukan dengan kemunculan fenomena komet yang jarang terjadi. Kemunculan ekor komet selalu menjadi pertanyaan besar dalam pemikiran para ilmuwan. Edmund Halley (1705) menghubungkan laporan kenampakan komet tahun 1531, 1607 dan 1682 merupakan objek yang sama. Beliau memprediksi kedatangan komet yang sama pada tahun 1758. Akhirnya komet hadir dan terlihat pada tahun 1759 dan diabadikan dengan nama komet Halley, karena Beliau meninggal dunia pada tahun 1742. Halley tidak mengetahui asal-usul munculnya ekor komet yang selalu menjauhi arah Matahari. Naluri keilmuan Beliau sudah menyadari adanya aliran berasal Matahari, meskipun tidak diketahui wujudnya. Fenomena ini tidak bisa dijelaskan dengan kaidah baku gravitasi Newton. Ilmuwan selalu memperhatikan berbagai fenomena alam untuk mencari keteraturan.

Sebaliknya, bagi masyarakat umum, kenampakan fenomena alam yang tidak biasa diasosiasikan dengan pertanda keburukan yang akan menimpa. Tanggung jawab ilmuwan sebagai pemegang neraca keseimbangan keilmuan sepanjang hayatnya. Salah satu lengan mendalami fenomena alam secara luas, dan lengan lainnya memegang lentera untuk menerangi jalan bagi masyarakat. Setelah 300 tahun, perkembangan keilmuan dan teknologi manusia telah sanggup menjawab kenampakan ekor komet yang menjauhi arah Matahari.

Sesuatu berupa aliran yang mengalir dari Matahari dihipotesiskan sebagai angin matahari. Istilah angin matahari pertama kali diusulkan secara matematis pada tahun 1958 oleh fisikawan Universitas Chicago, Eugene Parker (Parker, 1958). Nama Beliau diabadikan sebagai nama wahana *Solar Parker Probe* dengan tujuan mempelajari angin matahari dalam jarak terdekat (perihelion) 7 juta km dari Matahari pada 27 September 2023. Bukti keberadaan angin Matahari menunggu teknologi antariksa lahir, yaitu satelit yang mengorbit keluar Bumi menuju planet lainnya. Akhirnya, angin matahari dapat dideteksi keberadaannya oleh satelit Mariner 2 dalam perjalanan ke planet Venus pada tahun 1962. Kemudian, tahun 1973, angin Matahari kecepatan tinggi terdeteksi dengan menggunakan gambar sinar-X yang diambil dari korona matahari dari stasiun antariksa Skylab. Inovasi pemodelan matematika sangat diperlukan dalam menjembatani hasil-hasil pengamatan alam semesta. Kuantisasi fisis lanjutan dengan inovasi keilmuan dan teknologi diperlukan untuk menghilangkan keraguan dalam pemodelan. Fenomena alam mengajarkan keilmuan dan teknologi kepada manusia. Pemahaman fenomena alam memerlukan keyakinan dan menjadi lahan kelahiran sesuatu yang baru atau inovatif, akan tetapi hal tersebut selalu berdampingan dengan masalah ataupun kegagalan dalam penerapannya. Namun, walaupun terjadi kesalahan, maka tetaplah berada di depan dan menjadi yang pertama mengetahuinya untuk memperbaiki kesalahan tersebut, dan pertama melangkah lebih jauh.

Fenomena alam yang langka yang membentuk peradaban manusia, yaitu gerhana matahari total (GMT). Peristiwa keheningan suasana malam hari sesaat yang terjadi di siang membuka tabir visual kenampakan lapisan mahkota atau korona Matahari. Lapisan terluar atmosfer Matahari ini tidak terlihat secara langsung ini merupakan antarmuka penjalaran energi menuju ruang antarplanet. Selama gerhana matahari total 7 Agustus 1869,

pengamatan spektroskopi memperlihatkan garis emisi hijau dengan panjang gelombang 530,3 nm diamati secara independen oleh Charles Augustus Young dan William Harkness dalam spektrum koronal (Guglielmi, 2017). Oleh karena garis ini tidak sesuai dengan materi apa pun yang diketahui dalam Daftar Periodik, maka diusulkan bahwa garis ini disebabkan oleh elemen yang tidak diketahui, yang untuk sementara dinamai koronium (Hunter, 1942). Walter Grotrian dan Bengt Edlén secara terpisah menemukan bahwa garis spektrum pada 530,3 nm disebabkan oleh besi yang terionisasi sangat tinggi ($\text{Fe } 13+$) yang disebabkan oleh suhu ekstrem (orde juta Kelvin atau mega Kelvin - MK) korona matahari (Grotrian, 1939; Edlen, 1945). Sejarah juga mencatat bahwa pengamatan gerhana matahari total pada tanggal 9 Mei 1929 untuk dua lokasi di Takengon dan Idi, Aceh juga berkontribusi dalam rangkaian penemuan fundamental eksistensi temperatur orde juta Kelvin di lapisan korona, selain konfirmasi teori relativitas umum dari Einstein (Miller & Marriot, 1929; Grotrian, 1931; Minnaert, 1931; Noor & Orchiston, 2021). Kuantisasi peningkatan eksponensial temperatur di lapisan korona yang disebut sebagai pemanasan korona, justru melahirkan problema baru dalam fisika matahari. Di antara lapisan fotosfer dan korona, terdapat wilayah tipis yang dikenal sebagai wilayah transisi. Tebalnya hanya berkisar puluhan hingga ratusan kilometer. Energi tidak dapat ditransfer dari fotosfer yang lebih dingin ke korona melalui perpindahan panas konvensional karena hal ini akan melanggar hukum termodinamika kedua. Setelah lebih dari 80 tahun, problema fundamental transfer energi ini belum dapat terpecahkan, meskipun mengarah akibat disipasi gelombang magnet. Teknologi wahana antariksa, *Solar Parker Probe*, yang dapat mendekati korona matahari dengan material pelindung yang dapat bertahan dalam lingkungan temperatur ekstrem diharapkan dapat menjadi solusinya.

Catatan tertulis pertama mengenai penampakan bintik matahari berasal dari tahun 28 SM (oleh astronom Tiongkok). Alat bantu teleskop untuk pengamatan permukaan Matahari dimulai sekitar tahun 1610. Pada saat inilah bintik matahari dapat diamati secara sistematis dan dilakukan oleh Galileo, Fabricius, Scheiner dan Harriot. Budaya ilmiah yang tumbuh berkembang dalam kalangan ilmuwan mulai berbenturan dengan budaya masyarakat. Pola benturan budaya berulang dengan waktu yang berganti selama berabad-abad pertumbuhan masyarakat. Ujung dari benturan ini, berakhir dengan menguatnya budaya ilmiah dan pencerahan dalam masyarakat dengan

tumbuhnya budaya baru. Budaya ilmiah akan mengkoreksi pengagungan budaya individu atau kelompok.

Pengetahuan era modern melihat bintik matahari merupakan fenomena menarik yang terjadi di fotosfer Matahari, karena perwujudan dari medan magnet yang kuat. Kenampakannya terdiri atas daerah yang tampak lebih gelap (disebut umbra), daripada area di sekitarnya yang lebih terang atau penumbra. Bintik Matahari lebih dingin daripada bagian permukaan Matahari lainnya, sehingga tampak gelap yang disebabkan oleh konsentrasi fluks magnetik yang menghambat konveksi. Medan magnet ini sangat kuat sehingga menahan sebagian panas Matahari agar tidak sampai ke permukaan.

Gerak diri bintik matahari (*sunspot proper motion*) mengacu kepada pergerakan bintik matahari melintasi permukaan Matahari. Gerakan ini bisa disebabkan oleh evolusi medan magnet (adanya pertumbuhan, perluasan loop fluks magnetik, sampai peluruhan di daerah magnetik), atau karena kecepatan rotasi matahari yang berbeda. Perubahan bentuk dari evolusi bintik matahari dapat memengaruhi kecepatan gerak dan meningkatkan kompleksitas morfologi garis-garis magnetik. Dengan kata lain, bintik matahari di dalam suatu wilayah, akan bergerak relatif satu sama lain (misalnya, menyatu atau berputar mengelilingi satu sama lain), atau bintik utama mungkin berputar pada suatu sumbu. Pergerakan ini cenderung menyebabkan peningkatan gradien medan magnet dan/atau pergeseran. serta meningkatkan potensi terjadinya aktivitas energi tinggi, yaitu ledakan matahari.

Mulai abad 18, observatorium Matahari mulai berdiri dan pengamatan terhadap bintik matahari dilakukan secara berkesinambungan. Bintik matahari menjadi bukti visual aktivitas Matahari. Pola periodisitas kenampakan bintik membuktikan adanya siklus aktivitas Matahari 9-13 tahun. Sekitar tahun 1645 hingga tahun 1715, jumlah bintik matahari teramati sangat rendah. Selama 70 tahun ini, kemungkinan terdapat kurang dari 15 bintik matahari yang teramati. Dalam kondisi normal, jumlah minimum yang diamati per tahun adalah sekitar 15, bahkan ketika Matahari berada dalam fase "tidak aktif". Menariknya, dalam periode Matahari tanpa bintik, temperatur di Eropa lebih dingin dari biasanya, sehingga sungai-sungai membeku dalam waktu lebih lama. Jadi ada beberapa indikasi bahwa adanya kenihilan bintik matahari pada Matahari, dan pada saat yang sama terjadi

pendinginan iklim bumi. Periode waktu ini disebut sebagai Zaman Es Kecil, dan tidak adanya bintik matahari disebut periode minimum Maunder. Bukti-bukti penelitian cincin pohon dan penelitian inti es menunjukkan adanya korelasi antara zaman es di Bumi dan aktivitas minimum matahari.

Sebagai bintang terdekat, variasi radiasi, plasma, medan magnet dan gelombang bersumber dari Matahari akan memengaruhi cuaca, iklim, pergerakan, dan kehidupan di Bumi. Komposisi utama Matahari adalah plasma. Lapisan-lapisan atmosfer merupakan jalinan yang tidak terpisahkan antara plasma dan medan magnet. Setiap komponen plasma yang bergerak dalam medan magnet akan menghasilkan gelombang termal dan nontermal. Plasma adalah salah satu dari empat wujud materi yang paling mendasar, ditandai dengan adanya sebagian besar partikel bermuatan dalam kombinasi ion atau elektron. Plasma adalah wujud materi yang paling melimpah di alam semesta, sebagian besar berwujud bintang-bintang (termasuk Matahari), tapi juga mendominasi medium antarbintang dan medium intergalaksi. Di dalam inti Matahari, gaya gravitasi menciptakan tekanan dan temperatur yang sangat tinggi. Suhu matahari di lapisan ini sekitar 15 juta derajat Celcius. Atom-atom Hidrogen terkompresi dan menyatu, menciptakan reaksi yang menghasilkan elemen lebih berat, yaitu Helium. Proses ini disebut fusi nuklir. Ketika gas memanas, atom-atom terpecah menjadi partikel-partikel bermuatan, mengubah gas menjadi plasma. Permukaan atau atmosfer matahari terus berubah, diaduk oleh aliran konveksi, gaya magnet yang menyatu dengan plasma. Medan magnet matahari dihasilkan oleh gerakan plasma konduktif di dalam Matahari, melalui mekanisme dinamo. Pemahaman tentang plasma sangat penting untuk memahami Matahari dan perilakunya, termasuk pembangkitan medan magnet dan penciptaan fenomena seperti bintik matahari dan ledakan matahari, dampak cuaca antariksa sampai pemahaman selubung atau pelindung Tata Surya, yaitu heliosfer.

Letusan dahsyat Matahari juga dapat mengganggu kehidupan di Bumi. Lontaran massa koronal (atau *coronal mass ejection*, CME) terjadi ketika sejumlah besar material terlempar dari korona Matahari ke ruang antarplanet. CME ini dapat membawa satu juta ton materi ke planet-planet dengan kecepatan 27 juta m/s. Ketika sebagian dari material ini mencapai atmosfer luar bumi, hal ini akan berdampak pada satelit, mengganggu orbitnya, merusak permukaannya, dan mengganggu

komunikasi maupun navigasi. Materi matahari dapat meluncur ke bawah garis medan magnet bumi dan menyebabkan fenomena yang disebut aurora, serta memadamkan jaringan listrik. Fenomena CME menjadi penyebab cuaca antariksa ekstrem atau badai geomagnet. Gelombang kejut yang sampai ke Bumi dari kecepatan dan kerapatan plasma akan mengganggu struktur lapisan-lapisan magnetosfer dan ionosfer.

Bagaimana para ilmuwan mempelajari Matahari? Bintik matahari telah terdeteksi melalui catatan masa lampau. Seiring waktu, pemahaman dinamika Matahari masih menjadi problema fundamental fisika Matahari, misalkan problema neutrino, proses dinamo sebagai pembangkitan magnet Matahari, pemanasan lapisan korona, dll.. Pengamatan Matahari secara berkesinambungan dan pengaruhnya terhadap Bumi adalah proses dengan kompleksitas keilmuan dan teknologi antariksa yang terdepan. Demikian pula, dampak terhadap kehidupan manusia memerlukan pemahaman secara multidisiplin, termasuk bidang kedokteran dan psikologi. Ilmuwan mengumpulkan data historik dengan pengamatan langsung ataupun melalui proksi data iklim masa lampau di berbagai titik di permukaan Bumi. Ilmuwan melakukan pendekatan terhadap masalah ini dengan berbagai teknologi. Berbagai detektor panjang gelombang jamak ditempatkan, baik di permukaan Bumi dan di satelit-satelit di berbagai posisi ketinggian sekitar Bumi. Teleskop dengan citra yang mempunyai resolusi temporal orde detik dan spasial di bawah 0,5 detik busur (~300 km) di permukaan Matahari untuk jarak 150 juta km dan resolusi temporal orde detik menciptakan kumpulan *big data* yang perlu diolah dengan bantuan komputasi kecerdasan buatan, sehingga nilai keilmiahannya yang tinggi dapat diperoleh dengan lebih cepat dan tervalidasi secara akurat. Dampak aktivitas Matahari terhadap teknologi dan kehidupan manusia di Bumi ataupun sebagai antariksawan dengan kondisi minim gravitasi memicu penguatan keilmuan di bidang-bidang lainnya, misalkan biologi, kesehatan, fisiologi, material baru, komunikasi, energi, dll..

2. AWAL PENGEMBANGAN KEILMUAN FISIKA MATAHARI

Ketertarikan terhadap keilmuan astronomi bermula dari sekolah menengah pertama, melalui bacaan di surat kabar, majalah *TITIAN* (*United States Information Service*, Jakarta), ensiklopedia ilmu, dll.. Seiring waktu berjalan, tambahan referensi tulisan-tulisan terkait astronomi di surat kabar, berlanjut surat-menyurat dengan Prof. Dr. Bambang Hidayat. Saat sekolah menengah atas di Jepara, berkesempatan kunjungan ke Lembang, akhirnya bertemu langsung dengan beliau di Observatorium Bosscha. Saat itu juga bertemu dengan Bapak Ninok Leksono, dan ditunjukkan teleskop Zeiss. Puji syukur kepada Allah Swt. yang mengabulkan keinginan belajar astronomi di ITB. Banyak generasi muda yang tertarik oleh magnet astronomi, tetapi sedikit yang dapat meneruskan belajar di kampus ITB.

Observatorium Bosscha menjadi laboratorium pertama untuk melakukan pengamatan bintang Matahari, melalui mata kuliah Laboratorium Astronomi di pertengahan tahun 1980-an. Pengajar saat itu adalah almarhum Prof. Dr. Djoni N. Dawanas. Meskipun hanya materi pengenalan, tetapi cukup untuk membuka wawasan bahwa objek astronomi tidak hanya malam hari. Matahari dapat diamati dengan cara proyeksi atau menggunakan penapis khusus untuk mengurangi intensitasnya. Pengamatan Matahari justru berlebih cahaya, berlawanan dengan objek malam hari. Di sisi lain, pengalaman beraktivitas di Observatorium Bosscha sebagai penerima kunjungan untuk umum, sekaligus menginap dan membantu pengamatan di teleskop Zeiss, Penulis dapat merasakan udara dingin malam hari, terutama setelah tengah malam. Terbersit, apakah mungkin penelitian astronomi tanpa berjuang melawan udara dingin. Akhirnya, secara berangsur-angsur topik penelitian terkait Matahari menggeser peminatan topik-topik lainnya, evolusi bintang, materi antarbintang, ataupun kosmologi. Saat itu topik penelitian Matahari belum berkembang dan tidak ada program pengamatan ataupun kajian Matahari di Observatorium Bosscha dan Jurusan Astronomi, sehingga tidak ada tugas akhir sebagai referensi ataupun dosen sebagai tempat diskusi terkait penelitian bidang Matahari. Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) (sekarang menjadi Badan Riset dan Inovasi Nasional atau BRIN) telah mempelajari aktivitas Matahari melalui Stasiun Pengamatan Dirgantara Watukosek (Pasuruan) dan Stasiun Tanjungsari, Sumedang. Insitusi tersebut

menjadi target tempat bekerja setelah lulus. Terima kasih yang tulus untuk Ketua Jurusan Astronomi, Dr. Iratius Radiman yang telah bersedia menyediakan waktunya untuk berdiskusi dalam penyusunan tugas akhir. Topik yang dipilih adalah pemodelan atmosfer Matahari secara teoretis dan semiempirik. Penulis harus memahami bahasa Fortran, menjalankannya dengan komputer pribadi, dan menunggu waktu eksekusi selama minimal 6 jam untuk satu kali iterasi dari maksimal 6 kali iterasi. Perpustakaan Observatorium Bosscha menjadi teman dalam menggali informasi. Takdir berkata lain. Setelah menyelesaikan studi tahap Sarjana, atas jasa Pak Radiman, terbuka jalan untuk menjadi staf dosen dan menjalani masa magang selama dua tahun sebelum menjadi CPNS.

Saat menunggu proses CPNS, Penulis mengikuti *International School for Young Astronomer (ISYA)* di Malaysia tahun 1990. Dalam momen ISYA bertemu dengan para ahli fisika matahari, di antaranya Prof. D. Wentzel yang memberikan hadiah buku teks aktivitas matahari, yaitu buku *Restless Sun*, dan Prof. J. Kleczek, pakar dalam teori ledakan matahari. Demikian pula bertemu dengan astronom senior dan rekan-rekan muda dari berbagai negara (https://www.iau.org/static/education/school_for_young_astronomers/list/isy1990a.pdf). ISYA 1990 menuntun kembali dan memberikan tambahan motivasi akan minat penelitian terhadap keilmuan fisika matahari.



Gambar 1 Partisipasi dalam program *International School for Young Astronomer (ISYA)* tahun 1990 (ketiga dari kanan). Prof. Tomokazu Kogure, Universitas Kyoto (ketiga dari kiri) dan paling kanan, Prof. Sadanori Okamura (Universitas Tokyo), dan sekarang Prof. Nandhita Srivastava, pernah menjabat sebagai Kepala *Udaipur Solar Observatory*, India (kedelapan dari kiri).

2.1 Pengembangan Keilmuan Fisika Matahari

Kerja sama yang sangat erat antara astronom Indonesia (Institut Teknologi Bandung) dan Jepang melalui program *Japan Society for the Promotion of Science* (JSPS), terutama dengan Universitas Kyoto memungkinkan pertukaran dosen antar-dua universitas. Beberapa dosen astronomi merupakan alumni program Doktor dari Universitas Kyoto. Kehadiran Prof. Mitsugu Makita dari Universitas Kyoto, Jepang di akhir 1980-an membuka jalan untuk studi tahap Magister dan Doktor di Jepang. Beliau sudah mempelajari bintik matahari melalui studi spektroskopi sejak tahun 1963 (Makita, 1963). Selanjutnya, Beliau berperan utama dalam bidang penelitian dan pengembangan instrumentasi terkait medan magnet bintik Matahari melalui citra magnetogram. Beliau berhasil membangun teleskop Matahari di Observatorium Okayama untuk menghasilkan magnetogram permukaan matahari. Terima kasih untuk keterbukaan dan keramahan Beliau dalam menerima menjadi mahasiswa tahap Magister di Departmen Astronomi, Universitas Kyoto, sekaligus mengupayakan beasiswa Monbusho dengan skema antar-universitas (ITB dan Universitas Kyoto). Proses aplikasi yang relatif cepat, sehingga pertama kali menginjakkan kaki di negara Sakura pada bulan Januari 1992, dan tinggal dalam asrama milik Universitas Kyoto, yaitu *Shugakuin International House* selama setahun. Saat kedatangan pertama kali di kota Kyoto, hujan salju turun cukup lebat, sekaligus pertama kali mengalami fenomena alam dari salah satu dari empat musim. Bulan Januari merupakan periode dengan temperatur paling dingin. Ke depan, Penulis merasakan setiap musim dicirikan dengan fenomena alam berbeda dan budaya masyarakat Jepang yang unik.

Prof. Makita menginginkan program magister langsung di mulai bulan April 1992, tanpa mengikuti kursus Bahasa Jepang ataupun proses adaptasi budaya akademik dan cuaca. Beliau hanya berpesan, lakukan semua proses sambil jalan. Setelah itu, Penulis menyadari bahwa beliau akan purnatugas pada tahun 1994, sehingga beliau menginginkan tahap Magister sudah diselesaikan pada tahun tersebut. Pembimbing baru untuk program Doktor akan menggantikan Beliau, yaitu Prof. Hiroki Kurokawa sampai menyelesaikan program Doktor di tahun 1997. Beliau menggantikan posisi Prof. Makita sebagai pimpinan *research group* bidang fisika matahari, sekaligus sebagai pimpinan Observatorium Kwasan. Departemen Astronomi, Universitas Kyoto mengelola beberapa observatorium dan teleskop di

beberapa lokasi, yaitu Observatorium Kwasan (tahun 1929), Observatorium Hida (tahun 1972), Observatorium Ouda, teleskop magnetogram di Observatorium Okayama. Observatorium Kwasan dan Hida mempunyai fasilitas untuk pengamatan Matahari (https://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/general/facilities/index_en.html). Penulis sudah mengunjungi ketiga observatorium di atas. Teleskop dengan teknologi terbaru yang dirancang oleh para dosen Departmen Astronomi adalah Teleskop Seimei (diameter 3,8m). Teleskop yang sama yang sedang dalam proses penyelesaian sebagai Observatorium Nasional Timau, Badan Riset dan Inovasi Nasional di Kupang.

Selama mengikuti program Doktor, Penulis dipercaya memonitor operasional satelit Yohkoh di *Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)* di kampus Sagamihara, Tokyo. ISAS di bawah organisasi *Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)*. Satelit Yohkoh merupakan satelit milik Jepang dengan konsorsium internasional yang khusus mengamati Matahari. Tugas tersebut sebagai kewajiban bagi mahasiswa program Doktor, dengan tujuan untuk memperkenalkan teknologi satelit khusus pengamatan Matahari, dan berinteraksi dengan ilmuwan internasional terkait penelitian fisika matahari. Penulis memperoleh empat kali penugasan, masing-masing selama satu minggu (<https://www.isas.jaxa.jp/en/missions/spacecraft/past/yohkoh.html>).

Keilmuan Fisika Matahari di negara Jepang sudah berkembang cepat, karena keilmuan terdepan mendorong teknologi maju, sehingga menjadi kebanggaan nasional. Data sains melalui perolehan atau pengamatan mandiri berupa observatorium atau laboratorium sudah menjadi keharusan bagi ilmuwan, sekaligus menjadi indikator daya saing institusi. Keingintahuan ilmuwan mendorong pengembangan kebutuhan untuk terciptanya inovasi teknologi terdepan yang menjadi harga diri negara. Akar dari budaya yang kuat karena sumber daya manusia kualitas tinggi yang berkesinambungan. Aspek inilah yang mendorong Penulis untuk mengembangkan keilmuan Fisika Matahari di Indonesia. Tentu saja, tujuan yang lebih sederhana adalah meningkatkan kepedulian, aspirasi, dan menginspirasi para siswa dan masyarakat terhadap sains, sebagai bagian proses yang berputar untuk mempertajam keilmuan. Tidak ada keilmuan yang berdiri sendiri. Pohon akan tumbuh kokoh dan tampak indah, karena dukungan lingkungannya.

3. PENGAMATAN BINTIK MATAHARI

Penelitian yang didalami adalah gerak diri bintik Matahari tunggal (*sunspot proper motion*). Saat itu, banyak observatorium Matahari di dunia mempelajari gerak kelompok bintik Matahari (*sunspot group*) dengan acuan pusat gravitasi (sentroid) morfologi kelompok bintik. Satu kelompok bintik matahari dapat terdiri atas puluhan bintik matahari tunggal. Berbeda dengan yang telah banyak dilakukan sebelumnya, hanya satu grup di dunia yang mempelajari secara detail gerak diri bintik individu, yaitu grup *Debrecen Heliophysical Observatory*, Hungaria. Hasil pengukuran posisi bintik matahari dipublikasikan dalam *Debrecen Photoheliographic Results* (DPR) dan *Debrecen Photoheliographic Data* (DPD). Katalog DPD berdasarkan pengukuran posisi kelompok bintik matahari secara harian (satu citra per hari), sedangkan katalog DPR berdasarkan pengukuran bintik matahari tunggal dengan resolusi waktu lebih tinggi atau beberapa citra per hari. Citra bintik matahari direkam dalam plat fotografi. Media fotografi ini memerlukan proses pencucian film dan proses pemindaian (*scanning*). Publikasi katalog DPR akhirnya dihentikan pada awal tahun 1990-an, karena memerlukan waktu lama dalam proses pengukuran bintik matahari tunggal, selain jumlah sumber daya manusia yang terbatas. Publikasi DPR hanya terbit tahun 1987 dan 1988. Dengan demikian, secara global tidak ada lagi grup peneliti melakukan pengukuran bintik matahari tunggal. Secara umum, penelitian yang akan Penulis lakukan adalah menyaingi penelitian grup Hungaria. Kekosongan ini dimanfaatkan Penulis untuk melakukan penelitian gerak bintik matahari tunggal dengan metode pengamatan dan analisis yang berbeda.

Atas izin Pimpinan Departemen Astronomi, Universitas Kyoto, Penulis menggunakan sepenuhnya salah satu kubah teleskop yang berada di atap Gedung Departmen (lihat gambar 2). Dasar-dasar mengoperasikan teleskop dari pengalaman di Observatorium Bosscha sangat membantu untuk tidak canggung dalam mengoperasikan teleskop selama penelitian. Pengamatan dilakukan setiap hari mulai jam 8 pagi sampai 16 sore untuk cuaca cerah. Teleskop yang dipergunakan berjenis refraktor dengan diameter 15 cm dan panjang fokus 2 m. Teleskop beserta penggerak sistem ekuatorial dibuat oleh perusahaan GOTO dan terpasang sejak tahun 1967. Konfigurasi ini

memungkinkan citra piringan matahari dapat terekam secara penuh film ukuran 35mm atau 24x36mm.



Gambar 2 Teleskop di atap Gedung Departemen Astronomi, Universitas Kyoto (kiri), dan kamera DSLR manual Nikon F3.

Berbeda dengan grup Debrecen, Penulis menggunakan kamera manual DSLR, yaitu Nikon F3 dan citra bintang matahari direkam dalam film seluloid hitam putih berjenis khusus, yaitu Fuji Minicopy film ASA 6 berukuran 35 mm. Jenis ini hanya diperjualbelikan di Jepang dalam bentuk gulungan sepanjang 100 m ataupun isi 36. Penggunaan film dengan ASA rendah untuk memperoleh bulir yang terhalus atau resolusi citra yang tinggi. Proses di kamar gelap wajib dilakukan untuk melihat hasil pemotretan. Kembali, kegemaran fotografi saat mahasiswa, termasuk pengalaman cuci cetak plat fotografi secara mandiri di kamar gelap di Observatorium Bosscha, membantu kelancaran proses penelitian di Universitas Kyoto. Proses pencucian menjadi film negatif mensyaratkan pembuatan larutan *developer* dan *fixer*, kemudian proses buka pasang film dalam kamera, merendam film dalam cairan *developer*, *fixer* sampai membilas dengan air, bahkan mencetak dalam kertas foto, yang semuanya dilakukan dalam kamar gelap. Pekerjaan tersebut menjadi rutinitas keseharian. Proses cuci cetak film umumnya dilakukan sore hari atau saat cuaca mendung di siang hari. Terbayang, keterampilan cuci cetak film dapat dimanfaatkan saat pulang ke Bandung untuk dapat membuka studio foto sendiri. Terima kasih untuk almarhum Ayahanda yang telah membelikan kamera DSLR manual, Canon A-1 sebagai hadiah kelulusan Sarjana. Meskipun kamera tangan kedua, tapi sangat bermanfaat dalam menambah jam terbang ketrampilan fotografi. Ternyata,

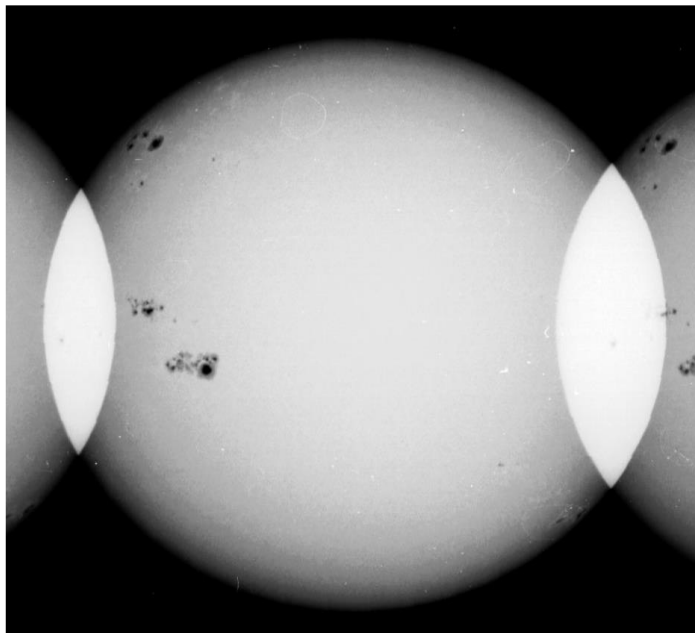
pengalaman fotografi tersebut bermanfaat untuk menempuh fase-fase fundamental studi lanjut. Di malam hari, pekerjaan yang rutin adalah pemahaman dan pembuatan program Fortran yang dikerjakan dalam komputer dan server berbasis UNIX. Saat itu, di laboratorium komputer Departmen Astronomi, Universitas Kyoto tidak ada komputer berbasis Intel atau Microsoft, kecuali satu komputer Mac. Bahasa Fortran sudah dipergunakan saat menyusun Tugas Akhir. Tentunya perlu waktu untuk bekerja dan beradaptasi dengan mesin komputasi yang baru dan variasi bahasa Fortran dalam atmosfer UNIX. Untuk mengejar ketertinggalan, waktu di kampus sudah terbiasa untuk pulang jam 11 malam.

3.1 Metode Baru dalam Studi Gerak Diri Bintik Matahari

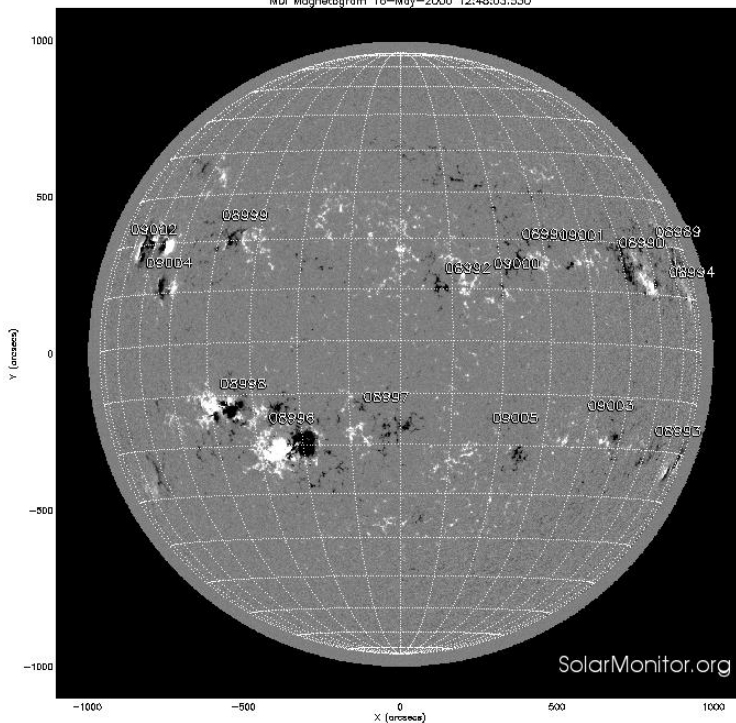
Secara historis berpuluh-puluh tahun, studi gerak bintik matahari berdasarkan hasil pengamatan berupa gambar sketsa piringan matahari yang dihasilkan oleh bayangan proyeksi teleskop matahari. Pengamat membutuhkan ketrampilan khusus dan pengalaman untuk menduplikasi bintik matahari dari bayangan proyeksi dalam lembar kertas gambar. Proses pembuatan sketsa yang cukup lama, maka umumnya hanya diperoleh satu sampai dua gambar sketsa dalam satu hari. Teknologi plat fotografi dipergunakan dalam rekam citra matahari. Proses selanjutnya melakukan pemindaian (*scanning*) untuk diperoleh data digital yang dapat diolah dengan lebih baik melalui komputer. Katalog harian historis yang monumental dari *Greenwich Photo-heliographic Result* (GPR) mencakup pengukuran harian posisi bintik matahari dan area bintik matahari serta facula yang diamati dari tahun 1874 hingga 1976. Sebelum tahun 1948, GPR diterbitkan oleh *Royal Observatory, Greenwich* dan setelahnya oleh *Royal Greenwich Observatory*. Pada tahun 1976, program pengamatan matahari harian GPR dihentikan dan dilanjutkan oleh *Debrecen Heliophysical Observatory, Hungaria* sebagai *Debrecen Photoheliographic Data*, (<http://fenyi.solarobs.epss.hun-ren.hu/DPD/index.html>). Meskipun resolusi temporal rendah, tetapi rentang periode data yang panjang memberikan informasi penting terhadap karakteristik ataupun ketidaksimetrian siklus matahari. Rotasi diferensial bintik matahari dapat diturunkan sebagai fungsi morfologi atau klasifikasi bintik matahari. Pemodelan teori dinamo juga dapat diuji dengan hasil pengamatan bintik matahari yang secara sistematis dengan data bintik matahari lebih dari 100 tahun. Meskipun berkontribusi penting dalam pemahaman siklus matahari,

kelemahan metode ini adalah tidak bisa dipergunakan untuk memprediksi fenomena transien, yaitu peristiwa ledakan matahari. Fenomena ledakan matahari menghasilkan energi terbesar di tata surya.

Penentuan koordinat bintik matahari bergantung terhadap akurasi penentuan arah timur dan barat piringan matahari terhadap arah rotasi Bumi. Metode baru yang Penulis kembangkan adalah pemotretan jejak matahari dalam satu *frame*, yaitu melakukan pengambilan 3 citra piringan matahari secara berurutan (*multiple exposure images*), sehingga ketiga citra akan saling berpotongan dalam satu rangka (*frame*) film. Interval waktu antara dua piringan Matahari sekitar 2 menit atau secara total diperlukan waktu minimal sekitar 5 menit setiap *frame* film. Saat proses *multiple exposures* ini dilakukan, penggerak teleskop harus dimatikan, sehingga teleskop akan diam dan arah timur dan barat akan terekam dalam setiap *frame*. Proses ini beranalogi dengan *star trail* untuk menentukan arah timur barat dalam pelat fotografi di Observatorium Bosscha. Penulis harus membaca secara detail spesifikasi kamera DSLR dengan kemampuan *multiple exposures*, karena tidak semua kamera mempunyai fasilitas ini. Uji coba pemotretan dilakukan untuk menentukan bukaan dan kecepatan rana kamera yang sesuai, agar bintik matahari mempunyai kontras yang cukup. Manfaat penting dengan metode tiga piringan adalah diperolehnya 4 titik perpotongan dalam satu piringan matahari. Keempat titik tersebut dipergunakan untuk menentukan arah timur-barat, serta memecahkan persamaan lingkaran piringan matahari, sekaligus diperoleh titik pusat piringan. Arah timur-barat ditentukan untuk setiap citra. Pemotretan *multiple exposures* tiga piringan matahari diulangi setiap 5 – 30 menit, bergantung kondisi cuaca. Grup Debrecen menggunakan tanda garis bentuk plus (*cross wire*) untuk menandakan arah timur-barat. Arah *cross wire* diperiksa dan dikalibrasi secara berkala setiap beberapa bulan. Ketidakkuratan arah timur-barat menyebabkan pergeseran secara sistematis koordinat bintik matahari atau pengukuran mempunyai akurasi rendah.



MDI Magnetogram 16-May-2000 12:48:03.530



Gambar 3 Pemotretan jejak matahari dengan metode *multiple exposure* tiga piringan matahari pada tanggal 16 Mei 2000 jam 04:12:05 UT dengan Fuji film Minicopy ASA6 di Observatorium Bosscha (atas), dan citra magnetogram instrumen MDI dari satelit SoHO.

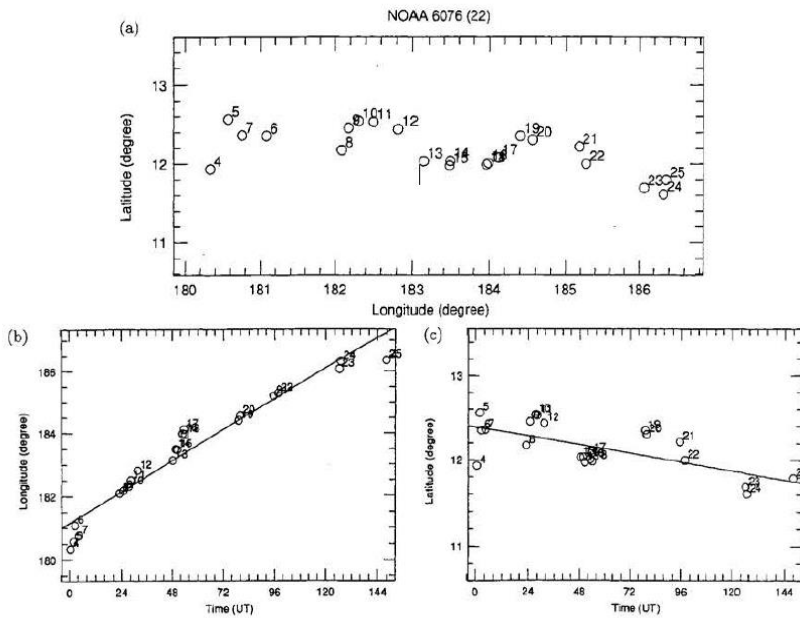
Setelah proses pencucian film, pengukuran koordinat bintik dalam koordinat X- Y dari film negatif dilakukan secara manual menggunakan bantuan *Nikon projection screen* seperti terlihat dalam gambar 4 (<https://industry.nikon.com/en-aom/products/optical-manual-measuring/profile-projectors/>). Instrumen proyektor memberikan akurasi pengukuran yang sangat baik untuk berbagai aplikasi dan jaminan kualitas (*quality assurance*) produk industri, yaitu kemampuan memeriksa, mengukur, dan memverifikasi fitur 2D dan sudut di berbagai komponen yang diproduksi. Peralatan ini cukup berat dan dipasang di lantai yang rata, untuk memberikan hasil yang akurat. Konstruksi instrumen presisi yang kuat dengan kualitas optik Nikon. Sistem proyektor mempunyai kemampuan perbesaran 100 kali dengan akurasi 0,1%. Meskipun peralatan untuk aplikasi terkait produk industri, tapi dapat dipergunakan untuk keperluan astronomi, yaitu memeriksa plat fotografi, peta bintang, dll., sehingga peralatan ini disimpan dalam ruang berpendingin udara. Penulis pertama kali menggunakan alat ini untuk mengukur posisi bintik matahari melalui film ukuran 35 mm.



Gambar 4 *Nikon Profile Projector* dengan akurasi ketelitian pergeseran 3,5 μm

Hasil pengukuran koordinat X - Y semua bintik matahari tunggal dan keempat titik perpotongan dari lingkaran tiga piringan matahari dimasukkan dalam program dan dikonversikan menjadi koordinat heliografik Carrington.

Ketelitian pengukuran koordinat bintang matahari sebesar $\pm 0,2$ derajat, lebih baik dari ketelitian pengukuran grup Debrecen yang mencapai 0,5 derajat. Peningkatan ketelitian dari metode baru yang dikembangkan disebabkan oleh akurasi penentuan arah timur-barat setiap citra piringan matahari. Hasil pengukuran salah satu bintang yang terlihat selama 7 hari tampak dalam gambar di bawah. Gerak bintang matahari berbeda setiap hari.



Gambar 5 Gerak diri bintang matahari dalam koordinat Carrington, bujur dan lintang

Kecepatan linier diperoleh dari pergerakan selama pengukuran satu bintang dapat dilakukan. Dalam analisis gerak bintang matahari terbagi dalam polaritas medan magnet bintang (melalui data magnetogram, lihat gambar 3) dan evolusi bintang matahari, menurut klasifikasi Zurich. Berdasarkan citra magnetogram, bintang matahari mempunyai polaritas magnet yang berbeda yang ditunjukkan dengan warna hitam dan putih. Dalam satu kelompok, bintang matahari yang berada di sebelah barat disebut bintang pemimpin, sedangkan di belakangnya sebagai bintang pengikut. Bintang pemimpin di hemisfer utara dan selatan menunjukkan polaritas yang berlawanan.

3.2 Rotasi Diferensial dan Aliran Meridional

Matahari bukanlah benda padat, tetapi terdiri atas plasma gas. Laju rotasi permukaan teramati paling cepat di khatulistiwa (garis lintang $\theta = 0^\circ$) dan menurun seiring bertambahnya garis lintang (menuju arah kutub). Fenomena ini dikenal sebagai rotasi diferensial. Mekanisme di balik rotasi diferensial matahari terutama didorong oleh konveksi di Matahari, yaitu pergerakan massa akibat gradien suhu yang curam dari inti Matahari ke arah luar. Studi tentang variasi rotasi diferensial matahari penting untuk memahami mekanisme yang mendasari siklus matahari dan variasi lain dari aktivitas matahari. Sebagai contoh, telah ditemukan bahwa rotasi diferensial matahari bervariasi terhadap modulasi siklus-ke-siklus jangka panjang dalam laju rotasi ekuator dan komponen gradien lintang yang berbeda. Periode rotasi Matahari adalah 24,47 hari di daerah ekuator dan hampir 38 hari di daerah kutub. Rotasi rata-rata adalah 28 hari. Periode rotasi sinodis 26,24 hari adalah waktu bagi fitur tetap di Matahari untuk berotasi ke posisi semu yang sama seperti yang terlihat dari Bumi. Fenomena rotasi diferensial dapat diamati dengan melacak pergerakan bintik matahari di permukaan Matahari selama beberapa hari. Fluida permukaan Matahari di sekeliling bintik matahari tidak bergerak dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan rotasi Matahari. Laju rotasi diferensial digambarkan dengan persamaan:

$$\Omega(\theta) = \Omega_0 - a \sin^2(\theta) - b \sin^4(\theta) \quad (1.1)$$

di mana Ω adalah kecepatan sudut dalam bujur dengan satuan derajat per hari, θ adalah garis lintang matahari, Ω_0 adalah kecepatan sudut di ekuator, dan koefisien a serta b adalah konstanta yang mengontrol penurunan kecepatan dengan bertambahnya garis lintang. Nilai koefisien a dan b berbeda tergantung pada *tracer* dan teknik yang digunakan untuk melakukan pengukuran, serta periode waktu yang diteliti. Suku ketiga persamaan 1.1 diterapkan untuk *tracer* yang banyak didapatkan di lintang tinggi (>50 derajat). Adapaun data posisi dalam lintang yang diukur sebagian besar berada di lintang rendah, sehingga cukup dipergunakan dua suku. Berdasarkan hasil pengukuran gerak bintik, diperoleh pola kecepatan rotasi matahari, berupa rotasi diferensial, seperti gambar 6 (kiri), diperoleh persamaan 1.2.

$$\Omega(\theta) = (14.52 \pm 0.74) - (2.53 \pm 0.43) \sin^2(\theta) \quad (1.2)$$

Hasil di atas berdasarkan hasil pengukuran bintik matahari tunggal (Herdiwijaya et al., 1997).

Selain aliran global yang mengikuti rotasi diferensial dalam arah bujur, terdapat aliran yang bergerak dari kutub ke arah ekuator, atau sebaliknya, yang disebut aliran meridional. Aliran meridional lebih lemah dibandingkan rotasi diferensial, kurang lebih sekitar 0,3%. Namun aliran meridional matahari adalah sistem aliran axisimetrik di Matahari. Aliran ini mirip gelembung atau sel konveksi raksasa (*giant cell*), yaitu aliran yang masuk ke dalam interior dan kemudian menyelesaikan putaran di bagian dalam melalui aliran balik ke arah ekuator dan aliran radial ke luar kembali ke permukaan. Aliran meridional memainkan peran penting dalam menjaga dinamika global dan mengatur pembentukan medan magnet matahari skala besar atau *solar dynamo*, yaitu proses fisika yang menghasilkan medan magnet Matahari. Proses dinamo akan mengubah energi kinetik (aliran konveksi) menjadi energi listrik-magnetik. Proses dinamo merupakan proses yang kompleks yang melibatkan interaksi dinamika fluida, magnetohidrodinamika, dan rotasi Matahari serta aliran meridional.

Sebagai sel konveksi, aliran ini sangat penting untuk pengangkutan fluks magnetik (berwujud bintik matahari di permukaan) dari ekuator ke kutub, atau sebaliknya. Peran aliran meridional yang telah diidentifikasi adalah mengendalikan periode siklus matahari. Meskipun telah banyak kemajuan dalam studi aliran meridional, lokasi aliran balik dan luasnya sirkulasi konveksi (*giant convective cell*) masih menjadi masalah yang belum terpecahkan. Demikian pula pembentukan medan magnet di interior Matahari melalui teori *solar dynamo* belum diketahui dengan pasti, sehingga berkonsekuensi langsung dengan belum bisa diprediksinya siklus matahari.

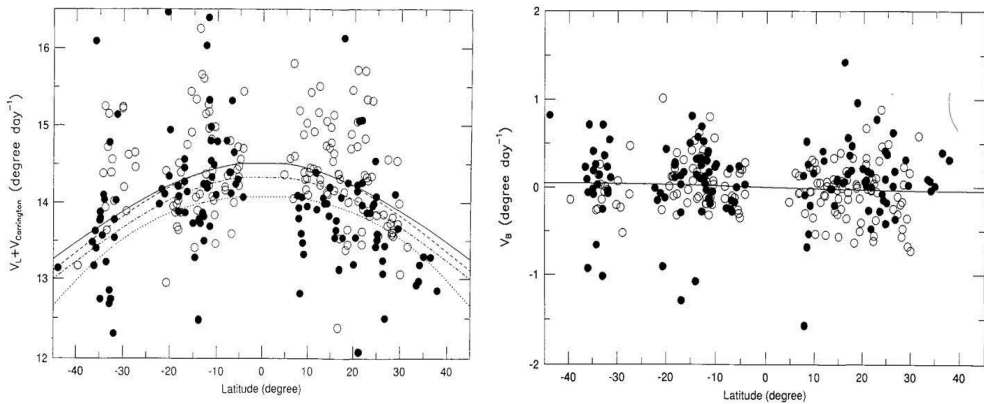
Persamaan umum aliran meridional dapat dituliskan,

$$V_m(\theta) = c \sin 2\theta \quad (1.3)$$

Berdasarkan gambar 6 (kanan) diperoleh kecepatan aliran meridional sebesar 4,5 m/s di lintang 20 derajat. Hasil ini lebih besar dibandingkan dengan pengukuran berbasis kelompok bintik matahari.

Rotasi diferensial dan aliran meridional merupakan aspek kunci dari dinamika zona konveksi dan merupakan pendorong utama siklus aktivitas Matahari. Gerak pergeseran terhadap lintang dari rotasi diferensial akan

menarik medan magnet utara-selatan dan berorientasi radial ke arah azimuthal, sehingga menghasilkan medan toroidal yang kuat yang pada akhirnya terangkat ke atas untuk menghasilkan daerah aktif bipolar pada siklus aktivitas matahari. Di sisi lain, aliran meridional di bagian atas sel konveksi mengangkut medan magnet ke kutub untuk membalikkan medan kutub pada siklus maksimum dan membangun medan kutub baru pada siklus minimum. Medan kutub ini muncul untuk menentukan kekuatan siklus aktivitas matahari berikutnya. Ketebalan lapisan batas, di mana aliran meridional terkonsentrasi, akan menipis seiring dengan laju rotasi. Untuk mengkuantifikasi proses transfer momentum dua aliran global adalah mencari nilai kovariannya. Hasil gabungan atau kovarian dari rotasi diferensial dan aliran meridional memberikan nilai $(-0.03 \text{ (degree/day)}^2)$. Nilai negatif mempunyai arti fisis bahwa transfer momentum ke arah ekuator. Nilai kecepatan aliran meridional yang lebih besar masih memungkinkan terjadinya keseimbangan dua aliran global dalam periode siklus matahari. Nilai kovarian rotasi diferensial dan aliran meridional merupakan interaksi kompleks dari dua fenomena yang mendorong siklus aktivitas matahari dan membentuk medan magnet Matahari. Memahami hubungan ini sangat penting bagi fisika matahari (Herdiwijaya, 2002; Herdiwijaya, 2006; Permata & Herdiwijaya, 2019).



Gambar 6 Rotasi diferensial berdasarkan pengukuran gerak diri bintang matahari tunggal (kiri) dan gerak meridional (kanan). Warna hitam putih menunjukkan polaritas magnetik yang berbeda.

3.3 Gerak Bintik Matahari dan Ledakan Matahari

Bintik matahari dan ledakan matahari merupakan manifestasi dari aktivitas magnetik matahari. Pergerakan bintik matahari di permukaan Matahari didorong oleh rotasi Matahari dan gerakan konvektif plasma di bawah fotosfer. Gerak bintik matahari memang bisa memicu rekoneksi magnetik, yang merupakan proses utama penyebab terjadinya erupsi matahari. Ledakan matahari, di sisi lain, adalah pelepasan energi magnetik yang tersimpan secara tiba-tiba dan dikaitkan dengan daerah aktif kelompok bintik matahari. Beberapa gerak bintik tertentu dapat memicu putusnya medan magnet, yang dikenal dengan proses rekoneksi magnetik (*magnetic reconnection*), sehingga terjadi pelepasan energi atau erupsi, bahkan ledakan matahari.

Ledakan matahari terdeteksi sebagai emisi radiasi elektromagnetik yang intens dalam sinar-X, bahkan sinar gamma dengan energi yang terkuat dalam sistem Tata Surya. Fenomena ledakan terlokalisasi di daerah aktif atau kelompok bintik matahari, dan sering disertai dengan fenomena erupsi matahari lainnya, yaitu lontaran massa korona. Ledakan matahari lebih sering terjadi saat fase maksimum siklus Matahari. Pemahaman keterkaitan gerak bintik matahari dan ledakan matahari tidak hanya meningkatkan pengetahuan kita tentang perilaku fenomena energetik di Matahari, tapi juga memiliki implikasi yang signifikan bagi prediksi cuaca antariksa dan pemahaman kita yang lebih luas tentang fisika plasma.

Rekoneksi magnetik adalah proses mendasar dalam fisika plasma, bidang yang mempelajari perilaku partikel bermuatan. Proses ini sangat menarik dalam studi fisika matahari dan cuaca antariksa, karena perannya dalam berbagai fenomena matahari.

Pada dasarnya, rekoneksi magnetik melibatkan pemutusan dan penyatuan kembali garis medan magnet secara transien di dalam plasma yang sangat konduktif. Penataan ulang topologi magnetik ini menghasilkan konversi energi magnetik menjadi energi kinetik, yang mengarah pada percepatan partikel dan pancaran radiasi energi tinggi pada spektrum elektromagnetik. Radiasi elektromagnetik berenergi tinggi ini diserap oleh sisi siang hari atmosfer Bumi, khususnya ionosfer. Penyerapan energi ini dapat meningkatkan proses ionisasi di lapisan ionosfer, sehingga kerapatan elektron akan semakin tinggi. Frekuensi kritis elektron sebanding dengan densitas elektron. Gangguan frekuensi ini dapat memutus komunikasi radio

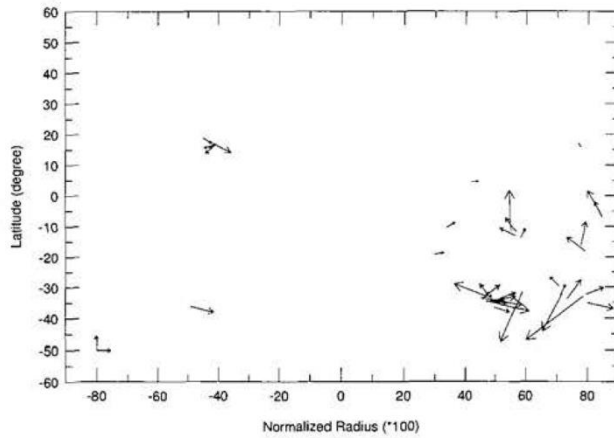
gelombang pendek. Ledakan matahari atau badai matahari berkorelasi dengan putusnya jaringan komunikasi global (*communication blackout*).

Selain perannya dalam ledakan matahari, rekoneksi magnetik juga penting untuk memahami fenomena astrofisika lainnya dan memiliki implikasi yang signifikan untuk fisika plasma dan penelitian energi fusi. Sebagai contoh, rekoneksi magnetik adalah proses kunci dalam banyak fenomena astrofisika, termasuk badai geomagnetik dan pemanasan korona matahari. Memahami rekoneksi magnetik juga sangat penting untuk pengurungan plasma (*plasma confinement*) dalam perangkat reaktor fusi. Penelitian fenomena energetic dan transient ini tidak hanya meningkatkan pemahaman kita tentang Matahari dan perilaku plasma, tapi juga memiliki implikasi yang signifikan untuk berbagai aplikasi teknologi dan bidang penelitian energi.

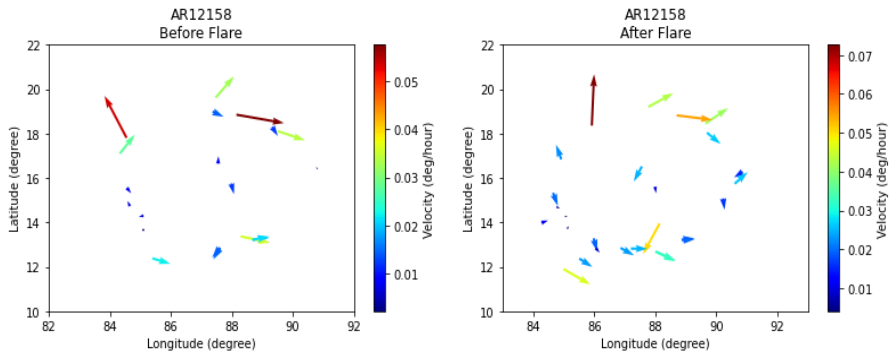
Kemunculan fluks magnetik atau bintik matahari yang tampak ke permukaan dengan polaritas magnet berbeda dari lingkungannya dapat memicu putusnya medan magnet atau rekoneksi magnetik, sehingga terjadi ledakan matahari. Gerak bintik yang baru muncul dapat dicirikan dengan geraknya yang cepat. Lihat gambar 7, gerak yang cepat ditandai dengan garis vektor lebih panjang.

Gerak bintik matahari yang memutar dalam kelompok merupakan proses penting yang menyebabkan terjadinya erupsi matahari. Lihat gambar 8. Gambaran fisik bagaimana rotasi bintik matahari menyebabkan erupsi adalah, dengan memutar garis medan magnet koronal dari titik-titik kakinya, rotasi dapat membangun tali fluks magnetic terpuntir dan mendorongnya ke dalam beberapa jenis ketidakstabilan magnetohidrodinamika (MHD). Akibatnya medan magnet putus dan terjadi erupsi atau pelepasan energi. Gerak gesek (*shear motion*) juga dapat menyebabkan proses rekoneksi magnetik (gambar 9).

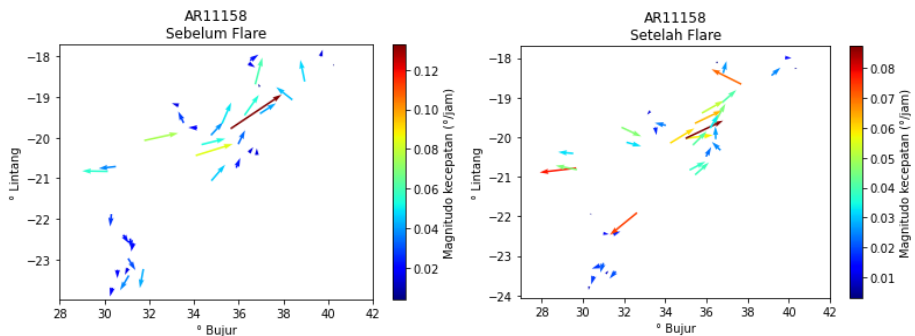
Pola perubahan gerak bintik matahari jelas terlihat jika dibandingkan pergerakan antara sebelum dan sesudah ledakan matahari, seperti terlihat dalam Gambar 10. Dalam arah bujur, bintik bergerak lebih cepat setelah ledakan matahari. Sebaliknya dalam arah lintang, bintik bergerak melambat. Luas bintik juga berkurang setelah ledakan matahari. Proses rekoneksi magnetik akan mengubah morfologi medan magnet bintik matahari.



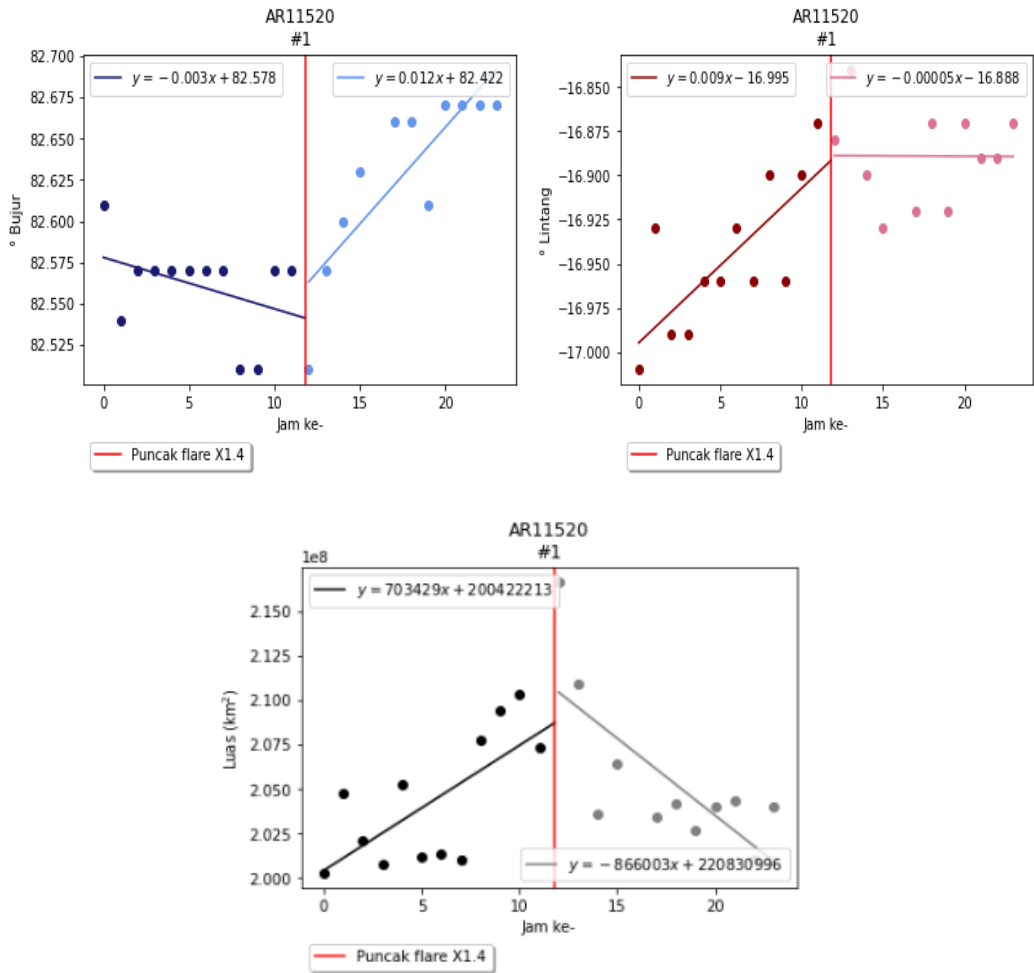
Gambar 7 Pergerak bintang matahari yang cepat. Kiri bawah menunjukkan arah utara dan barat, serta skala pergeseran 0,14 km/s (menurut Herdiwijaya 1997)



Gambar 8 Gerak rotasi bintang dalam kelompok bintang matahari AR12158 berdasarkan data satelit *Solar Dynamic Observatory* (SDO), menurut Herdiwijaya & Chandra (2024b).



Gambar 9 Gerak gesek (*shear motion*) bintang dalam kelompok bintang matahari AR11158 berdasarkan data satelit *Solar Dynamic Observatory* (SDO), menurut Herdiwijaya & Chandra (2024b).



Gambar 10 Perubahan arah dan kecepatan gerak bintang dalam bujur dan lintang, serta perubahan luas bintang untuk sebelum dan sesudah ledakan matahari berdasarkan data satelit *Solar Dynamic Observatory* (SDO), menurut Herdiwijaya & Chandra (2024b).

Studi terkait siklus matahari dan gerak diri bintang matahari terkait dengan ledakan matahari dilakukan berbasis citra satelit *Solar Dynamic Observatory* – SDO (Herdiwijaya & Indradjaja, 2002; Herdiwijaya & Imelda, 2006; Herdiwijaya, 2010b; Nurzaman & Herdiwijaya, 2015; Herdiwijaya & Permata, 2019; Permata & Herdiwijaya, 2020; Herdiwijaya et al., 2024) ataupun berbasis *machine learning* (Herdiwijaya & Fernanda, 2024). Pengamatan gerhana matahari total juga menunjukkan korelasi dengan aktivitas matahari (Fatima et al., 2016; Luthfiandari et al., 2016; Naufal et al., 2016).

3.4 Pengamatan Lapisan Kromosfer

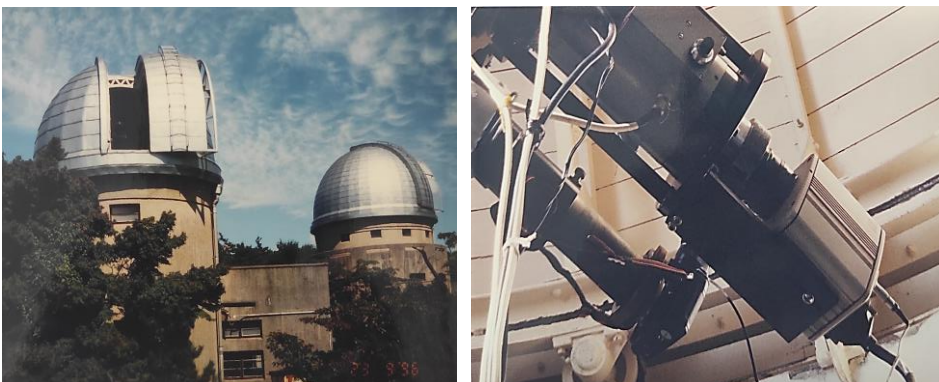
Atmosfer akademik mengajarkan konsistensi pengambilan data dengan rentang waktu yang panjang tetap diperlukan dalam mengisi data global, meskipun dengan resolusi spasial dan temporal yang relatif rendah. Rekaman data tersebut tetap memberikan tanda keberartian dalam peta penelitian untuk persaingan global. Data gambar atau sketsa piringan Matahari (*sunspot drawing*) telah dilakukan sejak abad 16 dan terus berlanjut sampai era digital.

Setelah menyelesaikan program Doktor, Penulis melanjutkan penelitian di Observatorium Kwasan, sebuah observatorium yang didirikan tahun 1929 dengan ketinggian 221 m di atas permukaan laut. Observatorium Kwasan di bawah Departmen Astronomi, Universitas Kyoto (https://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/general/facilities/kwasan/index_en.html). Perjalanan menuju lokasi menempuh waktu sekitar 30-40 menit dengan menggunakan sepeda, karena tidak ada angkutan umum menuju observatorium. Pimpinan Observatorium Kwasan, Prof. H. Kurokawa mempercayakan sepenuhnya satu teleskop dalam satu gedung dengan nama Sartorius, seperti terlihat dalam Gambar 11. Tugas yang diberikan adalah untuk mengembangkan sistem pengamatan dalam panjang gelombang H-alpha (6563 \AA) secara rutin, khususnya deteksi otomatis ledakan matahari. Citra dalam panjang gelombang H-alpha mencerminkan dinamika lapisan kromosfer. Berbeda dengan gerak diri bintik matahari yang berfokus kepada fenomena di lapisan fotosfer. Pertama kalinya Penulis bekerja dalam pengamatan dengan penapis panjang gelombang H-alpha dengan presisi tinggi. Penapis produk dari pabrik Zeiss dengan kemampuan pergeseran (*tunable*) panjang gelombang presisi tinggi sebesar $\pm 0,1 \text{ \AA}$ (*tunable H-alpha Lyot filter*) dalam rentang $6563 \pm 1,0 \text{ \AA}$. Citra dalam sayap merah terhadap pusat garis merepresentasikan materi atau plasma yang turun (*downflow*) di lapisan kromosfer. Sedangkan citra dalam sayap biru mencerminkan pergerakan plasma yang naik (*upflow*). Berdasarkan perbandingan kedua citra dalam H-alpha sayap merah dan biru, kecepatan pergerakan materi plasma dapat diketahui melalui efek Doppler.

Demikian pula, detektor CCD dengan sensor monokrom Kodak KAF-1400, yaitu *Kodak Megapix Digital Camera System 1.4* yang dipergunakan merupakan instrumentasi yang baru. Kamera dengan 1,4 megapixel ($1320 \times 1035 \text{ pixel @ } 6,8 \text{ \mu m square}$) ini telah didesain ulang dan memiliki fitur yang dioperasikan dalam mode akumulasi, yaitu pengurangan arus gelap (*dark current*) dan

noise. Kamera menggunakan *bandwidth* tinggi dengan *noise* rendah untuk menghasilkan kualitas gambar yang setinggi mungkin. Rana elektro-mekanis dua bilah kamera menghilangkan efek pencahayaan yang tidak seragam dan memberikan keandalan yang lebih baik. Kamera Kodak Megaplug dikontrol oleh *frame grabber* dari *Matrox Millennium* dan *software development kit* (SDK), *Matrox Imaging Library*. Perangkat lunak bekerja dalam sistem operasi Windows.

Kedua peralatan canggih tersebut memberikan tantangan dan wawasan baru bagi Penulis, untuk membuat antarmuka deteksi otomatis ledakan matahari dalam panjang gelombang H-alpha. Tantangan tersebut sekaligus menjawab kepercayaan yang telah diberikan. Tujuan pengamatan H-alpha ini adalah untuk mendapatkan perbandingan citra lapisan kromosfer dan citra lapisan korona yang diperoleh dari hasil pengamatan satelit Yohkoh. Meskipun spesifikasi teleskop yang dipergunakan merupakan teleskop lama, tetapi dilengkapi dengan sistem detektor ataupun instrumentasi pendukung yang terbaik, misalkan *tunable H-alpha Lyot filter* dan detektor CCD, serta laboratorium komputasi, sehingga masih memungkinkan bertahan menghasilkan data berkualitas dalam kompetisi penelitian internasional, sekaligus memberikan pandangan eksternal yang baik dalam kemajuan penelitian dari observatorium, universitas ataupun negara yang bersangkutan.



Gambar 11 Gedung (kiri) dan teleskop bernama Sartorius dengan detektor CCD Kodak Megaplug 1.4 dan *tunable H-alpha Lyot filter* serta kamera Nikon F3 (kanan) di Observatorium Kwasan, Universitas Kyoto.

4. PENGEMBANGAN TRIDARMA BIDANG KEILMUAN FISIKA MATAHARI

4.1 Perkuliahan

Pertanyaan mendasar saat kembali ke Kampus Ganesha pada tahun 1999, apakah penelitian gerak diri bintik matahari dan pengamatan H-alpha dapat dilanjutkan? Pertanyaan selanjutnya, bagaimanakah mencetak sumber daya manusia dalam bidang keilmuan fisika matahari? Untuk pertanyaan pertama, pengamatan bintik matahari dipersiapkan di Observatorium Bosscha, karena observatorium mempunyai fasilitas kamar gelap dan teleskop refraktor Unitron. Gulungan sepanjang 100 m film Fuji Minicopy ASA 6 dan bubuk untuk membuat cairan *developer* dan *fixer* dipersiapkan dari Jepang, untuk rencana pengamatan selama dua tahun di ITB. Semua bahan di atas tidak dapat diperoleh langsung di Indonesia. Peralatan *Nikon Profile Projector* diganti dengan *film scanner*. Uji coba pengamatan di Observatorium Bosscha berhasil dilakukan, meskipun tidak sebaik di Kyoto, Jepang. Lihat gambar 3. Saat itu, sistem pengamatan H-alpha untuk Matahari di atas ini tidak mungkin diterapkan di Departemen Astronomi, ITB, karena keterbatasan dana penelitian. Penulis sudah menyadari ketertinggalan teknologi dan sumber daya manusia pendukung, termasuk atmosfer penelitiannya. Faktor terakhir juga mencerminkan budaya masyarakat yang sudah berakar lama. Mencangkok dan menumbuhkembangkan budaya dan atmosfer penelitian memerlukan waktu yang sangat lama. Terlebih ilmuwan ITB tumbuh dari bermacam-macam budaya global. Tetapi 10 tahun kemudian, yaitu tahun 2009, teleskop H-alpha dan detektor CCD berhasil terpasang di Gedung Surya, Observatorium Bosscha, meskipun dengan spesifikasi lebih rendah dibandingkan dengan sistem pengamatan di Observatorium Kwasan.

Penelitian lapisan kromosfer matahari dilakukan dengan menggunakan data observatorium, yaitu *Dutch Open Telescope* - DOT di bawah pengelolaan Universitas Utrecht, Belanda. Teleskop dengan rancang bangun khusus pengamatan Matahari didirikan di atas ketinggian 2350m yaitu di *Observatorium Roque de los Muchachos*, La Palma, Kepulauan Canary. Teleskop berjenis reflektor mempunyai diameter cermin utama 45 sentimeter, sehingga dapat mencapai resolusi 0,2 detik busur atau sekitar 150 km di permukaan Matahari. Teleskop terpasang di atas menara setinggi 15 m untuk

mengurangi turbulensi udara, dan mulai beroperasi tahun 1997. Salah satu pengagas DOT adalah Prof. Rob Rutten. Beliau pernah memberikan seri perkuliahan di Kampus Ganesha dan Observatorium Bosscha, sekaligus meresmikan Gedung Surya (bersama Kepala Observatorium Bosscha, Dr. Taufiq Hidayat) pada tahun 2009, termasuk di dalamnya Teleskop Surya dan heliostat untuk pengamatan bintik matahari. Kedatangan Beliau memicu topik penelitian disertasi (Mumpuni et al., 2015; 2015a; 2015b; 2015c; 2018). Sangat disayangkan, teleskop dengan kinerja sangat tinggi untuk penelitian Matahari kelas dunia, akhirnya ditutup pada tahun 2012 (https://robrutten.nl/dot/DOT_home.html).

Penulis merancang pengamatan Matahari secara simultan dalam panjang gelombang visual (lapisan fotosfer), panjang gelombang Calcium II, 3934 Å (lapisan kromosfer bawah), dan panjang gelombang H-alpha (lapisan kromosfer atas), lihat gambar 12. Masing-masing teleskop dilengkapi detektor CCD dengan spesifikasi yang sama, yaitu *Imaging Source DMK41AU02.AS*, 1280x960 pixels @ 4,7 μm square). Pengujian teleskop visual dilakukan terhadap sensitivitas dalam panjang gelombang infra merah (Herdiwijaya 2015b). Penulis juga merancang Teleskop Surya sebagai *robotic telescope*, dan berhasil mengakses dan mengendalikan dari Kampus Ganesha, ITB.



Gambar 12 Teleskop Surya terdiri atas tiga teleskop Matahari mengambil citra secara simultan, yaitu teleskop Ca II (kiri), teleskop visual (tengah), dan teleskop H-alpha (kanan).

Pengamatan bintang matahari secara rutin di Observatorium Bosscha harus berbagi waktu sebagai Sekretaris Departemen Astronomi, FMIPA mulai tahun 1999. Amanah baru dalam proses manajemen menggantikan waktu untuk pengamatan. Saat itulah disadari bahwa tugas sebagai dosen adalah melakukan proses fusi dan keseimbangan dalam pelaksanaan tridarma perguruan tinggi. Pengembangan keilmuan fisika matahari dijabarkan melalui jalur perkuliahan dan peningkatan kualitas sumber daya manusia (dalam hal ini mahasiswa) dengan menyediakan topik-topik kajian atau penelitian untuk tahap Sarjana, Magister, dan Doktor. Di antara keterbatasan dana penelitian, maka pengembangan sistem pengamatan Matahari juga menyeimbangkan kebutuhan perkuliahan dan memenuhi keinginan publik dalam program pengabdian kepada masyarakat atau lebih tepat disebut kemanfaatan bagi masyarakat dan lingkungan. Proses keseimbangan Tridarma bukanlah seperti neraca di mana diam mengindikasikan kondisi setimbang dengan massa yang sama. Seperti halnya proses alami, pelaksanaan tridarma adalah proses yang dinamis, tidak terkotak-kotak, selalu cair bergerak, tumbuh, dan tidak pernah usai menuju keseimbangan. Demikian pula, keseimbangan gerak tridarma akan lebih mudah terjadi, jika melibatkan banyak komponen secara multidisiplin.

Perkuliahan Fisika Matahari (termasuk praktikum pengamatan Matahari) pertama kali masuk sebagai kuliah pilihan dalam Kurikulum Magister Astronomi, FMIPA-ITB tahun 2003. Tahun 2023 bertepatan dengan tonggak sejarah 100 tahun Observatorium Bosscha, juga menandakan perjalanan 20 tahun pengembangan perkuliahan Fisika Matahari di ITB. Selanjutnya dalam Kurikulum 2008 diperkenalkan mata kuliah pilihan tahap Magister Astronomi yang lain, yaitu Interaksi Matahari Bumi (*Solar-Terrestrial Interactions*) dan Fisika Plasma (*Plasma Physics*). Dalam periode kurikulum 2013, keduanya berganti menjadi nama mata kuliah Cuaca Antariksa (*Space Weather*) dan Astrofisika Plasma (*Plasma Astrophysics*). Pengenalan materi plasma menjadi dasar bagi pemahaman interaksi plasma dan medan magnet dalam perkuliahan Fisika Matahari dan Cuaca Antariksa. Kuliah Cuaca Antariksa menjadi mata kuliah pilihan tahap Sarjana dalam Kurikulum 2019, sedangkan mata kuliah Fisika Matahari berganti nama menjadi mata kuliah Heliofisika. Perubahan nama mata kuliah Interaksi Matahari Bumi menjadi Cuaca Antariksa, disebabkan perkembangan penggunaan istilah baku dalam jurnal internasional. Demikian pula, mahasiswa memerlukan wawasan terhadap

dampak aktivitas matahari dalam heliosfer yang diberikan dalam perkuliahan Heliofisika.

Heliosfer adalah lapisan atmosfer terluar Matahari, berupa lapisan materi plasma yang berasal dari Matahari, yang dikenal sebagai angin matahari. Heliosfer, analogi dengan bentuk magnetosfer Bumi, berfungsi sebagai tameng untuk menahan arus plasma antarbintang yang masuk ke dalam sistem tata surya. Heliosfer adalah wilayah yang mengelilingi Matahari dan tata surya yang dipenuhi dengan medan magnet matahari serta proton dan elektron dari angin matahari. Secara umum, medan magnet Matahari di heliosfer memiliki struktur dipol.

Heliosfer menandai batas pengaruh magnetik Matahari di lingkungan ruang antarbintang. Angin matahari yang mengalir keluar ke segala arah medan magnet Matahari. Plasma angin matahari akan mengisi ruang yang luas dan berinteraksi dengan semua objek di Tata Surya kita, termasuk planet-planet, batuan komet, asteroid, dll. Bentuk keseluruhan heliosfer menyerupai komet; berbentuk bulat mampat di satu sisi, dengan ekor panjang di seberangnya, yang dikenal sebagai *heliotail*. Heliosfer melindungi Tata Surya dari radiasi pengion kosmik dalam jumlah besar. Bentuk heliosfer ditentukan oleh tiga faktor, yaitu materi antarbintang (MAB), angin matahari, dan gerakan keseluruhan Matahari dan heliosfer saat melewati MAB.

Capaian teknologi manusia dalam eksplorasi antariksa menghasilkan tonggak-tonggak peradaban manusia di wilayah antariksa yang merupakan wilayah kebebasan, tanpa batas negara dan hanya dibatasi oleh capaian keilmuan dan teknologi manusia. Heliosfer menjadi *milestone* sains dan teknologi antariksa. Satelit Voyager 1 dan Voyager 2 yang diluncurkan tahun 1977, sudah melampaui batas interaksi plasma dalam Tata Surya atau heliopause dan sekarang sudah berada di ruang antarbintang. Satelit Voyager 1 sudah berada di ruang antar bintang dan menembus batas heliosfer pada tanggal 25 Agustus 2012 dengan jarak 122 sa (satuan astronomi adalah jarak rata-rata Bumi dan Matahari ~ 150 juta kilometer). Sedangkan satelit Voyager 2 menyusul berada di ruang antarbintang pada tanggal 5 November 2018. Di akhir tahun 2023 atau setelah perjalanan 46 tahun, satelit Voyager 1 sudah berada dalam jarak 162,9 sa dan satelit Voyager 2 berjarak 136,1 sa. Tentunya perjalanan menuju bintang terdekat masih memerlukan waktu ribuan tahun dengan teknologi satelit Voyager yang masih menggunakan teknologi era

Apollo. Tantangan bagi sains dan teknologi antariksa untuk mencapai bintang terdekat dengan lebih cepat. Era Indonesia emas harus membuka kesempatan untuk mempersiapkan generasi muda Indonesia memasuki gerbang keilmuan dan teknologi dalam pemanfaatan dan eksplorasi antariksa secara sistematis.

Dalam proses peningkatan kapasitas sumber daya keantariksaan secara akademik, sampai bulan Januari 2024, Penulis telah meluluskan 58 mahasiswa tahap Sarjana, 25 mahasiswa tahap Magister, dan 3 mahasiswa tahap Doktor di Program Studi Astronomi, FMIPA, ITB. Dalam memenuhi kebebasan akademik, Penulis juga membimbing atau meluluskan beberapa mahasiswa lainnya dalam tahap Sarjana di perguruan di Universitas Pendidikan Indonesia, dan lima lulusan tahap Doktor di Universitas Pendidikan Indonesia dan Universitas Islam Negeri Walisongo, Semarang.

4.2 Cuaca dan Iklim Antariksa

Angin matahari adalah aliran partikel bermuatan atau plasma dengan berbagai tingkatan energi dan temperatur yang dilepaskan dari atmosfer bagian atas Matahari, yang disebut korona. Plasma ini sebagian besar terdiri atas elektron, proton, dan partikel alfa dengan energi kinetik antara 0,5 dan 10 keV. Komposisi plasma angin matahari juga mencakup campuran elemen yang ditemukan dalam plasma matahari: sejumlah kecil ion berat dan inti atom elemen seperti C, N, O, Ne, Mg, Si, S, dan Fe.

Angin matahari bervariasi dalam hal kepadatan, temperatur, dan kecepatan dari waktu ke waktu, serta fungsi lintang dan bujur matahari. Partikel-partikelnya dapat lepas dari gravitasi Matahari, karena mengalir bersama medan magnet dengan energi dan temperatur yang tinggi. Proses rekoneksi magnet (*magnetic reconnection*) ukuran kecil menghasilkan fenomena *switchback*, sehingga memberikan tambahan energi dan kecepatan angin matahari. Proses *switchback* telah dideteksi oleh satelit *Solar Parker Probe* pada jarak 6-35 radius Matahari (Zank et al., 2020). Batas teoritik yang memisahkan korona dari angin matahari disebut permukaan Alfvén. Pada jarak lebih dari beberapa radius matahari dari Matahari, angin matahari mencapai kecepatan 250-750 km/detik dan bersifat supersonik, yang berarti bergerak lebih cepat daripada kecepatan gelombang magnetosonik. Saat kondisi cuaca Antariksa ekstrem, kecepatan angin matahari dapat mencapai

1850 km/detik (Skoug et al., 2004). Proses rekoneksi magnet skala kecil sebagai penyebab pemanasan lapisan korona, dan diduga terjadi di ruang antarplanet untuk mengisi dan menjaga kerapatan plasma dalam lapisan pelindung heliosfer.

Angin matahari memiliki efek yang signifikan terhadap Bumi dan benda-benda lain di Tata Surya. Angin ini berinteraksi dengan magnetosfer Bumi, menyebabkan fenomena seperti aurora. Angin ini juga memengaruhi ekor komet, membuatnya selalu mengarah menjauhi Matahari. Angin matahari dapat menyebabkan gelombang kejut dan menjelma menjadi badai geomagnetik yang dapat mengganggu jaringan listrik, navigasi dan komunikasi satelit. Aktivitas Matahari yang kontinu dan periodik, berupa aliran angin matahari atau aliran plasma, medan magnet matahari, dan gelombang yang dipicu dinamika plasma dan medan magnet akan berinteraksi dengan semua objek-objek langit. Dinamika lingkungan antariksa di dalam tata surya atau heliosfer juga berdampak terhadap manusia dan semua teknologi antariksa ataupun teknologi berbasis gelombang elektromagnet. Dinamika lingkungan antariksa akibat aktivitas Matahari disebut cuaca antariksa (*space weather*) dan iklim antariksa (*space climate*).

Cuaca dan iklim antariksa mengacu pada kondisi dinamis di lingkungan luar angkasa Bumi dalam skala waktu jangka pendek (orde detik sampai minggu) sampai dan jangka panjang (orde puluhan sampai ribuan tahun). Cuaca antariksa mencakup gangguan magnetosfer, ionosfer, dan termosfer Bumi atau medan magnet planet. Cuaca antariksa digerakkan oleh energi dan materi yang diangkut dari Matahari melalui angin matahari.

Cuaca antariksa adalah cabang dari fisika antariksa yang berhubungan dengan kondisi angin matahari yang bervariasi dari waktu ke waktu di heliosfer. Matahari, yang berjarak sekitar 150 juta kilometer dari Bumi, secara konstan memancarkan aliran partikel bermuatan yang dikenal sebagai angin matahari. Partikel-partikel ini membawa serta medan magnet Matahari. Cuaca antariksa adalah bidang yang berkembang kompleks dengan potensi implikasi signifikan bagi keseharian masyarakat kita yang sangat bergantung pada teknologi berbasis antariksa. Seiring dengan meningkatnya ketergantungan kita pada teknologi tersebut, keilmuan fisika matahari berperan dalam pemantauan rutin dan prediksi aktivitas matahari. Secara bersamaan, pemahaman fisis cuaca antariksa dan dampaknya terhadap Bumi,

khususnya dampak nyata terhadap sistem dan infrastruktur teknologi, tidak hanya merupakan kebutuhan ilmiah, tapi juga kebutuhan masyarakat dan pertahanan.

Sumber cuaca antariksa ekstrem yang berasal dari ledakan Matahari (*solar flare*), Lontaran Massa Korona (*Coronal Mass Ejection- CME*) ataupun lubang korona (*coronal hole*) menghasilkan aliran partikel matahari berkecepatan tinggi atau gelombang kejut dengan kerapatan massa plasma yang besar (sering disebut tsunami antariksa). Gelombang kejut akan merambat keluar dari Matahari menuju ruang antarplanet, dan salah satunya ke Bumi. Hadirnya gelombang kejut di magnetosfer Bumi menyebabkan badai atau gangguan geomagnet (*geomagnetic storm*) yang kuat (Herdiwijaya & Kurniasari, 2008; Herdiwijaya & Hermawan, 2009; Herdiwijaya, 2010a; Herdiwijaya, 2012; Trihermanto & Herdiwijaya, 2012; Rachman & Herdiwijaya, 2014; Herdiwijaya, 2015a; Herdiwijaya, 2019b; 2019c; Sulistiani & Herdiwijaya, 2019; Astuti & Herdiwijaya, 2020; Khamdani & Herdiwijaya, 2020; Fadiyah & Herdiwijaya, 2022;).

Cuaca antariksa dapat memberikan efek yang signifikan pada sistem teknologi modern. Efek ini dapat berkisar dari anomali kecil hingga kegagalan total sistem pada perangkat atau infrastruktur elektronik teknologi antariksa yang kita andalkan untuk aktivitas sehari-hari, termasuk ketahanan militer, di antaranya.

1. Sistem satelit: Cuaca antariksa dapat menyebabkan kerusakan fisik pada satelit, mengganggu peralatan elektronik di dalamnya, dan menurunkan sinyal yang dikirim dan diterima. Hal ini dapat mengganggu layanan sistem navigasi, komunikasi GPS, telekomunikasi berbasis satelit, dan televisi satelit.
2. Sistem tenaga listrik: Badai geomagnetik yang disebabkan oleh cuaca antariksa dapat mengganggu transmisi daya listrik dan menghasilkan lonjakan tegangan pada saluran listrik, yang dapat menyebabkan pemadaman, terutama negara-negara yang berada di lintang tinggi.
3. Penerbangan: Komunikasi radio frekuensi tinggi (HF) yang digunakan oleh maskapai penerbangan dapat terganggu oleh cuaca antariksa, sehingga memengaruhi rute, jadwal penerbangan, dan keselamatan penumpang, terutama penerbangan yang melewati daerah di lintang tinggi.

4. Perjalanan antariksa manusia: Antariksawan di luar angkasa terpapar pada peningkatan tingkat radiasi selama periode aktivitas matahari yang tinggi, yang dapat menimbulkan risiko kesehatan yang serius, misalkan kanker, bahkan kerusakan DNA.

Pemantauan dan prediksi cuaca antariksa sangat penting untuk mengurangi dampaknya. Pemodelan magnetohidrodinamika bertujuan untuk menyimulasikan aktivitas Matahari dan dampaknya terhadap lingkungan antariksa Bumi. Model-model ini dapat memberikan prakiraan kondisi angin matahari, aktivitas geomagnetik, dan tingkat radiasi. Prakiraan cuaca antariksa mirip dengan prakiraan cuaca meteorologi di Bumi, karena melibatkan pengamatan, prediksi, dan peringatan dini akan kondisi yang dapat memengaruhi manusia dan kesehariannya. Badan-badan antariksa di seluruh dunia memantau aktivitas Matahari dan lingkungan antariksa melalui berbagai observatorium surya dan satelit monitoring antariksa selama 24 jam.

Gangguan cuaca antariksa terhadap satelit dapat mengakibatkan kegagalan total atau memengaruhi kinerja satelit, sehingga memperpendek masa hidup. Salah satu kajian terkait hal ini adalah mengidentifikasi sebab anomali satelit akibat dinamika lingkungan antariksa (Herdiwijaya & Rachman, 2014; Ahmad et al., 2020; Pratiwi & Herdiwijaya, 2022)

Iklim antariksa adalah konsep yang lebih luas secara multidisiplin daripada cuaca antariksa. Iklim antariksa mengacu pada variasi jangka panjang dalam aktivitas matahari di dalam heliosfer, termasuk angin matahari, medan magnet antarplanet (*interplanetary magnetic field*), dan efeknya di lingkungan dekat Bumi. Hal ini mencakup magnetosfer Bumi dan ionosfer, atmosfer atas dan bawah, iklim, dan sistem dan komposisi atmosfer terkait lainnya. Banyak studi menghubungkan pengaruh iklim antariksa atau aktivitas Matahari jangka panjang dengan iklim bumi masa lampau (*paleoclimate*), atau sebaliknya. Penelitian iklim antariksa memiliki dua tujuan utama:

1. Memahami hubungan fisik antara Matahari, heliosfer, dan berbagai proksi terkait (medan geomagnet, sinar kosmik, dll.).
2. Memahami efek jangka panjang dari variabilitas matahari jangka panjang terhadap lingkungan dekat Bumi, termasuk lapisan atmosfer yang berbeda terkait iklim global Bumi, sampai interior Bumi, terkait kegempaan dan aktivitas vulkanik.

Salah satu komponen yang diperhitungkan dalam perubahan iklim global adalah radiasi matahari (*radiative forcing*). Menurut *The Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), peran alami *solar radiative forcing* berupa variabilitas irradiansi matahari berkontribusi jauh lebih kecil ($\sim 0,1 \text{ W/m}^2$) dibandingkan peran aktivitas manusia ($\sim 3 \text{ W/m}^2$). Siklus aktivitas bintik matahari dengan periode rata-rata 11 tahun berkorelasi kuat dengan variabilitas irradiansi matahari. Perubahan iklim jangka panjang tetap menunjukkan pengaruh aktivitas matahari, dalam hal ini siklus bintik matahari (Herdiwijaya et al., 2002; Kunjaya et al., 2001; 2003; Radiman et al., 2003). Irama nafas Matahari periode 11 tahun banyak didapatkan dalam proksi parameter iklim di permukaan Bumi, bahkan tutupan es di planet Mars. Mekanisme fisis masih terbuka untuk penelitian lebih mendalam. Energi matahari tidak hanya irradiansi matahari, tetapi juga plasma energi tinggi, medan magnet dan gelombang MHD, yang semuanya belum diperhitungkan dalam pemodelan.

Studi ilmiah tentang iklim antariksa adalah bidang interdisipliner fisika matahari, heliofisika, geologi, geofisika, dll.. Secara konseptual, setiap elemen dalam sistem Tata Surya akan saling berinteraksi. Jalur-jalur fisis interaksi dan keterhubungan banyak sistem dalam Tata Surya adalah melalui gravitasi, medan magnet, plasma, wujud gelombang (elektromagnetik, magnetohidrodinamik, plasma, dll.), ataupun fenomena nonlinier lainnya. Problem fundamental dalam astrofisika dan keilmuan Fisika Matahari adalah kurangnya pengetahuan evolusi aktivitas Matahari terkait dengan proses pembentukan kemagnetan, partikel neutrino di interior Matahari.

4.3 Sinar Kosmik

Penulis mencoba menggali pengetahuan awal dan membentuk kerangka pemahaman fisis terkait kedua tujuan di atas. Langkah awal, Penulis mempelajari korelasi antara sinar kosmik matahari dengan tutupan awan di atas kepulauan Indonesia dengan membagi menjadi 9 wilayah yang dapat direpresentasikan menjadi sebagian besar lautan dan sebagian besar daratan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa wilayah Indonesia bagian timur dan sebagian besar wilayah lautan memiliki korelasi yang lebih tinggi dengan sinar kosmik matahari. Model ini menunjukkan bahwa efek sinar kosmik dapat menyebabkan pemanasan yang memicu pembentukan awan

(Herdiwijaya & Baskoro, 2006; Baskoro et al., 2010). Konsep keterkaitan sinar kosmik dan pembentukan awan, sebagai proses yang penting, tidak hanya di Bumi, tetapi juga dalam studi eksoplanet. Studi ini menjadi problema yang kompleks karena mengaitkan proses MHD di dalam kimia atmosfer.

Pengaruh aktivitas matahari terhadap variasi sinar kosmik dipelajari lebih jauh berdasarkan data selama lebih dari 40 tahun. Berbagai data sinar kosmik dari berbagai stasiun (6 stasiun pengamat sinar kosmik) dengan lokasi dalam lintang yang berbeda dipergunakan dalam penelitian ini. Demikian pula, 11 parameter aktivitas matahari diurutkan secara statistik dengan metode statistik *Partial Least Square* dan *Principal Component Analysis* untuk memprediksi variasi sinar kosmik (Putri & Herdiwijaya, 2021; Putri et al., 2023; 2024). Pemodelan berdasarkan enam parameter yang paling optimal terhadap sinar kosmik menghasilkan perbedaan kurang dari 3% yang ditunjukkan dalam Gambar 13. Dengan kata lain, ketiga lokasi dengan posisi lintang tinggi mempunyai 6 parameter yang sama. Variasi sinar kosmik untuk ketiga lokasi disebabkan oleh mekanisme fisis yang sama. Hasil penelitian ini akan memberikan arti penting dalam pemahaman kaitan antara aktivitas matahari dan propagasi plasma dalam medan magneti di ruang antarplanet terhadap propagasi sinar kosmik.

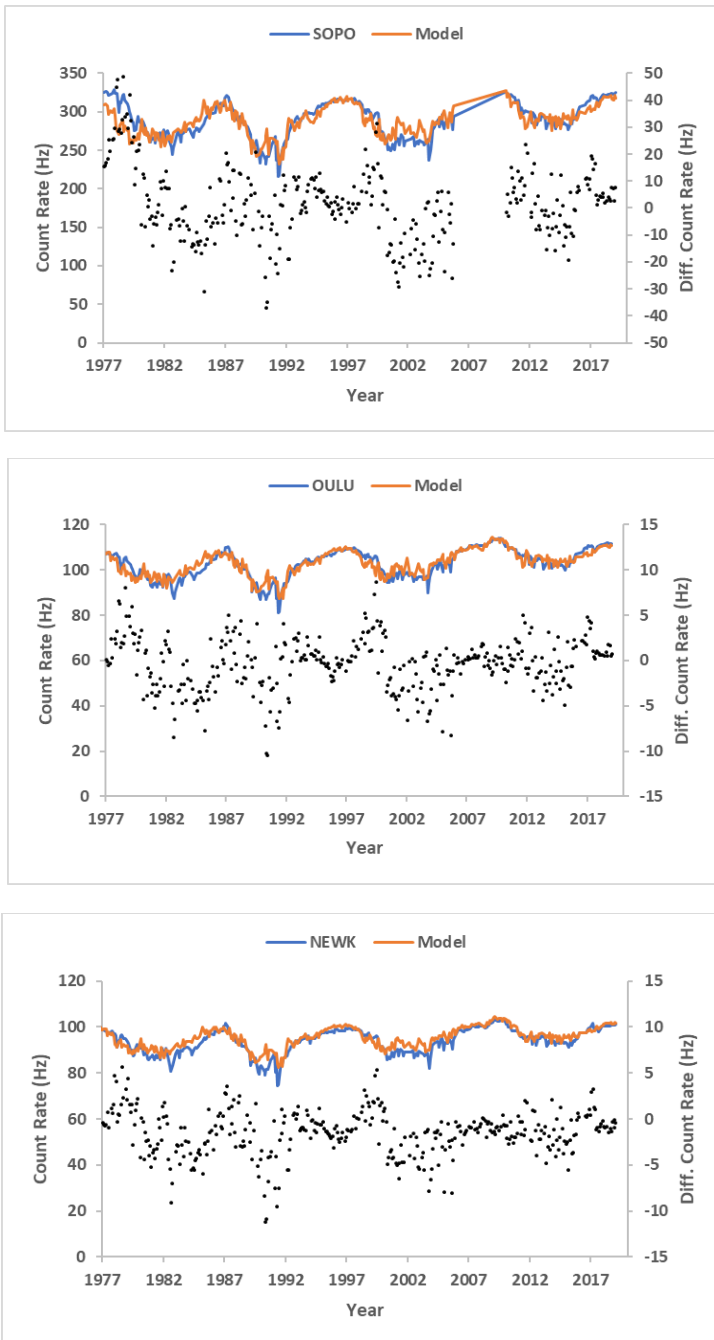
Stasiun sinar kosmik yang berada dalam lintang rendah mempunyai parameter fisis dari angin matahari yang berbeda dengan stasiun lintang tinggi. Perbedaan ini mengindikasikan proses fisis yang berbeda. Salah satu parameter yang berlaku untuk stasiun di lintang rendah adalah sudut datang medan magnet angin matahari, yang dinyatakan dalam parameter *clock angle* dan *cone angle*. Sudut datang ini berimplikasi terhadap efisiensi sinar kosmik menembus lapisan magnetosfer. Perilaku cermin magnetik (*magnetic mirror*) dapat menyebabkan perbedaan perilaku sinar kosmik terhadap lintang. Efek cermin magnetik terjadi ketika partikel bermuatan terperangkap dalam medan magnet Bumi dan memantul bolak-balik di antara wilayah medan magnet yang lebih kuat di dekat kutub dan ekuator.

Fenomena cermin magnetik merupakan proses fisis yang menjadi kunci untuk memahami bagaimana magnetosfer Bumi berinteraksi dengan partikel bermuatan dari angin matahari dan sinar kosmik, sekaligus fenomena penting dalam studi fisika plasma antariksa (*space plasma physics*). Interaksi MHD menyebabkan struktur lapisan magnetosfer yang selalu berubah.

Konsep cermin magnetik juga dipakai dalam reaktor fusi sebagai sangkar magnetik (*magnetic confinement*) untuk membungkus temperatur yang sangat tinggi. Proyek konsorsium internasional reaktor fusi (ITER) yang mengadopsi reaksi inti Matahari atau bintang segera beroperasi pada tahun 2025. Energi bersih reaktor fusi, karena berbahan bakar Hidrogen, akan menggantikan energi hidrokarbon penyebab utama pemanasan global.

Di magnetosfer yang merentang antara 6 sampai 10 radius Bumi (di sisi siang), partikel bermuatan berputar spiral sepanjang garis medan magnet Bumi. Ketika berada di kutub magnetik, plasma bertemu daerah dengan kuat medan magnet tinggi dengan garis medan yang menyatu. Sudut datang (*pitch angle*) sebuah partikel, yaitu sudut antara vektor kecepatan partikel tegak lurus medan magnet lokal, memainkan peran penting dalam proses ini.

Fenomena alami efek cermin magnetik adalah pembentukan sabuk radiasi Van Allen yang merupakan wilayah partikel bermuatan listrik terperangkap dengan radiasi intens yang mengelilingi Bumi. Sabuk Van Allen ditemukan oleh fisikawan Amerika Serikat James Van Allen pada tahun 1958 melalui satelit Explorer 1 dan Explorer 3. Sabuk radiasi ini menjadi bagian penting dari dinamika magnetosfer Bumi dan memiliki implikasi yang signifikan bagi perjalanan antariksa ke luar angkasa dan teknologi satelit. Struktur umum sabuk radiasi Van Allen terdiri atas sabuk dalam (*inner belt*) sampai dengan ketinggian sekitar 3000 km. Komposisi sabuk dalam terdiri atas sebagian besar proton energi tinggi (~30-100 MeV) dan elektron (~keV) yang berasal dari angin matahari dan lapisan ionosfer. Sabuk luar (*outer belt*) merentang dari 15000 km sampai 38000 km (~6 radius Bumi). Komposisi sabuk luar sebagian besar elektron energi tinggi (0,1 – 10 MeV) dari angin matahari. Struktur sabuk radiasi bergantung kepada siklus aktivitas matahari.



Gambar 13 Variasi sinar kosmik untuk 3 stasiun, yaitu *South Pole* - SOPO (lintang 90° S), OULU (65° U), dan Newark – NEWK (39° U) dan perbedaan dengan model (Putri et al. 2024).

4.4 Kaitan Aktivitas Matahari dengan Gempa Bumi dan Letusan Gunung Berapi

Hubungan antara aktivitas matahari dengan fenomena sesimik (gempa bumi) dan vulkanik (letusan gunung berapi) merupakan topik penelitian dan perdebatan yang sedang berlangsung. Gempa bumi dapat disebabkan oleh faktor gaya pasang-surut (gaya tidal) Bulan. Faktor penyebab aktivitas matahari bukanlah sebab gaya gravitasi, tetapi efek induksi kemagnetan dan kelistrikan yang bersumber dari Matahari. Aktivitas matahari menginjeksi medan magnet, kelistrikan, massa plasma, dan gelombang Alfen ke ruang antarplanet, sehingga menyebabkan arus listrik sporadis yang diinduksi di sepanjang patahan permukaan, memanaskan dan mengurangi resistivitasnya terhadap pergeseran, atau menginduksi arus yang mengarah pada tegangan piezoelektrik dari patahan di permukaan. Studi korelasi ini berguna untuk memberikan pemahaman pola-pola umum yang sederhana terhadap kompleksitas fenomena-fenomena alam yang saling terkait. Mekanisme fisis hubungan sebab-akibat belumlah diketahui, dan penelitian lebih lanjut diperlukan untuk sepenuhnya memahami interaksi kompleks antara aktivitas matahari dan interior Bumi, khususnya peristiwa seismik dan vulkanik. Pengaruh potensial dari superposisi sebab siklus aktivitas matahari dan gravitasi Bulan terhadap waktu kejadian gempa bumi skala yang kuat masih terbuka menjadi bahan penyelidikan ilmiah.

Beberapa penelitian telah menemukan korelasi antara aktivitas matahari dan gempa bumi besar di seluruh dunia. Sebagai contoh, sebuah studi yang menganalisis data kepadatan dan kecepatan proton selama 20 tahun yang direkam oleh satelit *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO), dengan kegunaan di seluruh dunia pada periode yang sesuai, menemukan korelasi yang jelas antara kepadatan proton dan terjadinya gempa bumi besar ($M > 5,6$), dengan pergeseran waktu satu hari.

Beberapa penelitian telah menemukan korelasi antara aktivitas matahari dan letusan gunung berapi. Sebagai contoh, sebuah studi yang menganalisis data dari *Smithsonian Institute Global Volcanism Program* (GVP) menemukan siklus yang signifikan secara statistik yaitu 10-11, 19-25, ~60, dan 200-250 tahun pada letusan gunung berapi yang terjadi dari tahun 1551 hingga 2020. Penelitian lain membandingkan frekuensi letusan gunung berapi dalam 270 tahun terakhir dengan variasi aktivitas matahari dan menemukan bahwa

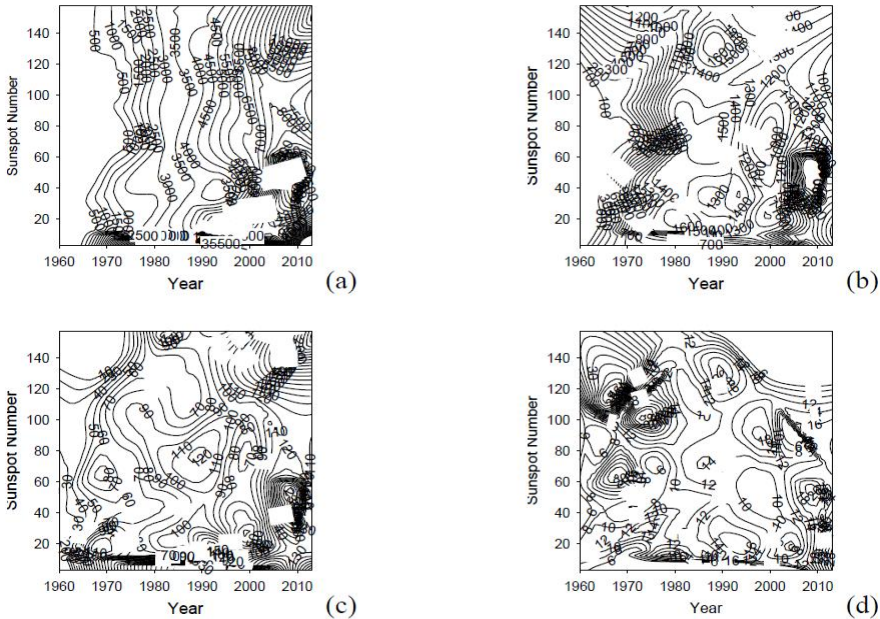
periode 22 tahun lebih jelas daripada 11 tahun. Beberapa penelitian telah menemukan korelasi antara aktivitas matahari dan peristiwa seismik atau vulkanik, sementara penelitian lainnya tidak.

Penulis melakukan studi korelasi berdasarkan gabungan data bintik matahari dan gempa bumi (*US Geological Survey*) selama 53 tahun, yaitu dari tahun 1960 sampai 2013 atau selama 4 siklus matahari (Herdiwijaya et al., 2015). Data yang diperoleh sebanyak 302.868 gempa dengan informasi kedalaman (km) untuk skala magnitudo 4.0 sampai 9.9. Berdasarkan studi tersebut diperoleh bahwa kejadian gempa bukanlah kejadian acak (lihat gambar 14). Kecenderungan gempa bumi skala besar (magnitudo 4 sampai 6) terjadi saat fase minimum dalam siklus matahari. Namun gempa bumi magnitudo 7 lebih banyak terjadi saat siklus matahari fase maksimum atau saat jumlah bintik matahari besar. Persentase yang kecil dari frekuensi kejadian gempa bumi skala kuat karena jumlah bintik matahari yang besar ataupun luas area bintik matahari yang besar (atau saat fase maksimum siklus matahari) menunjukkan bahwa tekanan radiasi atau iradiasi matahari tidak secara signifikan memicu fenomena gempa bumi. Sebaliknya, saat fase minimum siklus matahari, fluks sinar kosmik mencapai fase maksimum. Partikel-partikel energetik yaitu sinar kosmik, proton dan elektron energetik matahari yang akan berinteraksi dengan magnetosfer, ionosfer, dan berujung memicu variabilitas konduktivitas dan resistivitas permukaan bumi, sehingga berpotensi memicu aktivitas seismik dan gempa bumi. Fase minimum siklus matahari dengan durasi panjang, yaitu sekitar tahun 2008, memicu kejadian gempa bumi dengan kedalaman yang dangkal untuk tahun-tahun berikutnya.

Penulis mengusulkan istilah SMILe singkatan dari Solar-Magnetosfer-Ionosfer-Litosfer untuk studi lebih lanjut secara multidisiplin menyangkut sirkuit arus global dan anomali kemagnetan Bumi.

Penulis juga melakukan studi kaitan aktivitas matahari dengan keaktifan gunung berapi digunakan *Volcano Explosive Index* (VEI) yang berasal dari *Smithsonian Institute Global Volcanism Program* (GVP) untuk tahun 1900 sampai 2013 atau selama 113 tahun (Herdiwijaya et al., 2014). Periode ini mencerminkan periode Gleisberg dengan aktivitas matahari yang aktif atau periode pemanasan global alami. Penulis juga membandingkan periode aktivitas matahari yang rendah atau periode pendinginan global alami.

Sering kali disebut periode minimum Maunder, yaitu tahun 1615 sampai 1751, selama 136 tahun. Hasil yang diperoleh memperkuat pola aktivitas seismik, yaitu siklus matahari fase minimum menunjukkan frekuensi kejadian aktivitas vulkanik yang lebih tinggi dibandingkan fase maksimum selama periode pemanasan.



Gambar 14 Distribusi kejadian gempa terhadap jumlah bintang matahari untuk skala magnitudo 4 (a), 5 (b), 6 (c), dan 7 (d) menurut Herdiwijaya et al. (2014).

Namun, penting untuk dicatat bahwa meskipun hasil-hasil penelitian ini menunjukkan adanya potensi korelasi yang bergantung terhadap siklus aktivitas matahari, sifat dan mekanisme fisis hubungan antara aktivitas matahari terhadap gempa bumi atau letusan gunung berapi, masih belum sepenuhnya dipahami. Seperti telah disebutkan di atas, pengaruh komponen aktivitas matahari, yaitu gaya medan magnet/listrik, plasma, dan gelombang Alfen yang berinteraksi atau bersuperposisi dengan gaya pasang-surut Bulan terhadap interior atau kemagnetan Bumi masih menjadi subjek penelitian yang sedang berlangsung.

4.5 Kaitan Aktivitas Matahari dengan Kecerahan Langit Malam

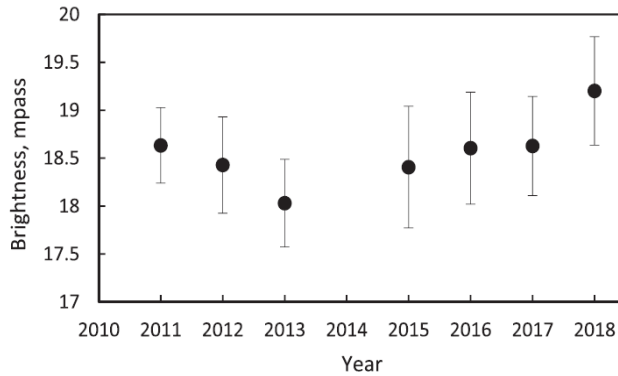
Kecerahan langit malam dipengaruhi oleh pencahayaan alami (cahaya Bulan, cahaya Zodiak, galaksi Bima Sakti, emisi di atmosfer, dll.), pencahayaan

buatan (polusi cahaya), kondisi atmosfer, dan kondisi meteorologi. Aktivitas matahari memang dapat memengaruhi kecerahan langit malam, akan tetapi proses fisis yang terjadi belumlah diketahui pasti. Pertanyaan sederhana yang tumbuh dan memicu keingintahuan, yaitu apakah kecerahan langit malam juga dipengaruhi siklus aktivitas matahari? Untuk menjawab pertanyaan sederhana tersebut Penulis melakukan pengukuran kecerahan langit malam di Observatorium Bosscha selama 8 tahun untuk membuktikan variasinya terhadap siklus matahari ke-24, yaitu mulai tahun 2011 sampai 2018. Rentang waktu tersebut mewakili siklus matahari fase maksimum pada tahun 2014 dan fase minimum tahun 2018. Fotometer portabel yang sudah terkalibrasi dipergunakan untuk mengkuantisasi perubahan kecerahan langit malam pada arah zenith mulai matahari terbenam sampai matahari terbit dengan interval waktu setiap data selama 5 detik. Banyak kendala teknis yang harus dipecahkan selama pengamatan atau monitoring jangka panjang. Pengamatan sistematis dengan fotometer berbiaya rendah merekam variasi kecerahan langit malam periode pendek (dalam urutan puluhan menit, atau jam), variasi diurnal, musim, atau siklus aktivitas matahari (Herdiwijaya, 2019a; Herdiwijaya et al., 2020).

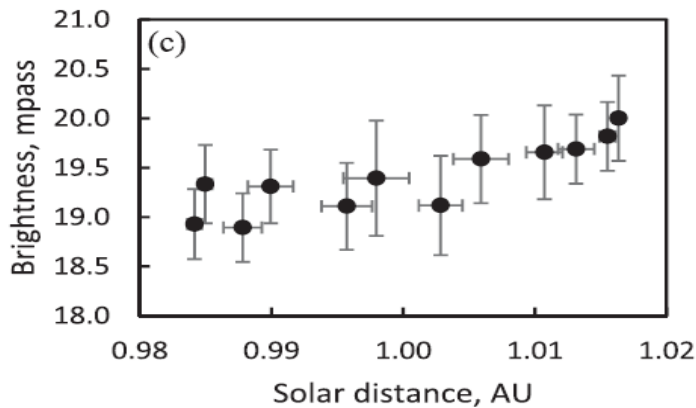
Gambar 15 membuktikan bahwa langit malam lebih gelap saat fase minimum dibandingkan dengan fase maksimum. Perbedaan kecerahannya sekitar 6 kali lebih gelap. Selama maksimum matahari, ketika aktivitas Matahari meningkat dan bintik matahari muncul di permukaannya, pancaran radiasi dalam panjang gelombang ultraviolet pun meningkat, yang memengaruhi tingkat emisi atmosfer Bumi bagian atas, sehingga menyebabkan peningkatan kecerahan langit malam. Hal yang sama ketika kecerahan langit malam semakin gelap saat jarak Bumi dan Matahari menjauh (gambar 16). Radiasi dalam panjang gelombang ultraviolet lebih banyak dibiaskan dan diserap dalam lapisan atmosfer atas. Dengan kata lain sumber variasi kecerahan langit malam dapat berasal dari lapisan atas atmosfer. Hasil ini mengindikasikan kompleksitas dari sumber dari kecerahan langit malam, yang berasal dari berbagai lapisan atmosfer Bumi.

Penulis juga mengukur kecerahan langit malam di beberapa lokasi untuk membandingkan pengamatan di Observatorium Bosscha, yaitu di Kampus Ganesha ITB, Cimahi, Yogyakarta, dan Kupang. Pengamatan di Yogyakarta dilakukan selama dua tahun. Dampak penelitian kecerahan langit malam ini adalah diketahuinya kualitas langit malam atau tingkat polusi cahaya yang

berbeda-beda, di mana langit Kupang atau di sekitar lokasi Observatorium Nasional Timau, merupakan langit yang tergelap. Dampak sumber cahaya buatan pada kecerahan langit atau polusi cahaya di lokasi Observatorium atau di tempat lain berbanding lurus dengan pancaran atau fluks cahaya sumber cahaya yang membentuk kubah cahaya. Polusi cahaya disebabkan hamburan cahaya oleh molekul, partikel atau proses kimia di atmosfer. Dengan demikian, polusi cahaya berkorelasi dengan tingkat polusi udara.



Gambar 15 Kecerahan langit malam sebagai fungsi siklus matahari. Fase maksimum terjadi tahun 2014, dan fase minimum tahun 2018 (Herdiwijaya et al., 2020).

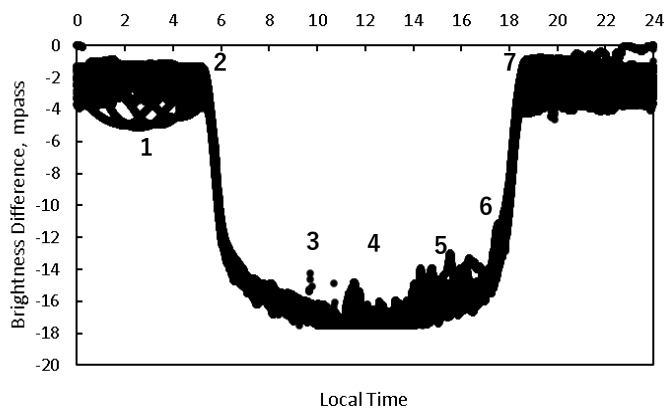


Gambar 16 Kecerahan langit malam sebagai fungsi jarak Bumi dan Matahari (Herdiwijaya et al. 2020).

5. KEMANFAATAN BAGI MASYARAKAT DAN LINGKUNGAN

Kemanfaatan aktivitas matahari dan cuaca antariksa menysasar kepada komunitas dan pengambil kebijakan terkait teknologi antariksa. Pengukuran kecerahan langit jangka panjang menggunakan fotometer terkalibrasi yang relatif murah dapat memberikan wawasan dan memicu tumbuhnya keilmuan masyarakat lebih luas. Tujuan awal penelitian dengan menggunakan fotometer dalam jangka waktu panjang untuk mengonfirmasi pengaruh aktivitas matahari (gambar 15). Manfaat lain yang dapat diperoleh adalah mengetahui secara lengkap dan kuantitatif dari polusi cahaya. Kemudian, data kecerahan langit dapat memberikan informasi secara kuantitatif waktu-waktu ibadah salat, sebagai ibadah yang mulia bagi umat Islam. Studi tentang waktu salat telah dilakukan secara masif dari berbagai sudut keilmuan. Tetapi kuantisasi waktu-waktu salat berdasarkan data pengamatan masih sangat penting untuk membuka hikmah dan kemanfaatannya.

Kecerahan langit dalam sehari penuh dapat diperoleh dengan alat fotometer dapat dilihat dalam gambar 17 dengan indikator waktu-waktu salat. Meskipun terlihat sederhana, banyak faktor-faktor memengaruhinya penentuan waktu salat, di antaranya, faktor-faktor alami meteorologi, transparansi atmosfer, cahaya Bulan, jarak Matahari, bahkan faktor-faktor aktivitas manusia, misalkan polusi cahaya dan polusi udara.



Gambar 17 Kecerahan langit relatif dalam sehari untuk 22 hari bulan Juli 2021 di Cimahi. Angka menunjukkan perkiraan waktu salat malam (1), Subuh (2), Dhuha (3), Dhuhur (4), Ashr (5), Maghrib (6) dan Isya (7).

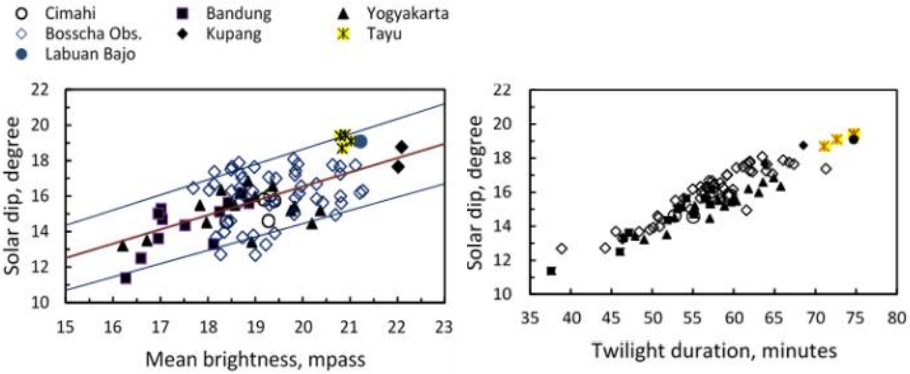
Pengaruh cahaya Bulan cukup besar menyebabkan kecerahan langit malam lebih terang sebesar 5 magnitudo atau sekitar 100 kali lebih terang. Cahaya Bulan akan memengaruhi waktu awal salat Subuh (titik 2) dan salat Isya (titik 7). Demikian pula, keberadaan awan ataupun polusi cahaya akan berdampak dalam penentuan titik 2 dan 7. Kemudian, langit menjadi terang dengan sangat cepat sampai Matahari terbit dengan perubahan mencapai 11 magnitudo atau 23000 kali lebih terang. Nilai tersebut kurang lebih sama untuk perubahan kecerahan langit setelah salat Maghrib. Perubahan kecerahan langit setelah Matahari terbit sampai salat Dhuhur sekitar 5 magnitudo atau 100 kali lebih terang, dan perubahan yang sama sampai Matahari terbenam. Perbedaan kecerahan langit siang dan malam sekitar 16 magnitudo atau 2 juta kali lebih terang.

Data kecerahan langit malam yang Penulis kumpulkan mempunyai nilai kemanfaatan lain bagi masyarakat, yaitu untuk mengkaji ulang waktu salat Subuh. Pemerintah Indonesia menggunakan acuan sudut elevasi (*solar dip*) sebesar -20 derajat, atau sudut posisi relatif Matahari di bawah cakrawala, di mana cahaya Matahari mulai dibiaskan oleh atmosfer Bumi. Secara historik sudut kedalaman atau elevasi matahari yang dipakai oleh Pemerintah dan negara-negara Islam belum dikaji ulang dengan instrumentasi lebih terkini, yaitu fotometer yang sudah terkalibrasi (Herdiwijaya, 2014; Herdiwijaya, 2020).

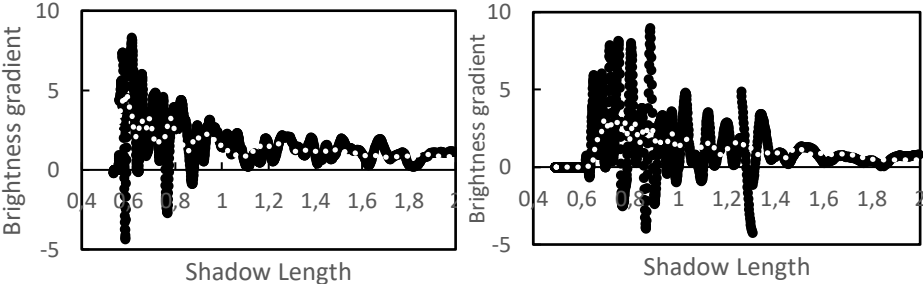
Berdasarkan data kecerahan langit malam di Observatorium Bosscha juga diperoleh waktu tergelap terjadi pada jam 2:32 pagi dengan kesalahan ± 13 menit (Herdiwijaya et al., 2020). Penulis mengasumsikan sebagai acuan waktu salat malam (titik 1 dalam gambar 16). Hormon melatonin, sebagai pengatur jam tubuh dan terkait dengan detak jantung, bekerja secara maksimal saat kegelapan alami. Gangguan terhadap hormon ini dapat mengganggu ritme jam tubuh dan berdampak kepada kesehatan secara meluas.

Penulis mengkuantisasi acuan sudut elevasi matahari untuk awal salat Subuh, berdasarkan data pengamatan yang panjang di Observatorium Bosscha dan beberapa lokasi lainnya. Sudut tersebut bergantung tingkat polusi cahaya. Semakin rendah tingkat polusi cahaya atau semakin gelap kecerahan langit malam, maka semakin dalam sudut elevasi Matahari di bawah cakrawala, dan semakin lama durasi waktu fajar (sebelum matahari terbit). Dalam Gambar 18 (kiri), garis di tengah adalah relasi linier, sedangkan

garis di atas dan di bawahnya merupakan rentang kesalahan. Jumlah data yang Penulis tambahkan, tidak mengurangi kesimpulan di atas. Dalam Gambar 16 (kanan), durasi waktu salat Subuh maksimal 75 menit sebelum Matahari terbit. Sudut elevasi yang dipergunakan sebagai acuan Pemerintah Indonesia, yaitu -20 derajat hanya tercapai untuk daerah dengan polusi cahaya rendah atau galaksi Bima Sakti dapat terlihat dengan jelas. Sudut elevasi Matahari ini juga bergantung transparansi atmosfer dan perubahan musim. Sedangkan kecerahan langit malam di Observatorium Bosscha, Bandung, dan Cimahi atau kota-kota lainnya dengan tingkat polusi cahaya tinggi (kecerahan langit malam kurang dari 19 mpass), sudut elevasi Matahari akan lebih dangkal dan durasi waktu fajar lebih singkat. Tidak terlihatnya galaksi Bima Sakti mencerminkan kondisi atau lingkungan hidup yang tidak sehat, bagi manusia dan makhluk hidup.



Gambar 18 Relasi antara sudut elevasi (diambil sebagai nilai positif) dan kecerahan langit malam (kiri); durasi fajar (kanan) dalam Herdijaya (2020).



Gambar 19 Gradien kecerahan langit terhadap panjang gelombang untuk pagi (kiri) dan sore hari (kanan).

Waktu salat Ashr ditentukan berdasarkan panjang bayangan Matahari. Penulis menggunakan metode perubahan atau gradien kecerahan langit yang merepresentasikan turbulensi atmosfer yang dapat disebabkan oleh berbagai faktor, yaitu meteorologi, topografi, bahkan komposisi atmosfer atau tingkat polusi cahaya. Di pagi hari, turbulensi mulai membesar setelah panjang bayangan $\sim 1,1$ menuju kulminasi Matahari (sekitar tengah hari), dan menurun menuju sore hari dan mulai relatif stabil saat panjang bayangan $\sim 1,4$. Saat pagi hari diperoleh rata-rata panjang bayangan untuk 22 hari sebesar $1,35 \pm 0,38$ dengan waktu jam $08:52 \pm 32$ menit, sebagai rentang waktu salat Dhuha. Panjang bayangan sore hari sebesar $1,53 \pm 0,34$ dengan waktu jam $15:15 \pm 28$ menit, sebagai waktu salat Ashr. Variabilitas atmosfer yang tinggi saat awal salat Subuh, Isya dan Ashr, maka wajar kiranya ditetapkan suatu nilai acuan. Fisis atau hikmah pengetahuan dan teknologi di balik waktu-waktu salat masih memerlukan penelitian secara multidisiplin.

Dengan demikian bahwa kecerahan langit malam sangat bergantung kepada kondisi dan variabilitas lapisan-lapisan atmosfer sebagai fungsi diurnal dan musim. Penelitian kecerahan langit malam merupakan studi multidisiplin yang melibatkan bidang fisika dan kimia atmosfer. Dampak polusi cahaya terhadap manusia dan degradasi ekosistem sudah menjadi perhatian luas secara global. Masyarakat kota-kota besar tidak dapat melihat keindahan bintang yang tidak terhitung jumlahnya saat menghiasi langit malam.

Cahaya alami (bintang, galaksi Bima Sakti, dll.) akan terhalang oleh kubah cahaya buatan yang melingkupi kota, sehingga jumlah bintang akan tampak berkurang, demikian pula galaksi Bima Sakti akan sulit dilihat oleh mata langsung. Polusi cahaya juga berdampak terhadap kesehatan manusia dan menimbulkan kerusakan ekosistem, sehingga diperlukan langkah-langkah pemantauan dan pencegahan. Langkah yang penting adalah membangun kesadaran masyarakat akan dampak polusi cahaya terhadap kerusakan ekosistem. Perlu diketahui bahwa sebagian besar populasi hewan (lebih dari 50%) merupakan hewan malam hari. Polusi cahaya akan mengganggu perkembangbiakan dan pencarian mangsa di malam hari, sehingga berperan besar dalam gangguan ekosistem, bahkan kepunahan spesies.

6. PENUTUP

Tulisan ini hanyalah setitik dan bukanlah awal ataupun akhir dalam gejolak lautan waktu. Harapan positif melihat masa depan keilmuan fisika matahari beserta dampak cuaca antariksa akan seiring dalam kemajuan teknologi antariksa. Pemahaman yang lebih mendalam tentang perilaku Matahari, sebagai bintang terdekat, yang diharapkan dapat secara signifikan meningkatkan kemampuan kita untuk memprediksi dan merespons peristiwa cuaca antariksa. Kemajuan-kemajuan ini tidak hanya akan berkontribusi pada pengetahuan ilmiah, tapi juga memiliki implikasi praktis bagi masyarakat kita yang digerakkan oleh teknologi antariksa.

Fisika matahari dan cuaca antariksa memiliki dampak yang signifikan terhadap sistem teknologi antariksa sebagai teknologi kunci dan lingkungan alam, hingga eksplorasi antariksa. Fisika matahari membantu kita memahami struktur internal Matahari, evolusi, dan korona luarnya. Ilmu ini juga membantu dalam memahami proses interaksi fenomena aktivitas matahari dengan dampaknya terhadap Bumi dan planet-planet lainnya. Medan magnet Matahari, ledakan Matahari, dan lontaran massa korona merupakan bidang penelitian yang sedang berlangsung. Dampak aktivitas matahari terhadap teknologi melahirkan cabang keilmuan cuaca antariksa. Pengembangan teknologi dan teknik baru diharapkan dapat secara signifikan meningkatkan pemahaman dan prediksi cuaca antariksa. Dalam hal cuaca antariksa, tujuannya adalah untuk meningkatkan kemampuan prakiraan. Saat ini, penelitian daerah aktif di Matahari dan penyaluran energi di ruang antarplanet memainkan peran penting dalam meramalkan lingkungan luar angkasa secara akurat. Berdasarkan data satelit, para ilmuwan membangun model digital ruang angkasa dekat Bumi untuk meningkatkan prakiraan badai matahari dan dampaknya terhadap infrastruktur. Memahami dan memprediksi cuaca antariksa sangat penting untuk keberhasilan desain, implementasi, dan pengoperasian teknologi antariksa.

Cuaca antariksa semakin penting karena manusia sedang mempersiapkan misi ke Bulan dan Mars. Cuaca antariksa ekstrem dapat memutus komunikasi radio dan membahayakan antariksawan. Dengan prakiraan dan persiapan yang tepat, efek yang mengganggu ini dapat dihindari. Misi-misi di masa depan bisa memberikan pengamatan berkelanjutan dari titik pandang yang jauh dari garis Matahari-Bumi. Ini termasuk pengamatan dari sisi jauh

Matahari, atau di lintang tinggi termasuk di atas kutub Matahari. Pengamatan semacam itu dapat mengisi kesenjangan yang diketahui dalam pemahaman ilmiah kita tentang Matahari dan heliosfer yang berevolusi dalam waktu tiga dimensi. Pengamatan dan pemodelan cuaca antariksa di Mars telah dimulai, tetapi harus ditingkatkan secara signifikan untuk mendukung masa depan eksistensi dan eksplorasi manusia di Bulan dan planet Merah. Pemahaman cuaca antariksa yang komprehensif tentang planet tanpa magnetosfer global dan atmosfer yang tipis sangat berbeda dengan situasi kita di Bumi, sehingga masih banyak penelitian fundamental yang harus dilakukan.

Sebagai tugas dosen adalah menjunjung tinggi kegiatan Tridarma perguruan tinggi di bidang Astronomi ITB, khususnya Fisika Matahari, serta berupaya untuk meningkatkan kapasitas sumber daya manusia dan memperkenalkan dampak aktivitas Matahari, yaitu cuaca atau iklim antariksa kepada mahasiswa dan masyarakat. Terbentuk atmosfer budaya ilmiah yang unggul dan tanggap, sehingga mampu beradaptasi dalam persaingan secara global menjadi tujuan keilmuan Fisika Matahari. Bidang penelitian bersifat multidisiplin menjadi kunci dalam pengembangan dan peningkatan kualitas penelitian, untuk menyelesaikan permasalahan dan meningkatkan kesadaran terhadap kebutuhan cuaca antariksa, dan dalam rangka memajukan pengembangan sains dan teknologi antariksa, sebagai implementasi Undang-Undang Keantariksaan Nomor 21 Tahun 2013.

Penguatan kerja sama, kolaborasi dan sinergi antarpeleliti di bidang fisika matahari termasuk dampak aktivitas Matahari terhadap cuaca antariksa, dalam suatu konsorsium penelitian nasional yang terdiri atas peneliti-peneliti di perguruan tinggi, lembaga riset, serta pengguna cuaca antariksa menjadi kebutuhan nasional. Langkah tersebut diharapkan dapat meningkatkan efektivitas pengembangan dan diseminasi penelitian yang menghasilkan solusi dan kontribusi nyata untuk mendorong daya saing dan kemandirian bangsa dalam sains dan teknologi antariksa.

Tindakan manusia dalam bentuk polusi cahaya bukanlah menjaga, tetapi mengaburkan berkas bukti-bukti kebesaran Sang Pencipta. Kemanfaatan keilmuan tidak terpisahkan dari memuliaan manusia dan lingkungan. Langit malam yang gelap dan cerah dengan taburan bintang merupakan karunia dan wujud kasih sayang Sang Pencipta bagi manusia dan makhluk hidup. Alam juga tidak memberikan angka, karena tidak ada yang bisa menghitung jumlah

bintang. Membaca alam semesta lebih memberikan tantangan untuk hari esok lebih baik.

Generasi Emas Indonesia adalah generasi muda, yang sedang mempersiapkan diri untuk mengambil alih tongkat kepemimpinan. Mereka adalah generasi yang menjadi pemimpin di masa depan, berpengetahuan, berbakat, dan berdedikasi tinggi, yang tumbuh dan berkembang di era digital. Mereka berkontribusi aktif dalam estafet pembangunan bangsa saat ini, sekaligus sebagai inovator, pemikir kritis, dan agen perubahan. Mereka memanfaatkan teknologi dan informasi untuk menciptakan solusi bagi tantangan multidimensi yang dihadapi bangsa. Dengan investasi yang tepat, Generasi Emas dapat membawa Indonesia ke era baru kemakmuran dan inovasi.

Indonesia memiliki banyak keterbatasan terutama pada sumber daya manusia yang terampil dan berpengetahuan di bidang sains dan teknologi antariksa (*basic space science and technology*), termasuk pemanfaatan teknologi kecerdasan buatan. Pendidikan berkualitas, akses ke teknologi, dan peluang ekonomi adalah kunci untuk membantu mereka mencapai potensi secara maksimal. Di sisi lain, Indonesia harus bisa memastikan bahwa lingkungan masih berkualitas untuk dihuni generasi mendatang, meskipun terjadi perubahan iklim. Langkah-langkah untuk mempersiapkan sumber daya manusia Indonesia untuk dapat melakukan mitigasi dan adaptasi di tengah perubahan iklim menjadi tugas besar yang harus diselesaikan. Langkah kunci lain, pemanfaatan energi bersih berbasis sumber daya alam setempat akan menciptakan ketahanan ekonomi melalui ketersediaan energi yang berkelanjutan.

Institut Teknologi Bandung berkomitmen untuk menyediakan pendidikan berkualitas tinggi yang mempersiapkan siswa untuk menjadi pemimpin di berbagai bidang, termasuk sains, teknologi, dan seni. ITB berusaha untuk memformulasikan pendidikan untuk mencetak generasi emas yang tangguh dan mumpuni menghadapi tantangan-tantangan bangsa di atas.

7. UCAPAN TERIMA KASIH

Proses menuju tahap akhir jenjang akademik menjadi guru besar merupakan proses perjalanan waktu ungkapan syukur, doa, dan amanah dari semua insan ilmu dan alam. Titik pertemuan hari ini membuka kesempatan untuk menempuh waktu dengan lebih baik untuk bersyukur. Wujud yang diharapkan adalah percepatan pengembangan keilmuan dalam sumber daya manusia yang berkualitas dengan kemanfaatan kepada masyarakat dan alam.

Jabatan akademik saat ini merupakan konvergensi dan keselarasan amanah Tridarma, proses dukungan dan kerja sama banyak pihak yang menyatu dan mengalir tiada henti dalam waktu sejak tahun 1990. Oleh karenanya dengan segala kerendahan hati dan ketulusan, Penulis mengucapkan rasa terima kasih dan penghargaan yang setingginya kepada Pimpinan Institut Teknologi Bandung, Rektor dan jajarannya, Dekan FMIPA dan jajarannya, Pimpinan Senat Akademik beserta jajarannya, serta Pimpinan Forum Guru Besar dan jajarannya yang mulia dan terhormat. Terima kasih atas kebersamaan keluarga besar Astronomi dalam biduk mengarungi lautan menembus gelombang alam semesta selama lebih dari 33 tahun dalam persahabatan, kehangatan dan dedikasi untuk saling menjaga dan berbagi. Staf kepegawaian yang senantiasa melancarkan proses administrasi dengan semangat dan komitmen yang luar biasa. Pemikiran generasi muda berbagai perguruan tinggi yang telah membuka pintu-pintu ilmu pengetahuan untuk langkah-langkah berikutnya. Terima kasih dan apresiasi yang tinggi kepada semua pihak yang tak dapat Penulis sebutkan satu persatu. Semoga Allah Swt., membalas semua kebaikan dengan kebaikan dalam rida dan rahmat-Nya.

Ungkapan terima kasih yang dalam Penulis sampaikan pula kepada Prof. Taufiq Hidayat (FMIPA ITB), Prof. Mitra Djamal (FMIPA ITB), Prof. Satria Bijaksana (FTTM ITB), Prof. Dr. Liliarsari, M. Pd. (Sekolah Pascasarjana, UPI), Prof. Thomas Djamaluddin (Badan Riset dan Inovasi Nasional), dan Prof. Nandhita Srivasatava (*Udaipur Solar Observatory, Physical Research Laboratory, India*) yang telah berkenan dan meluangkan waktunya menuliskan rekomendasi kemampuan mengemban konsekuensi dan tanggung-jawab keilmuan jabatan guru besar. Terima kasih untuk Prof. Taufiq Hidayat dengan masukan-masukan menyempurnakan naskah orasi ilmiah.

Penulis juga mengucapkan terima kasih serta doa tulus kepada kepada Ayahnda H. D. Soedikto, S.H., Ibunda Hj. H. Suprapti, Bapak H. S. Saryawijaya, dan Ibu Hj. N. Sumiati, yang selama hidupnya senantiasa mendukung dan memanjatkan doa bagi keberkahan kiprah Penulis berkarier sebagai dosen di ITB dan masyarakat. Terima kasih atas doa dan dorongan semangat tiada henti yang memungkinkan titik singgah dan capaian hari ini terkabulkan oleh Allah Swt..

Terima kasih juga untuk istri tercinta, Hj. Lina Tarliyah, keluarga ananda Tania Dhali Shonnareta dan Mokhamad Arif Saifullah, dan ananda Muhammad Dhali Aska (alm.), yang selalu hadir bersama dalam relung hati dan keseharian, terus bersama dalam doa dan harapan untuk mengarungi lautan ilmu dan kalbu. Terima kasih tak terhingga atas keihlasan mendoakan sehingga tercipta atmosfer sejuk dan ceria, serta menjadi pengingat dan sumber semangat untuk maju, sabar, dan bersyukur.

Kepada keluarga besar Pendawa, Mas Dadit, Mas Ikha, Dik Djarot, dan Dik Djoni, dan keluarga besar Bapak H. S. Saryawijaya, terima kasih atas seluruh dukungan, doa yang tulus, dan kebersamaan selama ini. Terima kasih untuk semua semangat, kesejukannya, dan kebersamaannya.

Semoga jendela waktu lampau, ujian hari ini dan esok matahari terbit menjadi cambuk untuk lebih bersyukur atas segala ilmu-Nya dan rahmat-Nya, dan apapun yang telah diberikan-Nya. Semoga Allah Swt. memberikan keridaan-Nya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ahmad, N., Herdiwijaya, D., Djamaluddin, T., Usui, H., & Miyake, Y., (2018). Diagnosing low earth orbit satellite anomalies using NOAA-15 electron data associated with geomagnetic perturbations. *Earth Planets Space*, 70, 91. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0852-2>
2. Alexander, P. (1992). History of solar coronal expansion studies. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 73(41), 433–433. <https://doi.org/10.1029/91eo00319>
3. Aschwanden M.J., Poland, A.I., & Rabin, D.M. (2001). The New Solar Corona. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 39(1), 175-210. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.39.1.175>
4. Astuti, I.K.D., & Herdiwijaya, D. (2020). Morphology and evolution of coronal holes at the wavelengths of 171 Å, 193 Å, and 211 Å in the Solar Cycle 24. *Journal of Physics: Conference Series*, **1523** (1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1523/1/012004>
5. Baskoro, A.A., Yatini, C.Y., & Herdiwijaya, D. (2010). Pengaruh sinar kosmik terhadap pembentukan awan total dan awan atas wilayah Indonesia dalam periode 1979-1995. *Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara*, 2010, 7. https://jurnal.lapan.go.id/index.php/majalah_sains_tekgan/article/view/399
6. Cottam, S., Pearson, J., Orchiston, W., & Stephenson, R. (2011). The Total Solar Eclipses of 7 August 1869 and 29 July 1878 and the Popularisation of Astronomy in the USA as Reflected in the New York Times. In: Orchiston, W., Nakamura, T., Strom, R. (eds) *Highlighting the History of Astronomy in the Asia-Pacific Region*. Astrophysics and Space Science Proceedings. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8161-5_15
7. Cranmer, S.R., & Winebarger, A.R. (2019). The Properties of the Solar Corona and Its Connection to the Solar Wind. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 57, 157-187. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-091918-104416>
8. Eddy, J.A., Stephenson, F.R., & Yau, K.K.C. (1989). On pre-telescopic sunspot records. *The quarterly journal of the Royal Astronomical Society*, 30, 65. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1989QJRAS..30...65E>

9. Edlén, B. (1945). The identification of the coronal lines (George Darwin Lecture). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 105, 323. <https://doi.org/10.1093/mnras/105.6.323>
10. Fadiyah, A.I., & Herdiwijaya, D. (2022). Variations of IMF Cone Angle and IMF Clock Angle to Solar Cycles and Geomagnetic Storms. *Journal of Physics: Conference Series*, 2243 (1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012011>
11. Fatima, S., Widyanita, Fahriyah, H., Rhodiyah, A.K., Satrya, C.D., Hilmi, M., Ramadhania, G.E., Naufal, L., Mulki, F.A.M., & Herdiwijaya, D. (2016). Total solar eclipse education for young generation at Palangkaraya, Central Kalimantan. *Journal of Physics: Conference Series*, 771, 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/771/1/012044>
12. Goss, W.M., Hooker, C., & Ekers, R.D. (2023). The Million Degree Solar Corona, 1945–1946. In: Joe Pawsey and the Founding of Australian Radio Astronomy. *Historical & Cultural Astronomy*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07916-0_14
13. Grotrian, W. (1931). Ergebnisse der Potsdamer Expedition zur Beobachtung der Sonnenfinsternis am 9. Mai 1929 in Takengon (Nordsumatra). 6. Mitteilung. Über die Intensitätsverteilung des kontinuierlichen Spektrums der inneren Korona. Mit 8 Abbildungen. (Eingegangen am 27. Juni 1931). *Zeitschrift für Astrophysik*, 3,199.
14. Grotrian, W. (1939). Zur Frage der Deutung der Linien im Spektrum der Sonnenkorona. *Naturwissenschaften*, 27, 214. <https://doi.org/10.1007/BF01488890>
15. Guglielmi, G. (2017). Three times scientists learned something from solar eclipses—and three times they were tricked, *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.aan7241>
16. Halley, E. (1705). *Synopsis of the Astronomy of Comets*, London.
17. Han, Y., & Qiao, Q. (2009). Records of solar eclipse observations in ancient. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 52, 1639. <https://doi.org/10.1007/s11433-009-0241-8>
18. Hayakawa, H., Tamazawa, H., Kawamura, A.D., & Isobe, H. (2015). Records of sunspot and aurora during CE 960–1279 in the Chinese chronicle of the Sòng dynasty. *Earth, Planet and Space*, 67, 82. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0250-y>

19. Herdiwijaya, D., Makita, M., & Anwar, B. (1997). The Proper Motion of Individual Sunspots. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 49(2), 235–248. <https://doi.org/10.1093/pasj/49.2.235>
20. Herdiwijaya, D., & Indradjaja, B. (2002). Fraktal dan Variabilitas dalam Siklus Bintik Matahari. *Kontribusi Fisika Indonesia*, 3(2), 72-75.
21. Herdiwijaya, D., Radiman, I., Kunjaya, C., Hakim, M.I., & Dupe, Z.L. (2002). The Temporal Variations in Sunspot Number, Geomagnetic aa index and Southern Oscillation Index. *Jurnal Matematika dan Sains*, 7(1), 1.
22. Herdiwijaya, D. (2002, July). Differential Rotation Derived from Individual Sunspot Measurements Journal: The Proceedings of the IAU 8th Asian-Pacific Regional Meeting, Volume II, held at National Center of Sciences, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, July 2 - 5, 2002, Edited by S. Ikeuchi, J. Hearnshaw, and T. Hanawa, the Astronomical Society of Japan, 2002, p. 427-427. <https://adsabs.harvard.edu/full/2002aprm.conf..427H>
23. Herdiwijaya, D. (2006). Large Scale Solar Mean Flows and Tilt Motion derived from Individual Sunspot Proper Motion. In: The 9th Asian-Pacific Regional IAU Meeting, held in Nusa Dua, Bali, Indonesia, 26-29 July 2005. Edited by W. Sutantyo; P.W. Premadi; P. Mahasena; T. Hidayat and S. Mineshige. Publisher: Institut Teknologi Bandung Press, 2006, p.26. ISBN: 979-3507-63-2
24. Herdiwijaya, D., & Baskoro, A. (2006). Correlation of Solar Cosmic Ray with Clouds Coverage in Indonesia. In: *Solar and Stellar Activity Cycles*, 26th meeting of the IAU, Joint Discussion 8, 17-18 August 2006, Prague, Czech Republic, JD08, id.58. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006IAUJD...8E..58H%2F/>
25. Herdiwijaya, D., Chandra, A.E.C., Fernanda, C.A., & Husna, M. (2024), Proper Motion of Individual Sunspot and Photospheric Magnetic Properties Related to X-class Flare in NOAA AR12158. *Journal of the Korean Astronomical Society* (submitted).
26. Herdiwijaya, D., & Imelda, S. (2006). The Probability of Flare Occurrences Based on Sunspot Group and Magnetic Configurations. *Jurnal Matematika dan Sains*, 11(2), 37.
27. Herdiwijaya, D., & Fernanda, C.A. (2024a). Using Space-weather HMI Active Region Patch (SHARP) parameters to identify solar-flare precursors for space weather forecasting *Journal of Physics: Conference Series* (accepted).

28. Herdiwijaya, D., & Kurniasari, Y. (2008). On the Relation of Energetic Proton Velocity and Density Variations due to Shock Wave. *Proceeding of 2nd International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS)*, Bandung
29. Herdiwijaya, D., & Hermawan, J. (2009). On the Correlation of Solar Energetic Particles Shock Wave, Magnetic Cloud and Geomagnetic Storm Proceedings of the 3rd *Asian Physics Symposium (APS 2009)* July 22 – 23, Bandung, Indonesia
30. Herdiwijaya, D. (2010a). On the Correlation of Solar Energetic Particles Shock Wave, Magnetic Cloud and Geomagnetic Storm: Case of November 20, 2003, and December 14, 2006, Events. *AIP Conference Proceedings*, 1325 (1), 113–116. <https://doi.org/10.1063/1.3537874>
31. Herdiwijaya, D. (2010b). On The Prediction of Solar Cycle 24. *Proceeding of the Conference on Earth and Space Science*, 7-8 January 2010, Bandung, Indonesia.
https://www.researchgate.net/publication/233861189_On_The_Prediction_of_Solar_Cycle_24
32. Herdiwijaya, D. (2012, June). The characteristics of solar wind parameters during minimum periods of solar cycle 24 and impact on geoeffectiveness. *AIP Conference Proceedings*, 1454 (1), 25–28. <https://doi.org/10.1063/1.4730679>
33. Herdiwijaya, D. (2014). Implications of Twilight Sky Brightness Measurements on Fajr Prayer and Young Crescent Observation *Proceedings of the 2014 International Conference on Physics and its Applications*, Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/icopia-14.2015.5>
34. Herdiwijaya, D., Arif, J., & Nurzaman, M.Z. (2014). On the Relation between Solar and Global Volcanic Activities. *International Conference on Physics 2014 (ICP-14)*, <https://doi.org/10.2991/icp-14.2014.21>
35. Herdiwijaya, D., & Rachman, A. (2014, March). On the effects of solar storms to the decaying orbital space debris. *AIP Conference Proceedings*, 1589 (1), 3–6. <https://doi.org/10.1063/1.4868736>
36. Herdiwijaya, D. (2015a, April). The source of multi spectral energy of solar energetic electron. *AIP Conference Proceedings*, 1656 (1), 070008. <https://doi.org/10.1063/1.4917154>
37. Herdiwijaya, D. (2015b). The Small Telescopes Performance in the Visual to Near Infrared Wavelengths. *Applied Mechanics and Materials*, 771, 129–132. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.771.129>

38. Herdiwijaya, D., Arif, J., Nurzaman, M.Z., & Astuti, I.K.D. (2015, September). On the possible relations between solar activities and global seismicity in the solar cycle 20 to 23. *AIP Conference Proceedings*, 1677 (1), 050003. <https://doi.org/10.1063/1.4930664>
39. Herdiwijaya, D. (2019a). Light pollution at Bosscha Observatory, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1153 012133. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012133>
40. Herdiwijaya, D. (2019b). Spectral energy of multisource and multielement of solar energetic particles during the spotless days on solar cycle 24. *Journal of Physics: Conference Series*, 1127, 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1127/1/012035>
41. Herdiwijaya, D. (2019c). Distribution of solar energetic particles and magnetic field orientations related to strong geomagnetic storms in solar cycle 24. *Journal of Physics: Conference Series*, 1204, 012121. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1204/1/012121>
42. Herdiwijaya, D., & Permata, K., 2019 Sunspot proper motion of individual sunspot in active region 11429 during X5.4 solar flare on March 7, 2012. *Journal of Physics: Conference Series*, 1153, 012134. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012134>
43. Herdiwijaya, D. (2020). On the beginning of the morning twilight based on sky brightness measurements. *Journal of Physics: Conference Series*, 1523 (1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1523/1/012007>
44. Herdiwijaya, D., Satyaningsih, R., Luthfiandari, Prastyo, H.A., Arumaningtyas, E.P., Sulaeman, M., Setiawan, A., & Yulianti, Y. (2020). Measurements of sky brightness at Bosscha Observatory, Indonesia. *Heliyon*, 6 (8), e04635. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04635>
45. Hunter, A. (1942). Origin of the coronium lines. *Nature*, 150, 756–759. <https://doi.org/10.1038/150756a0>
46. Khamdani, M., & Herdiwijaya, D. (2020). Koneksi Matahari-Bumi 25 - 26 Agustus 2018: CME, MC, dan Badai Geomagnetik Kuat. *Sunan Kalijaga Journal of Physics*, 2 (1), 1. ISSN: 2715-0402
47. Kunjaya, C., Radiman, I., Dupe, Z.L., Herdiwijaya, D., & Hakim, M.I. (2001). Are El Niño and La Nina Phenomena Influenced by Solar Activities? *Jurnal Matematika dan Sains*, 6(1), 55 – 56.
48. Kunjaya, C., Radiman, I., Dupe, Z.L., Herdiwidjaja, D., & Hakim, M.I. (2003, June). On the prediction of El Niño 2002 based on the peak of sunspot number in 2000. In: *Solar variability as an input to the Earth's*

- environment*. International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium, 23 - 28 June 2003, Tatranská Lomnica, Slovak Republic. Ed.: A. Wilson. ESA SP-535, Noordwijk: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-845-X, 2003, p. 367. Bibcode: 2003ESASP. 535..367K
49. Luthfiandari, Ekawanti, N., Purwati, F.G., & Herdiwijaya, D. (2016). Identification of moon craters and solar corona during total solar eclipse on 9th March 2016. *Journal of Physics: Conference Series*, 771, 012015. doi:10.1088/1742-6596/771/1/012015
 50. Makita, M. (1963). Physical States in Sunspots. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 15, 145. <https://adsabs.harvard.edu/full/1963PASJ...15..145M>
 51. Minnaert, M. (1931). The spectrum of the extreme limb of the sun during the eclipse of 1929, May the 9th. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 6, 151–153.
 52. Miller, J.A., & Marriott, R.W. (1929). Observation of the total solar eclipse of May 1929, made by the Rubel eclipse expedition of Swarthmore College. *Popular Astronomy*, XXXVII, 495–505
 53. Mumpuni, E. S., Herdiwijaya, D., & Djamal, M. (2014, March). Oscillation signature from multi-wavelength analysis on solar chromosphere. *AIP Conference Proceedings*, 1589 (1), 7–9. <https://doi.org/10.1063/1.4868737>
 54. Mumpuni, E. S., Herdiwijaya, D., Djamal, M., & Djamaluddin, T. (2015a). Multi-Wavelength Fibril Dynamics and Oscillations above Sunspot Wave Propagation. *Journal of the Korean Astronomical Society*, 30(2), 59-60. <https://doi.org/10.5303/PKAS.2015.30.2.059>
 55. Mumpuni, E. S., Herdiwijaya, D., Djamal, M., & Djamaluddin, T. (2015b, September). Multi-wavelength fibril dynamics and oscillations above sunspot – Fourier decomposition. *AIP Conference Proceedings*, 1677 (1), 050006. <https://doi.org/10.1063/1.4930667>
 56. Mumpuni, E. S., Herdiwijaya, D., Djamal, M., & Djamaluddin, T. (2015c). Multi-wavelength fibril dynamics and oscillations above sunspot – I. morphological signature. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 15, 1843. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/15/11/007>
 57. Mumpuni, E. S., Herdiwijaya, D., Djamal, M., & Djamaluddin, T. (2018). Multi-wavelength Fibril Dynamics and Oscillations above Sunspot-II Wave Propagation Signature. *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, 50(3), 273-289 <https://doi.org/10.5614/j.math.fund.sci.2018.50.3.4>.

58. Naufal, L., Mulki, F.A.M., Fatima, S., Widyanita, Zahirah, S., Satrya, C.D., & Herdiwijaya, D. (2016). Prominence measurement of total solar eclipse: March 9th2016, Ternate, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 771, 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/771/1/012007>
59. Noor, N.A.b.M., & Orchiston, W. (2021). The Total Solar Eclipse of 9 May 1929: The British Expedition to Alor Star in the Unfederated Malay State of Kedah. In: Orchiston, W., Vahia, M.N. (eds) *Exploring the History of Southeast Asian Astronomy. Historical & Cultural Astronomy*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62777-5_11
60. Nurzaman, M. Z., & Herdiwijaya, D. (2015, September). Three-dimensional simulations of solar granulation and blast wave using ZEUS-MP code. *AIP Conference Proceedings*, 1677 (1), 050010. <https://doi.org/10.1063/1.4930671>
61. Parker, E. N. (1958). Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields. *Astrophysical Journal*, 128, 664. <https://doi.org/10.1086/146579>
62. Permata, K., & Herdiwijaya, D. (2020). The proper motion of sunspots umbra in the rising phase of Cycle 24. *Journal of Physics: Conference Series*, 1523 (1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1523/1/012016>
63. Permata, K., & Herdiwijaya, D. (2019). The Measurement of Solar Differential Rotation from Proper Motion of Individual Sunspots. *Journal of Physics: Conference Series*, 1231, 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1231/1/012019>
64. Piddington, J., & Davies, R. (1953). Origin of the Solar Corona. *Nature*, 171, 692. <https://doi.org/10.1038/171692a0>
65. Pratiwi, N., & Herdiwijaya, D., (2022). Solar radiation pressure on LAPAN A1 satellite due to extreme geomagnetic storm. *Journal of Physics: Conference Series*, 2243 (1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012013>
66. Putri, A.N.I., & Herdiwijaya, D. (2021). Studi Hubungan Intensitas Sinar Kosmik terhadap Variasi Parameter Aktivitas Matahari dan Plasma Ruang Antarplanet, ProsidingSeminar Nasional Fisika 7.0, 301-306. ISBN: 978-602-74598-5-4 <http://proceedings2.upi.edu/index.php/sinafi/issue/view/29>
67. Putri, A.N.I., Herdiwijaya, D., & Hidayat, T. (2023, December). Partial least squares method to modeling cosmic ray intensity based on variation of solar activity and interplanetary plasma parameter. *AIP Conference Proceedings*, 2941 (1), 040020. <https://doi.org/10.1063/5.0181486>

68. Putri, A.N.I., Herdiwijaya, D., & Hidayat, T. (2024, accepted). On the Correlation of Cosmic-Ray Intensity with Solar Activity and Interplanetary Parameters. *Solar Physics*.
69. Rachman, A., & Herdiwijaya, D. (2014, March) Identifying solar wind structures related to Garuda 1 satellite anomaly by analyzing solar wind and IMF parameters. *AIP Conference Proceedings*, 1589 (1), 22–25. <https://doi.org/10.1063/1.4868741>
70. Radiman, I., Herdiwidjaja, D., Dupe, Z.L., Kunjaya, C., & Hakim, M.I. (2003). Solar Cycle Variations and its Effects on El Niño/La Niña Behaviour. *Jurnal Matematika dan Sains*, 8 (2), 47.
71. Skoug, R. M., Gosling, J. T., Steinberg, J. T., McComas, D. J., Smith, C. W., Ness, N. F., Hu, Q., & Burlaga, L.F. (2004). Extremely high speed solar wind: 29–30 October 2003. *Journal of Geophysical Research*, 109, A09102. <https://doi.org/10.1029/2004JA010494>.
72. Sulistiani, S., & Herdiwijaya, D. (2019). Solar coronal holes and their geo-effectiveness. *Journal of Physics: Conference Series*, 1127, 012052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1127/1/012052>
73. Trihermanto, F., & Herdiwijaya, D., (2012). The surface distribution of solar energetic particles on the Earth and Southern Atlantic Anomaly. *AIP Conference Proceedings*, 1454 (1), 32. <https://doi.org/10.1063/1.4730681>
74. Yeomans, D.K. (1991). *Comets: A Chronological History of Observation, Science, Myth, and Folklore*, Wiley (ISBN. 978-0471610113)
75. Zank, G. P., Nakanotani, M., Zhao, L.-L., Adhikari, L., & Kasper, J. (2020). The Origin of Switchbacks in the Solar Corona: Linear Theory. *Astrophysical Journal*, 903, 1. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abb828>

CURRICULUM VITAE



Nama : Dhani Herdiwijaya
Tempat/tgl lahir : Semarang, 26 Februari 1963
Kel. Keahlian : Astronomi
Alamat Kantor : Gedung CAS Lt. 6
Nama Istri : Lina Tarliyah, S.E.
Nama Anak : Tania Dhali Shonnareta, M.Pd.

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Sarjana, 1988, Jurusan Astronomi, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Bandung. Judul tugas akhir: “*Model Teoritik dan Semiempirik Fotosfer Matahari*”
- Master of Science, 1994, Department of Astronomy, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto, Jepang. Judul thesis: “*On the Study of Sunspot Proper Motion in 1989, 1990, and 1992*”
- Doctor of Science, 1997, Department of Astronomy, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto, Jepang. Judul disertasi: “*The Proper Motion of Individual Sunspot*”

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

No.	Nama Jabatan	Tahun
1	Sekretaris Departmen Astronomi	1999–2004
2	Ketua Departmen Astronomi	2004-2005
3	Kepala Observatorium Bosscha	2004-2005
4	Ketua Prodi Sarjana dan Pascasarjana Astronomi	2006-2007
5	Ketua KK Astronomi	2013
6	Ketua Prodi Sarjana, Magister dan Doktor Astronomi	2014-2015
7	Ketua Prodi Magister dan Doktor Astronomi	2016-2017
8	Anggota Tidak Tetap Senat FMIPA	2018-2019
9	Anggota Tetap Senat Fakultas FMIPA	2019-2023
10	Anggota Tetap Senat Akademik ITB	2019-2023
11	Wakil Kepala Observatorium Bosscha	2023-2024
12	Ketua KK Astronomi	2024-2028
13	Anggota Tetap Senat Fakultas FMIPA	2024-2027
14	Anggota Tetap Senat Akademik ITB	2024-2029
15	Tim Penilai Angka Kredit FMIPA	2021-2023

No.	Nama Jabatan	Tahun
16	Anggota Board of Reviewer, LPPM ITB	2022-2023

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

Pangkat	Golongan	TMT
Penata Muda	III/a	01-01-1990
Penata Muda Tingkat I	III/b	01-10-2000
Penata	III/c	01-04-2001
Penata Tingkat I	III/d	01-04-2009
Pembina	IV/a	01-04-2011
Pembina Tingkat I	IV/b	01-04-2013
Pembina Madya	IV/c	01-10-2023

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

Nama	Jabatan	TMT
Asisten Ahli Madya	01-07-1991	
Asisten Ahli	01-01-2000	
Lektor	01-07-2002	
Lektor Kepala	01-10-2008	
Guru Besar	01-05-2023	

V. KEGIATAN PENELITIAN

- Riset Kolaborasi Indonesia, 2022-2023
- Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Inovasi (PPMI), 2022, 2023

VI. PUBLIKASI

- Putri, A.N.I., Herdiwijaya, D., & Hidayat, T. (2024). On the Correlation of Cosmic-Ray Intensity with Solar Activity and Interplanetary Parameters. *Solar Physics* (accepted).
- Riza, L. S., Izzuddin, A., Utama, J A., Samah, K.A.F.A, Herdiwijaya, D., Hidayat, T., Anugraha R., Mumpuni, E.S. (2022). Data analysis techniques in light pollution: A survey and taxonomy. *New Astronomy Reviews*, 95, 101663. <https://doi.org/10.1016/j.newar.2022.101663>
- Herdiwijaya, D., Satyaningsih, R., Luthfiandari, Prastyo, H.A., Arumaningtyas, E.P., Sulaeman, M., Setiawan, A., Yulianti, Y. (2020). Measurements of sky brightness at Bosscha Observatory, Indonesia. *Heliyon*, 6, e04635. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04635>

- Ahmad, N., Herdiwijaya, D., Djameluddin, T., Usui, H., & Miyake, Y., (2018). Diagnosing low earth orbit satellite anomalies using NOAA-15 electron data associated with geomagnetic perturbations. *Earth Planets Space*, 70, 91. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0852-2>
- Mumpuni, E. S., Herdiwijaya, D., Djamal, M., & Djameluddin, T. (2018). Multi-wavelength Fibril Dynamics and Oscillations above Sunspot-II Wave Propagation Signature. *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, 50(3), 273-289 <https://doi.org/10.5614/j.math.fund.sci.2018.50.3.4>.
- Mumpuni, E. S., Herdiwijaya, D., Djamal, M., & Djameluddin, T. (2015). Multi-wavelength fibril dynamics and oscillations above sunspot – I. morphological signature. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 15, 1843. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/15/11/007>
- Mumpuni, E. S., Herdiwijaya, D., Djamal, M., & Djameluddin, T. (2015). Multi-Wavelength Fibril Dynamics and Oscillations above Sunspot Wave Propagation. *Journal of the Korean Astronomical Society*, 30(2), 59-60. <https://doi.org/10.5303/PKAS.2015.30.2.059>
- Hidayat, T., Munir, A., Dermawan, B. et al. (2014). Radio frequency interference measurements in Indonesia. *Experimental Astronomy*, 37, 85–108. <https://doi.org/10.1007/s10686-013-9369-7>
- Irawati, P., Mahasena, P., Herdiwijaya, D., & Zen, F.P. (2013). Population synthesis of cataclysmic variable star: I. A new methodology and initial study on the post common-envelope stage. *Astrophysics and Space Science*, 346, 79–87. <https://doi.org/10.1007/s10509-013-1447-9>
- Hidayat, T., Mahasena, P., Dermawan, B., T., Hadi, T.W., Premadi, P.W., & Herdiwijaya, D. (2012). Clear sky fraction above Indonesia: an analysis for astronomical site selection. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427, 1903–1917. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.22000.x>
- Herdiwijaya, D., Makita, M., & Anwar, B. (1997). The Proper Motion of Individual Sunspots. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 49(2), 235–248. <https://doi.org/10.1093/pasj/49.2.235>
- Panjaitan, E. & Herdiwijaya, D. (1991). Photographic observations of visual double stars. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 88, 63. <https://adsabs.harvard.edu/full/1991A%26AS...88...63P>
- Khamdani, M., & Herdiwijaya, D. (2020). Koneksi Matahari-Bumi 25 - 26 Agustus 2018: CME, MC, dan Badai Geomagnetik Kuat. *Sunan Kalijaga Journal of Physics*, 2 (1), 1. ISSN: 2715-0402

- Herdiwijaya, D. (2017). Waktu Subuh: Tinjauan Pengamatan Astronomi. *Tarjih: Jurnal Tarjih dan Pengembangan Pemikiran*, 95, 51. <https://www.jurnal.tarjih.or.id/index.php/tarjih/article/view/14.104>
- Rusmin, P.H., Rohman, A.S., Herdiwijaya, D., Khaerani, I.F.S.R., Phalevi, R., & Darmawan, D. (2017). *Mutawatir: Jurnal Keilmuan Tafsir Hadith*, 7, 105. <https://doi.org/10.15642/mutawatir.2017.7.1.105-139>
- Liliawati, W., Rustaman, N.Y., Herdiwijaya, D., & Rusdiana, D. (2014) Penerapan Perkuliahan IPBA Terintegrasi Berbasis Kecerdasan Majemuk Untuk Menanamkan Karakter Diri Dan Meningkatkan Penguasaan Konsep Bintang. *Jurnal Pengajaran MIPA*, 19, 80. <https://ejournal.upi.edu/index.php/jpmipa/article/view/36159>
- Liliawati, W., Rustaman, N.Y., Herdiwijaya, D., & Rusdiana, D. (2013) Efektivitas Perkuliahan IPBA Terintegrasi Berbasis Kecerdasan Majemuk untuk Meningkatkan Penguasaan Konsep dan Menanamkan Karakter Diri Mahasiswa Calon Guru SMP pada Tema Tata Surya. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 3, 63
- Herdiwijaya, D., Djamal, M., & Gunawan, H. (2012). Design of Mobile and Robotic Observing System with Special Telescope Baffle for Searching Young Lunar Crescent." *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, 4, 1. <https://doi.org/10.5614/joki.2012.4.1.1>.
- Herdiwijaya, D., & Imelda, S. (2006). The Probability of Flare Occurrences Based on Sunspot Group and Magnetic Configurations. *Jurnal Matematika dan Sains*, 11, 37.
- Radiman, I., Herdiwidjaja, D., Dupe, Z.L., Kunjaya, C., & Hakim, M.I. (2003). Solar Cycle Variations and its Effects on El Niño/La Niña Behaviour. *Jurnal Matematika dan Sains*, 8 (2), 47.
- Herdiwidjaja, D., Radiman, I., Kunjaya, C., Dupe, Z.L., & Hakim, M.I. (2002). The Temporal Variations in Sunspot Number, Geomagnetic aa index and Southern Oscillation Index. *Jurnal Matematika dan Sains*, 7, 1.
- Herdiwijaya, D., & Indradjaja, B. (2002). Fraktal dan Variabilitas dalam Siklus Bintik Matahari. *Indonesian Journal of Physics*, 13(2), 72-75. <https://ijphysics.fi.itb.ac.id/index.php/ijp/article/view/37>
- Kunjaya, C., Radiman, I., Dupe, Z.L., Herdiwijaya, D., & Hakim, M.I. (2001). Are El Niño and La Nina Phenomena Influenced by Solar Activities? *Jurnal Matematika dan Sains*, 6(1), 55 – 56.

VII. PENGHARGAAN

- Penghargaan International Astronomy Union (IAU), nama asteroid 12178 Dhani/4304 T-3, IAU, tahun 2011.
- Penghargaan Satya Lancana Karya Satya 20 tahun, Presiden RI, tahun 2013.
- Penghargaan Pengabdian ITB 25 tahun, Rektor ITB, tahun 2016.
- Penghargaan Bidang Karya Inovasi, Dies Natalis ITB ke-60, Rektor ITB, tahun 2019.
- Penghargaan Satya Lancana Karya Satya 30 tahun, Presiden RI, tahun 2022.



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎️ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉️ office@itbpress.id
👤 Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
📄 APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532
🌐 fgb.itb.ac.id 📘 FgbItb 🐦 FGB_ITB
📱 @fgbitb_1920 📺 Forum Guru Besar ITB

