

**ANALISIS FENOMENA ANGIN PUTING BELIUNG MENGGUNAKAN
CITRA SATELIT HIMAWARI-8 (STUDI KASUS KECAMATAN
KALIANGET)**

SKRIPSI

Oleh:
ZUMROTUL FAIZAH
NIM. 200604110001



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2024**

HALAMAN PENGAJUAN

**ANALISIS FENOMENA ANGIN PUTING BELIUNG MENGGUNAKAN
CITRA SATELIT HIMAWARI-8 (STUDI KASUS KECAMATAN
KALIANGET)**

SKRIPSI

**Diajukan Kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

**Oleh:
ZUMROTUL FAIZAH
NIM. 200604110001**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2024**

HALAMAN PERSETUJUAN

ANALISIS FENOMENA ANGIN PUTING BELIUNG MENGGUNAKAN CITRA SATELIT HIMAWARI-8 (STUDI KASUS: KECAMATAN KALIANGET)

SKRIPSI

Oleh:
Zumrotul Faizah
NIM. 200604110001

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Pada tanggal, 13 Desember 2024

Pembimbing I



Ahmad Luthfin, M.Si
NIP. 19860504 201903 1 009

Pembimbing II



Ahmad Abtokhi, M.Pd
NIP. 19761003 200312 1 004

Mengetahui
Ketua Program Studi



Dr. Umar Tazi, M.Si
NIP. 19740730 200312 1 002

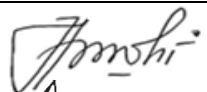
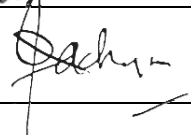
HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS FENOMENA ANGIN PUTING BELIUNG MENGGUNAKAN CITRA SATELIT HIMAWARI-8 (STUDI KASUS : KECAMATAN KALIANGET)

SKRIPSI

Oleh:
Zumrotul Faizah
NIM. 200604110001

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Pada Tanggal, 10 Desember 2024

Ketua Penguji	:	<u>Irfan, M.Si</u> NIP. 19691231 200604 1 003	
Anggota Penguji I	:	<u>Fikriyatul Azizah Su'ud, M.Si</u> NIP. 19930617 202012 2 003	
Anggota Penguji II	:	<u>Ahmad Luthfin, M.Si</u> NIP. 19860504 201903 1 009	
Anggota Penguji III	:	<u>Ahmad Abtokhi, M.Pd</u> NIP. 19761003 200312 1 004	

Mengesahkan,
Ketua Program Studi



Dr. Imam Tazi, M.Si
NIP. 19740730 200312 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : ZUMROTUL FAIZAH
NIM : 200604110001
Program Studi : FISIKA
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
Judul Penelitian : Analisis Fenomena Angin Puting Beliung Menggunakan
Citra Satelit Himawari-8 (Studi Kasus: Kecamatan
Kalianget)

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 10 Desember 2024
Yang Membuat Pernyataan,



Zumrotul Faizah
NIM. 200604110001

MOTTO

“Setiap perjuangan adalah jalan menuju ridha-Nya dan segala sesuatu yang kulalui adalah bagian dari rencana-Nya.

Firman Allah menguatkan, ‘Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal itu baik bagimu dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu, padahal itu buruk bagimu. Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui’. (Q.S. Al-Baqarah:216).

Aku menyerahkan hasil dari semua ini kepada-Nya, karena Rasulullah SAW bersabda, ‘Jika engkau bertawakal kepada Allah dengan sebenar-benar tawakal, niscaya Allah akan memberikan rezeki kepadamu sebagaimana Dia (Allah) memberikan rezeki kepada burung’. (HR. Tirmidzi).”

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah Swt. penulis panjatkan atas segala limpahan rahmat dan kenikmatan-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dan penulis persembahkan untuk:

1. Papa Zainori dan Mama Fatmawati, dua sosok luar biasa yang menjadi alasan terbesar dalam setiap langkah perjuanganku, sosok yang selalu menjadi mentari di setiap pagi kehidupanku. Papa, terimakasih atas kebijaksanaanmu yang selalu menjadi arah, atas setiap nasehat yang membimbingku dan atas keteguhan hatimu yang menginspirasi untuk terus berjuang di jalan-Nya. Mama, terimakasih atas cinta tanpa batas, doa-doa yang tak pernah terputus, serta pengorbanan yang bahkan tak pernah kau hitung. Kalian adalah sumber semangatku, pelindung hatiku dan cahaya dalam gelapku. Setiap tetes keringat dan air mata dalam perjalanan ini, kujalani dengan harapan dapat membalas sedikit saja dari begitu banyak yang telah kalian berikan. Semoga karya kecil ini menjadi bukti cinta dan penghargaan atas segala yang telah kalian perjuangkan untukku. Sehat selalu pa, ma, semoga Allah melimpahkan keberkahan dan kebahagiaan untuk kalian.
2. Kedua adik kandung penulis, Ibnu Jarir Ath-Thabari dan Atiyatul Udma Altofun Nisa', yang selalu menjadi alasan tambahan untuk penulis terus berjuang. Kalian adalah pelengkap kebahagiaanku, sumber tawa dalam hari-hariku dan pengingat bahwa aku harus menjadi panutan yang baik. Terimakasih atas kehadiran kalian yang selalu membawa warna, semangat, dan kebahagiaan di tengah perjalanan yang penuh tantangan ini. Setiap

langkah dalam menyelesaikan skripsi ini, aku berharap dapat menginspirasi kalian untuk tidak pernah menyerah pada mimpi-mimpi kalian sendiri. Kalian adalah bagian dari doa-doa yang kuucapkan setiap malam, agar kelak kita semua bisa sukses bersama dan membuat orang tua kita bangga. Teruslah menjadi kalian yang hebat, karena kakak percaya masa depan yang gemilang menanti kalian.

3. Sahabat terbaik penulis, Ayu Rohmania, Amd. Keb, Anisatul Aini, S.Kg, Mamluatul Hasanah, S.P, Ihdina Dinal Haq, A.Md. RMIK, Fadilah Dewi Anggun Permata Sari, S.H, kalian adalah rumah tempat penulis berbagi tawa, tangis dan semua cerita kehidupan. Terimakasih telah menjadi bahu untuk bersandar, telinga untuk mendengar dan hati yang selalu tulus menemani.
4. Hamidatus Sholehah, S.H dan Syarifatul Ummah, dua sosok manusia yang selalu menjadi motivator untuk penulis. Terimakasih untuk setiap semangat yang kalian beri. Perjalanan ini tak akan sama tanpa kehadiran kalian. Semoga setiap doa dan kebaikan yang kalian berikan kembali menjadi keberkahan dalam hidup kalian. Terimakasih telah menjadi bagian dari perjuanganku, semoga persahabatan ini tetap abadi, penuh cinta dan doa.
5. Hosraini, S.Si dan Lini Arifa, S.Si, kedua sahabat perjuanganku yang telah menemani perjalanan ini sejak langkah pertama hingga saat ini. Terimakasih untuk setiap tawa yang menguatkan dan semangat yang tak pernah putus kalian berikan. Bersama kalian, masa-masa sulit terasa lebih ringan dan kebahagiaan terasa lebih bermakna. Kalian adalah saksi dari setiap cerita suka dan duka, tempat aku berbagi mimpi dan kekhawatiran. Terimakasih

telah menjadi teman, saudara dan penyemangat di sepanjang jalan ini. Semoga perjalanan kita menjadi kenangan indah yang selalu kita ingat.

6. Teruntuk manusia teristimewa, Hairul Mafaid, terimakasih atas kesetiaanmu yang bak cakra tanpa henti berputar, mengingatkanku bahwa tujuan mulia ini hanya akan tercapai dengan semangat dan tekad yang teguh. Kamu adalah adikara, hadir sebagai pembimbing dalam mengarungi samudra perjuangan ini. Doa dan dukunganmu bagai mantra yang menenangkan gundah, memberikan keyakinan bahwa semua tantangan akan sirna dengan usaha yang tiada lelah. Skripsi ini kupersembahkan kepadamu, sang sahabat jiwa yang setia menemani meniti jalan ini. Semoga ikatan kita senantiasa menjadi gandharva, harmoni yang indah dan abadi dalam perjalanan kehidupan, terimakasih atas cinta dan baktimu yang tak bertepi.
7. Teruntuk diri sendiri yang telah bertahan sampai detik ini, hari ini penulis ingin berkata terimakasih. Terimakasih telah melalui malam-malam panjang penuh lelah, saat semua terasa begitu berat dan menyerah seolah menjadi pilihan termudah. Terimakasih sudah memilih untuk tetap bangkit meski langkah terasa berat, meski air mata sering kali menjadi teman dalam sunyi. penulis tau betapa kerasnya perjuangan ini, dari saat pertama menatap layar kebingungan hingga akhirnya lembar demi lembar kata ini tersusun. Perjalanan ini mengajarkan bahwa mimpi tidak pernah mengkhianati usaha dan bahwa diri penulis lebih kuat daripada yang pernah penulis kira. Terimakasih karena tidak menyerah meski rasa ragu dan takut sering kali menghantui. Terimakasih telah percaya bahwa setiap kesulitan yang datang hanyalah ujian untuk membuktikan betapa hebatnya diri ini. Penulis bangga,

sungguh bangga, pada diri yang terus melangkah meski dunia kadang terasa begitu sunyi. Hari ini, penulis persembahkan skripsi ini untuk diri sendiri sebagai bukti nyata bahwa penulis mampu. Ini adalah pengingat bahwa penulis pantas bermimpi, pantas memperjuangkan masa depan dan pantas merasa bangga atas semua yang telah dilalui. Teruslah bermimpi, teruslah percaya, karena perjalanan ini bukanlah akhir melainkan awal dari cerita yang lebih indah. Dan untuk semua yang sudah penulis lalui, penulis ingin berkata sekali lagi: terimakasih diriku.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kita panjatkan ke hadirat Allah Swt. yang telah memberikan rahmat, hidayah, serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal skripsi dengan judul “ **Analisis Fenomena Angin Putting Beliung Menggunakan Citra Satelit Himawari 8 (Studi Kasus Kecamatan Kalianget)**”.

Selawat dan salam semoga tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad saw. yang menjadi rahmat bagi seluruh alam.

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan serta motivasi dalam penyusunan proposal skripsi ini. Terimakasih kepada Bapak/Ibu Dosen Pembimbing, yang dengan penuh kesabaran dan kebijaksanaan telah memberikan arahan serta masukan yang berharga dalam proses penelitian ini. Tidak lupa pula, ucapan terimakasih kepada keluarga dan teman-teman yang selalu memberikan doa, semangat, dan dukungan moral. Keberhasilan penyusunan proposal ini tidak terlepas dari doa dan dukungan yang tak henti-hentinya penulis terima dari mereka. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. H. M. Zainuddin, MA. selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Ibu Prof. Dr. Hj. Sri Harini, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Bapak Dr. Imam Tazi, M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

4. Bapak Ahmad Luthfin, M.Si selaku Dosen Pembimbing Skripsi yang senantiasa sabar untuk meluangkan waktu dan membimbing tugas akhir ini sehingga penyusunan skripsi ini selesai.
5. Bapak Ahmad Abtokhi, M.Pd. selaku Dosen Pembimbing Integrasi Sains dan Islami yang telah membantu, memberikan masukan dan arahan terhadap permasalahan integrasi Al-Quran dalam skripsi ini.
6. Bapak Usman Kholid, M.Si selaku Kepala BMKG Sumenep yang telah mengizinkan penulis untuk mengambil data di BMKG Sumenep.
7. Mohammad Rizaldi Ainur Rahman, S.Tr. Met dan Dheajeng Margaretha, S.Tr. Ins selaku pembimbing PKL sekaligus membantu penulis dalam proses permintaan data.
8. Teman-teman jurusan Fisika angkatan 2020 yang membantu dan memberikan semangat dalam menyelesaikan skripsi ini.

Teriring doa dan harapan semoga apa yang telah mereka berikan kepada penulis mendapatkan balasan yang baik dari Allah Swt. Jazakumullah khoiron katsir. Penulis menyadari bahwasanya skripsi ini tentu jauh dari sempurna. Untuk itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi kesempurnaan skripsi penelitian ini. Terlepas dari segala kekurangan, semoga skripsi penelitian ini dapat memberikan informasi dan kontribusi positif serta bermanfaat kepada para pembaca khususnya kepada penulis sendiri. Aamiin.

Malang, 10 Desember 2024

Penulis,

Zumrotul Faizah

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
ABSTRAK	xviii
ABSTRACT	xix
مستخلص البحث.....	xx
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Manfaat Penelitian.....	7
1.5 Batasan Penelitian	8
 BAB II DASAR TEORI.....	 9
2.1 Karakteristik Dasar Kabupaten Sumenep	9
2.1.1 Topografi Kabupaten Sumenep.....	9
2.1.2 Geologi Kabupaten Sumenep.....	10
2.1.3 Tingkat Rawan Bencana Pada Kabupaten Sumenep.....	12
2.2 Gambaran Klimatologi Kabupaten Sumenep.....	14
2.2.1 Musim.....	14
2.2.2 Suhu Udara	15
2.2.3 Kelembaban udara	16
2.3 Angin.....	17
2.3.1 Faktor-Faktor Terjadinya Angin	22
2.3.2 Jenis-jenis Angin	26
2.4 Angin Puting Beliung.....	28
2.4.1 Karakteristik Angin Puting Beliung.....	29
2.4.2 Fase-fase Angin Puting Beliung.....	31
2.5 Awan Cumulonimbus (Cb)	32
2.6 Satelit Himawari 8.....	33
 BAB III METODE PENELITIAN	 36
3.1 Lokasi Penelitian	36
3.2 Alat dan Bahan	37
3.3 Data dan Metode	38

3.4	Tahapan Pengolahan Data	39
3.5	Diagram Alir	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		41
4.1	Analisis Proses Pergerakan, Pembentukan Awan Konvektif dan Perubahan Suhu Puncak Awan Berdasarkan CitraSatelit Himawari-8.....	41
4.1.1	Analisis Suhu Udara Permukaan	41
4.1.2	Analisis Tekanan Udara Permukaan	44
4.1.3	Analisis Kelembaban Relatif (RH).....	46
4.1.4	Analisis Citra Satelit Himawari-8	52
4.2	Analisis Dinamika Atmosfer Pada Kejadian Angin Puting Beliung..	60
4.2.1	Analisis Streamline Angin.....	60
4.2.2	Analisis K-Indeks dan Total-total (TT) indeks	68
4.3	Ibrah dan Hikmah dari Fenomena Angin Puting Beliung dalam Perspektif Al-Qur'an	73
BAB V PENUTUP.....		76
5.1	Kesimpulan.....	76
5.2	Saran.....	77
DAFTAR PUSTAKA.....		78
LAMPIRAN.....		81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Efek Coriolis yang timbul karena rotasi bumi mengakibatkan pembelokan arah angin.....	25
Gambar 2. 2	Angin Puting Beliung.....	29
Gambar 2. 3	Siklus Awan Cumulonimbus.....	32
Gambar 3. 1	Lokasi Penelitian	37
Gambar 3. 2	Tahapan Pengolahan Data	39
Gambar 3. 3	Diagram Alir Penelitian.....	40
Gambar 4. 1	Grafik Suhu Udara Permukaan Kecamatan Kalianget	41
Gambar 4. 2	Grafik Tekanan Udara Permukaan Kecamatan Kalianget.....	44
Gambar 4. 3	Nilai Skala RH pukul 05.00 UTC (12.00 WIB) pada lapisan 975 hPa di Kecamatan Kalianget	47
Gambar 4. 4	Nilai Skala RH pukul 06 UTC (13.00 WIB) pada lapisan 975 hpa di Kecamatan Kalianget.....	49
Gambar 4. 5	Nilai Skala RH pukul 07 UTC (14.00 WIB) pada lapisan 975 hpa di Kecamatan Kalianget.....	51
Gambar 4. 6	Himawari-8 IR Tutupan Awan 04.00 UTC (11.00 WIB) di Kecamatan Kalianget.....	53
Gambar 4. 7	Himawari-8 IR Tutupan Awan 05.00 UTC (12.00 WIB) di Kecamatan Kalianget.....	56
Gambar 4. 8	Himawari-8 IR Tutupan Awan 06.00 UTC (13.00 WIB) di Kecamatan Kalianget.....	58
Gambar 4. 9	Streamline angin sebelum terjadinya angin puting beliung di Kecamatan Kalianget 05.00 UTC (12.00 WIB)	60
Gambar 4. 10	Streamline angin saat terjadinya angin puting beliung di Kecamatan Kalianget 06.00 UTC (13.00 WIB)	63
Gambar 4. 11	Streamline angin setelah terjadinya angin puting beliung di Kecamatan Kalianget 07.00 UTC (14.00 WIB)	66
Gambar 4. 12	Peta K-Indeks di Kecamatan Kalianget.....	68
Gambar 4. 13	Peta Total-Total (TT) Indeks di Kecamatan Kalianget	71

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Skala Beaufort (BMKG, 2000)	20
Tabel 2. 2	Fungsi Band-Band Pada Satelit Himawari-8	34
Tabel 4. 1	Kriteria Nilai Indeks Stabilitas Atmosfer.....	68

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Tabel Data Suhu udara Permukaan 3 April 2021	82
Lampiran 2.	Tabel Data Tekanan Udara Permukaan 3 April 2021	83
Lampiran 3.	Proses pengolahan Data Kelembaban (Relative Humidity) di Software GrADS	84
Lampiran 4.	Proses pengolahan Data angin zonal-meridional di Software GrADS	86
Lampiran 5.	Proses Pengolahan Data Indekstabilitas Atmosfer	86

ABSTRAK

Faizah, Zumrotul. 2024. **Analisis Fenomena Angin Puting Beliung Menggunakan Citra Satelit Himawari-8 (Studi Kasus : Kecamatan Kalianget)**. Skripsi. Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Ahmad Luthfin, M.Si (II) Ahmad Abtokhi, M.Pd

Kata Kunci: Angin Puting Beliung, Satelit Himawari-8

Penelitian ini bertujuan untuk memahami dinamika atmosfer, proses pembentukan awan konvektif, perubahan suhu puncak awan dan pola pergerakan angin selama kejadian angin puting beliung. Data yang digunakan meliputi suhu udara permukaan, tekanan udara, kelembaban relatif, indeks stabilitas atmosfer (K-Indeks dan TT-Indeks), serta data citra satelit himawari-8 yang dianalisis menggunakan perangkat lunak GrADS, SATAID, dan Microsoft Excel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kejadian angin puting beliung di Kalianget di pengaruhi oleh ketidakstabilan atmosfer yang signifikan. Analisis suhu udara permukaan menunjukkan peningkatan suhu hingga 30-32°C sebelum kejadian, menciptakan perbedaan tekanan udara yang ekstrem. Tekanan udara permukaan turun hingga 1008 hPa, yang menunjukkan adanya daerah tekanan rendah lokal. Kelembaban relatif di lapisan atmosfer menengah hingga atas mencapai 70-90%, memperkuat kondisi pembentukan awan konvektif. Indeks stabilitas atmosfer yang diukur menggunakan K-Indeks dan TT-Indeks mengungkapkan nilai K-Indeks sebesar 35-40 dan TT-Indeks sebesar 50-55, mengindikasikan potensi besar untuk terjadinya badai. Analisis streamline angin menunjukkan pola konvergensi dengan kecepatan angin mencapai 30-40 knot, mendukung pembentukan pusaran angin. Citra satelit Himawari-8 mengidentifikasi perubahan suhu puncak awan hingga -60°C, menandakan keberadaan awan cumulonimbus (Cb) aktif yang terkait dengan kejadian angin puting beliung.

ABSTRACT

Faizah, Zumrotul. 2024. **Analysis of Tornado Phenomena Using Himawari-8 Satellite Images (Case Study: Kalianget District)**. Thesis. Physics Study Program, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University Malang. Supervisor: (I) Ahmad Luthfin, M.Si (II) Ahmad Abtokhi, M.Pd

Keywords: Tornado, Himawari-8 Satellite

This study aims to understand atmospheric dynamics, the process of convective cloud formation, changes in cloud peak temperature and wind movement patterns during tornadoes. The data used included surface air temperature, air pressure, relative humidity, atmospheric stability index (K-Index and TT-Index), as well as Himawari-8 satellite image data analyzed using GrADS, SATAID, and Microsoft Excel software. The results show that the occurrence of tornadoes in Kalianget is influenced by significant atmospheric instability. Analysis of surface air temperature showed an increase in temperature of up to 30-32°C before the event, creating extreme air pressure differences. The surface air pressure drops to 1008 hPa, which indicates the presence of a local area of low pressure. The relative humidity in the middle to upper atmospheric layer reaches 70-90%, reinforcing the conditions for convective cloud formation. The atmospheric stability index measured using the K-Index and TT-Index reveals a K-Index value of 35-40 and a TT-Index of 50-55, indicating a great potential for storms. The wind streamline analysis showed a convergence pattern with wind speeds reaching 30-40 knots, supporting the formation of wind vortices. Himawari-8 satellite imagery identifies changes in cloud peak temperatures down to -60°C, signaling the presence of active cumulonimbus (Cb) clouds associated with tornado events.

مستخلص البحث

فائزة ، زمرة. 2024. تحليل ظواهر الإعصار باستخدام صور الأقمار الصناعية Himawari-8 (دراسة حالة: منطقة Kaliaanget). اطروحه. برنامج دراسة الفيزياء ، كلية العلوم والتكنولوجيا ، بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف الاول: أحمد لطفين، الماجستير. المشرف الثاني أحمد أبطخي، الماجستير.

الكلمات المفتاحية: تورنادو ، القمر الصناعي Himawari-8

تهدف هذه الدراسة إلى فهم ديناميكيات الغلاف الجوي ، وعملية تكوين السحب الحرارية ، والتغيرات في درجة حرارة ذروة السحب وأنماط حركة الرياح أثناء الأعاصير. تضمنت البيانات المستخدمة درجة حرارة الهواء السطحي وضغط الهواء والرطوبة النسبية ومؤشر الاستقرار الجوي (K-Index و TT-Index) ، بالإضافة إلى بيانات صور الأقمار الصناعية Himawari-8 التي تم تحليلها باستخدام برامج GrADS و SATAID و Microsoft Excel. تظهر النتائج أن حدوث الأعاصير في كاليانجيت يتأثر بعدم الاستقرار الجوي الكبير. أظهر تحليل درجة حرارة الهواء السطحي زيادة في درجة الحرارة تصل إلى 30-32 درجة مئوية قبل الحدث ، مما أدى إلى اختلافات شديدة في ضغط الهواء. ينخفض ضغط الهواء السطحي إلى 1008 هكتوباسكال ، مما يشير إلى وجود منطقة محلية ذات ضغط منخفض. تصل الرطوبة النسبية في الطبقة الوسطى إلى الطبقة الجوية العليا إلى 70-90٪ ، مما يعزز ظروف تكوين السحب الحرارية. يكشف مؤشر الاستقرار الجوي الذي تم قياسه باستخدام K-Index و TT-Index عن قيمة K-Index من 40-35 ومؤشر TT من 50-55 ، مما يشير إلى احتمال كبير للعواصف. أظهر تحليل انسيابية الرياح نمط تقارب مع سرعة رياح تصل إلى 30-40 عقدة ، مما يدعم تكوين دوامات الرياح. تحدد صور الأقمار الصناعية Himawari-8 التغيرات في درجات حرارة ذروة السحب حتى -60 درجة مئوية ، مما يشير إلى وجود سحب ركامية نشطة (Cb) مرتبطة بأحداث الإعصار.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan wilayah yang dilalui oleh Ring of Fire, sehingga menyebabkan wilayah Indonesia menjadi rawan bencana Geo-hidrometeorologi. Suatu kondisi cuaca dianggap ekstrem jika komponen-komponennya berada di atas ambang batas yang telah ditetapkan, yang dapat menyebabkan bencana hidrometeorologi (BMKG, 2010). Mengingat iklim tropis Indonesia, garis bujur dan garis lintang suatu lokasi merupakan variabel yang mempengaruhi kemungkinan terjadinya bencana (Nurjani dkk, 2013).

Undang-undang Nomor 24 tahun 2007 mendefinisikan bencana sebagai serangkaian kejadian yang mengancam kehidupan manusia dan mempunyai akibat yakni karena kekuatan alam maupun non alam yang mengakibatkan kematian, kerugian harta benda, kerugian psikis, atau kerusakan alam. Salah satu cuaca ekstrem adalah puting beliung. Puting beliung adalah kejadian cuaca ekstrem dimana angin kencang berputar dari awan cumulonimbus dengan kecepatan lebih dari 34,8 knot atau 64,4 km/jam dan terjadi dalam waktu yang singkat (BMKG, 2010). Tornado adalah fenomena angin yang berputar dengan kecepatan lebih dari 60-90 km/jam dan berlangsung sekitar 5-10 menit karena perbedaan tekanan yang sangat besar di area terbatas yang berkembang di sekitar awan cumulonimbus (Sudibyakto, 2018). Angin ini disebut bencana karena kecepatan hembusan angin tersebut dapat menghancurkan suatu benda yang terdapat pada lingkungan hidup, misalnya kerusakan bangunan rumah, fasilitas umum dan bangunan serta akibat pohon yang tumbang.

Terjadinya puting beliung atau yang sering disebut tornado kecil, tidak mungkin dapat dipisahkan dari variabel terkait cuaca lainnya termasuk tekanan rendah, suhu dan awan Cumulonimbus (Cb). Letak suatu wilayah dalam kaitannya dengan lokasi lain di sekitarnya kemungkinan besar juga berperan dalam terjadinya angin puting beliung. Terkait dengan posisi kawasan dan angin, Nirkayanto (1979) menyatakan bahwa kecepatan tinggi disebabkan oleh perbedaan tekanan yang signifikan antara dua lokasi yang berdekatan, sehingga angin ribut tersebut menimbulkan daya rusak terhadap berbagai media dilaluinya.

Menurut penelitian meteorologi, angin puting beliung merupakan salah satu kekuatan alam yang menjadi ciri ketidakstabilan atmosfer. surah Al-Ahqaf ayat 24 merupakan salah satu ayat dalam Al-Quran yang menggambarkan kerasnya angin yang menimpa suatu kaum sebagai adzab. Allah berfirman:

فَلَمَّا رَأَوْهُ عَارِضًا مُّسْتَقْبِلَ أَوْدِيَّتِهِمْ قَالَُوا هَذَا عَارِضٌ مُّمْطِرُنَا ۚ بَلْ هُوَ مَا اسْتَعْجَلْتُمْ بِهِ رِيحٌ فِيْهَا عَذَابٌ أَلِيمٌ

Artinya: *“Maka ketika mereka melihat adzab itu berupa awan yang menuju ke lembah-lembah mereka, mereka berkata: “Inilah awan yang akan menurunkan hujan kepada kami”. (Bukan!), tetapi itu adzab yang kamu minta agar disegerakan kedatangannya, (yaitu) angin yang mengandung adzab yang sangat pedih. (Q.S. Al-Ahzab:24).*

Ayat ini menggambarkan kaum ‘Aad meyakini awan yang mendekati tanah mereka akan membawa hujan yang sangat baik. Namun apa yang mereka yakini sebagai berkah, ternyata merupakan hukuman berupa angin puting beliung dan merusak. Hal ini terkait dengan terjadinya angin puting beliung yang awalnya tampak seperti awan hujan biasa dan sering kali disertai awan cumulonimbus yang besar. Perkembangan awan tebal memicu siklus angin dalam fenomena angin

puting beliung, yang selanjutnya mengintensifkan pergerakan angin. Angin menjadi destruktif saat mencapai kecepatan yang luar biasa yang mampu menghancurkan apapun yang dilaluinya. Ayat ini menggambarkan bahwasanya manusia sering kali salah menafsirkan tanda-tanda alam dan atas kehendak Allah kekuatan alam yang tampaknya tidak berbahaya dapat berubah menjadi hukuman yang membawa bencana.

Menurut fisika, angin adalah aliran udara dalam bentuk tertentu antara dua area atau tempat dengan suhu yang berbeda. Terjadinya aliran udara yang terus menerus dari tekanan tinggi ke tekanan rendah sebagai akibat dari perubahan tekanan udara yang disebabkan oleh variasi suhu di atmosfer. Apabila terjadi perbedaan suhu yang besar (misalnya, terlalu tinggi di atmosfer) maka arus udara atau angin meningkat. Berikut ini adalah ikhtisar singkat tentang angin yang sangat merusak seperti badai.

Angin merupakan penyebab utama terbentuknya awan. Angin berperan dalam fase awal pembentukan awan, akumulasi, pengangkatan ke lapisan atmosfer atas, penggabungan partikel dan transformasi menjadi ion listrik.

Ayat 22 Surah yunus merupakan salah satu dari sekian banyak ayat dalam Al-Quran yang membahas tentang kejadian alam dalam kaitannya dengan ilmu meteorologi. Ayat ini membahas tentang kemampuan Allah dalam mengendalikan alam semesta, termasuk angin dan badai yang sering terjadi di laut. Allah berfirman:

هُوَ الَّذِي يُسَيِّرُكُمْ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ حَتَّىٰ إِذَا كُنْتُمْ فِي الْفُلِّ وَجَرْتُمْ بِهِمْ بِرِيحٍ طَبَئَةٍ وَفَرِحُوا بِهَا
جَاءَتْهَا رِيحٌ عَاصِفٌ وَجَاءَهُمُ الْمَوْجُ مِنْ كُلِّ مَكَانٍ وَظَنُّوا أَنَّهُمْ أُحِيطَ بِهِمْ دَعَوُا اللَّهَ مُخْلِصِينَ لَهُ الدِّينَ
لَقَدْ أَنْجَبْنَا مِنْ هَذِهِ لَنُكَوِّنَنَّ مِنَ الشَّاكِرِينَ

Artinya: *“Dialah yang menjadikan kamu dapat berjalan di darat dan di laut. Sehingga apabila kamu berada di dalam bahtera, dan meluncurlah bahtera itu membawa mereka dengan hembusan angin yang baik dan mereka bergembira karenanya, tiba-tiba datanglah kepada mereka angin badai, dan (apabila) gelombang datang menimpa mereka dari segenap penjuru, dan mereka yakin bahwa mereka telah dikepung (bahaya), maka mereka berdoa kepada Allah dengan mengikhhlaskan ketaatan kepada-Nya semata-mata. (Mereka berkata): “Sesungguhnya jika Engkau menyelamatkan kami dari bahaya ini, pastilah kami akan termasuk orang-orang yang bersyukur”. (QS. Yunus:22)*

Menurut ayat ini, angin merupakan kekuatan yang mula-mula mendatangkan kenikmatan, namun atas kehendak Allah dapat berubah menjadi bencana. Keadaan ini dapat disamakan dengan fenomena angin puting beliung yang dapat berubah dari badai angin yang tenang dan menjadi angin puting beliung yang dahsyat dan menakutkan. Variasi suhu dan tekanan yang ekstrem serta ketidakstabilan udara, merupakan penyebab atmosferik dari angin puting beliung. Mirip dengan uraian dalam ayat diatas, proses ini dapat dijelaskan secara ilmiah melalui pergerakan angin yang awalnya tenang sebelum tiba-tiba menguat. Angin pertama-tama memberikan ketenangan dan kesejukan saat kondisi atmosfer stabil Namun angin dapat menjadi sangat kencang dan berubah menjadi puting beliung saat terjadi ketidakstabilan seperti kenaikan suhu udara yang tajam di permukaan. Hal ini cukup berkaitan dengan ayat Al-Quran yang membahas tentang angin dapat menyebabkan perubahan mendadak dari keadaan yang menguntungkan menjadi keadaan yang membahayakan.

Wilayah Kabupaten Sumenep yang terdiri dari 8 kecamatan kepulauan, 19 kecamatan daratan dan 27 kelurahan, terletak di titik paling timur pulau Madura. Dengan selat Madura dan Laut Bali di sebelah selatan, Laut Jawa dan Provinsi Kalimantan Selatan di sebelah barat, Kabupaten Pamekasan di sebelah timur, Laut

Jawa dan Laut Flores di sebelah barat, Kabupaten Sumenep terletak diantara $113^{\circ} 32'$ dan $116^{\circ} 16'$ Bujur Timur serta $4^{\circ} 55'$ dan $7^{\circ} 24'$ Lintang Selatan.

Salah satu daerah di Indonesia yang rawan terhadap angin puting beliung adalah Kabupaten Sumenep. Sebagian besar wilayah Kabupaten Sumenep berupa kepulauan dataran rendah, dan memiliki sejumlah fitur topografi yang memengaruhi cuaca setempat dan risiko angin puting beliung.

Kecamatan Kalianget merupakan salah satu kecamatan yang rawan terjadi angin puting beliung di Kabupaten Sumenep. Wilayah pesisir utara meliputi Kecamatan Kalianget. Secara umum, Kalianget merupakan wilayah dataran rendah dengan ketinggian antara 0 sampai 25 meter di atas permukaan laut. Angin puting beliung sering terjadi di wilayah ini karena adanya kombinasi angin darat dan angin laut yang dapat memperparah angin puting beliung, terutama di wilayah pesisir utara.

Angin puting beliung tersebut terjadi sangat cepat dan bersifat lokal, terutama di wilayah dataran rendah seperti Desa Pinggir Papas dan Desa Karanganyar, Kecamatan Kalianget, menurut Abd Rahman, Kepala BPBD Pemerintah Kabupaten Sumenep. Angin puting beliung tersebut menghancurkan 20 bangunan milik penduduk di kedua desa tersebut dan mengakibatkan tiga orang warga luka ringan saat menghantam mereka sekitar pukul 13.00 WIB pada hari Sabtu, 3 April 2021. Oleh karena itu, kajian analisis kejadian angin puting beliung dengan memanfaatkan data satelit Himawari 8 di Kabupaten Sumenep sangat penting untuk memahami pola dan karakteristik angin puting beliung serta mengembangkan sistem peringatan dini yang efektif.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa citra satelit himawari-8 dapat digunakan untuk melacak fenomena cuaca ekstrem seperti angin puting beliung. Misalnya, penelitian sebelumnya telah menggunakan citra satelit Himawari 8 untuk menyelidiki kejadian angin puting beliung di berbagai daerah di Indonesia, seperti Kota Bogor, Daerah Istimewa Yogyakarta, dan Bangkalan. Dengan meneliti citra satelit Himawari 8, penelitian ini dapat mengidentifikasi karakteristik dan pola angin puting beliung serta faktor-faktor yang memengaruhi kejadiannya. Selain itu, data mengenai suhu udara permukaan dan variabel atmosfer selama tornado telah dikumpulkan melalui penggunaan perangkat lunak seperti SATAID untuk menganalisis rekaman satelit Himawari 8. Data dari citra satelit Himawari 8 dapat digunakan untuk lebih memahami dinamika atmosfer, seperti perubahan suhu puncak awan dan pembentukan awan konvektif. Oleh karena itu, peneliti tertarik untuk meneliti judul "Analisis Fenomena Angin Putting beliung Menggunakan Citra Satelit Himawari 8 (Studi Kasus Kabupaten Kalianget)" berdasarkan temuan penelitian ini.

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode analisis citra satelit Himawari 8 yang berfungsi untuk membantu dalam mengidentifikasi pola dan karakteristik angin puting beliung serta faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya fenomena tersebut.

Peneliti bermaksud menggunakan pendekatan ini untuk meningkatkan akurasi dan keakuratan informasi yang diperoleh untuk pemantauan dan prediksi angin puting beliung serta mendapatkan informasi lebih lengkap mengenai kondisi atmosfer saat terjadi angin puting beliung termasuk suhu permukaan udara, karakteristik awan dan dinamika atmosfer. Metode ini memiliki kelebihan dalam

menganalisis kejadian angin puting beliung seperti akurasi data, luas jangkauan, real time monitoring, dan efisiensi waktu dan biaya. Namun selain itu metode ini juga memiliki kekurangan dalam menganalisis kejadian angin puting beliung seperti keterbatasan resolusi, ketergantungan pada kondisi cuaca, dan keterbatasan dalam identifikasi sehingga metode ini perlu dikombinasikan dengan metode lain untuk memperoleh informasi yang lebih lengkap dan akurat tentang kejadian angin puting beliung.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka yang menjadi pokok permasalahan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana proses pergerakan, pembentukan awan konvektif, perubahan suhu puncak awan terhadap keadaan atmosfer berdasarkan citra satelit Himawari-8?
2. Bagaimana dinamika atmosfer pada saat kejadian angin puting beliung?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui proses pergerakan, pembentukan awan konvektif, perubahan suhu puncak awan terhadap keadaan atmosfer berdasarkan data citra satelit Himawari-8
2. Untuk mengetahui dinamika atmosfer pada saat kejadian angin puting beliung

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian di atas maka manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Sebagai sumber informasi mengenai kondisi atmosfer di kota Sumenep
2. Memberikan manfaat yang nyata bagi masyarakat, baik dalam hal peringatan dini, mitigasi bencana, peningkatan kesadaran, maupun pengembangan sistem perlindungan masyarakat
3. Menjadi informasi dan referensi bagi peneliti selanjutnya terutama dalam bidang penelitian terkait

1.5 Batasan Penelitian

Adapun batasan penelitian dalam penelitian ini adalah :

1. Fokus penelitian terbatas pada wilayah Kecamatan Kalianget sebagai lokasi studi. Batasan ini memungkinkan penelitian lebih terfokus dan relevan dengan kondisi spesifik di Kecamatan Kalianget.
2. Penelitian menggunakan data citra satelit himawari 8 sebagai sumber utama informasi. Batasan ini mencakup jenis citra, resolusi spasial, dan frekuensi pemantauan.
3. Penelitian difokuskan pada analisis angin putting beliung, termasuk identifikasi dan pemetaan pola gerak serta kecepatan angin yang terkait dengan kejadian tersebut.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Karakteristik Dasar Kabupaten Sumenep

2.1.1 Topografi Kabupaten Sumenep

Kabupaten sumenep memiliki karakteristik topografi yang bervariasi, meliputi dataran rendah, wilayah kepulauan, serta didukung oleh berbagai fasilitas transportasi. Kondisi topografi tersebut, yang didominasi oleh dataran rendah dan kepulauan, berperan dalam mempengaruhi pola cuaca lokal serta potensi terjadinya fenomena angin puting beliung. Secara administratif, Kabupaten Sumenep terdiri dari 330 desa, 4 kelurahan, dan 27 kecamatan. Sebagai wilayah kepulauan, sumenep memiliki 126 pulau, 48 pulau berpenghuni dan 78 pulau lainnya tidak berpenghuni. Terminal Bus Arya Wiraraja, sebagai terminal bus tipe A terbesar di kabupaten Sumenep, merupakan salah satu sarana transportasi darat yang berperan penting dalam mendukung mobilitas masyarakat. Selain itu, pelabuhan Kalianget menjadi fasilitas transportasi laut yang mempermudah konektivitas antara daratan Sumenep dan wilayah kepulauan sekitarnya. Di sisi lain, pengembangan bandara Trunojoyo di Kabupaten Sumenep terus dilakukan sebagai upaya meningkatkan aksesibilitas transportasi udara. Meskipun kabupaten sumenep memiliki berbagai potensi ekonomi, seperti sektor pariwisata pantai dan pemanfaatan sumber daya alam, tantangan masih dihadapi, salah satunya adalah tingginya angka kemiskinan di wilayah tersebut.

2.1.2 Geologi Kabupaten Sumenep

Kabupaten Sumenep memiliki berbagai jenis struktur tanah, diantaranya tanah alluvial, mediteran, grumosol dan regosol. Berdasarkan informasi dari situs Kim Putra Jaya Dasuk, jenis tanah yang mendominasi wilayah Kabupaten Sumenep adalah tanah alluvial, mediteran, grumosol, dan regosol.

1. Alluvial

Tanah Alluvial merupakan salah satu jenis tanah yang terbentuk di dataran rendah dan berasal dari endapan material lumpur sungai akibat proses erosi. Jenis tanah ini memiliki karakteristik tekstur yang lebih halus dibandingkan pasir lempung jika diendapkan pada kedalaman 25-100 cm di bawah permukaan tanah mineral. Tanah alluvial cenderung memiliki pH rendah, berkisar antara 5,3-5,8 dengan warna abu-abu kecoklatan. Tanah ini bersifat keras ketika dalam kondisi kering dan memiliki konsentrasi mineral yang tinggi. Secara umum, tanah alluvial tergolong subur sehingga sangat cocok untuk mendukung sistem pertanian intensif.

2. Mediteran

Tanah mediteran yang juga dikenal sebagai tanah alfisol merupakan jenis tanah yang terbentuk dari bahan induk batuan vulkanik berkapur dengan kandungan karbonat yang tinggi. Tanah ini memiliki ciri khas berwarna abu-abu dan kaya akan kandungan aluminium, besi, air, serta bahan organik sehingga tergolong subur. Alfisol berkembang dengan baik di lingkungan yang lembab hingga sedikit lembab dengan curah hujan tahunan berkisar antara 500 hingga 1300 mm. Jenis tanah ini sering ditemukan dibawah vegetasi hutan, dengan karakteristik akumulasi lempung pada horizon Bt dan

horizon E yang tipis. Tanah alfisol juga mampu menahan serta menyuplai air dengan baik, namun cenderung bersifat asam. Permukaan tanahnya serta bahan induknya yang berupa kapur menyebabkan porositasnya relatif rendah.

3. Grumusol

Tanah Grumusol merupakan jenis tanah bertekstur halus dengan bahan dasar lempung yang berasal dari tuffa vulkanik dan batuan induk berupa gamping. Tanah ini memiliki PH basa, sehingga cenderung kekurangan bahan organik dan unsur hara. Meskipun demikian tanah grumusol yang berwarna gelap hingga abu-abu tetap kaya akan unsur hara. Secara struktur, tanah ini terdiri atas lapisan bawah yang padat atau menggumpal serta lapisan atas yang berbutir. Tanah grumusol terbentuk melalui proses pelapukan batuan yang berlangsung selama jutaan tahun, dan sering kali ditemukan di permukaan bumi. Berdasarkan buku Geografi Membuka Cakrawala Dunia Bagi Siswa (Bambang, 2006), tanah ini dapat ditemukan pada ketinggian sekitar 2000 meter di atas permukaan laut.

4. Regosol

Tanah regosol atau tanah mineral yang belum berkembang, memiliki tekstur berpasir dengan kandungan pasir lebih dari 60% hingga kedalaman 25–100 cm. Terkadang, tanah ini ditemukan bersama lapisan pasir dan kerikil atau kerikil yang permeabel. Bahan utama pembentuk tanah regosol meliputi pasir pantai, batu bara, dan abu vulkanik. Kandungan unsur hara tanah ini sebagian besar bergantung pada jenis bahan induknya. Sifatnya yang mudah larut sering menyebabkan rendahnya kandungan unsur hara, seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), dan magnesium (Mg), terutama pada tanah

dengan tekstur yang lebih kasar. Selain kekurangan unsur hara, kendala lain dalam pemanfaatan tanah ini adalah terbatasnya ketersediaan air. Salah satu metode pengelolaan yang efektif untuk meningkatkan kualitas tanah regosol adalah dengan menambahkan bahan organik dalam jumlah besar (Wahyu Dwi Widodo, 2020).

2.1.3 Tingkat Rawan Bencana Pada Kabupaten Sumenep

Berdasarkan data dari BPBD Kabupaten Sumenep, jenis bencana alam yang sering terjadi di wilayah tersebut meliputi banjir, angin puting beliung, tanah longor, abrasi pantai, dan kekeringan.

1. Banjir

Beberapa wilayah di Kabupaten Sumenep yang rawan terhadap bencana banjir meliputi Kecamatan Batuan, Lenteng, Dungkek, Desa Nambakor, Kecamatan Saronggi, Desa Patean, Kecamatan Batuan, Ganding, Pragaan, Guluk-Guluk, dan Rubaru. Banjir di Kabupaten Sumenep berdampak pada kerusakan infrastruktur, tersumbatnya akses jalan, serta terganggunya aktivitas sehari-hari akibat genangan air. Kabupaten Sumenep telah mengalami beberapa kejadian banjir, termasuk pada bulan April dan awal tahun 2023. Fenomena ini menunjukkan bahwa banjir di Kabupaten Sumenep tidak hanya terjadi pada periode tertentu. Beberapa faktor yang menyebabkan banjir di wilayah ini meliputi tingginya curah hujan, sistem drainase yang kurang memadai, serta tidak optimalnya sistem irigasi untuk mengalirkan air.

2. Tanah Longsor

Menurut Kepala BPBD Kabupaten Sumenep, Kecamatan Rubaru dan Guluk-Guluk merupakan wilayah yang paling sering mengalami bencana tanah longsor. Selain itu, berdasarkan data statistik BPBD Kabupaten Sumenep, tanah longsor juga sering terjadi di Kecamatan Ganding dan Pragaan. Faktor utama penyebab longsor di kawasan tersebut adalah tingginya curah hujan serta kondisi topografi yang berupa pegunungan. Kerusakan infrastruktur, seperti jalan dan saluran irigasi, juga berkontribusi dalam memperburuk kondisi tersebut.

3. Abrasi Laut

Abrasi laut di Kabupaten Sumenep disebabkan oleh terkikisnya garis pantai akibat pengaruh gelombang besar dan angin kencang (Kominfo News Room). Fenomena ini terutama terjadi di daerah pemukiman padat penduduk yang terletak di bagian utara Pulau Ra'as. Ratna Indrawasih (2012) juga menyatakan bahwa abrasi di wilayah tersebut kemungkinan besar dipengaruhi oleh dampak perubahan iklim. Dampak dari abrasi laut ini mencakup kerusakan pada sektor pariwisata di kawasan pantai utara Kabupaten Sumenep. Selain itu, kawasan pemukiman yang berada di sepanjang garis pantai, seperti di Pulau Ra'as, berisiko tinggi terkena erosi laut.

4. Kekeringan

Kabupaten Sumenep saat ini menghadapi kondisi kekeringan yang dipengaruhi oleh dampak fenomena El Nino. Kekeringan di wilayah ini telah berlangsung sejak bulan Juni dan memberikan dampak signifikan bagi

masyarakat di beberapa daerah. Berdasarkan data Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Sumenep, jumlah masyarakat yang terdampak kekeringan terus mengalami peningkatan. Selain itu, perubahan iklim diduga turut memengaruhi terjadinya kekeringan di wilayah tersebut. Dampak meluasnya area terdampak kekeringan salah satunya adalah terganggunya akses masyarakat terhadap air bersih, yang menjadi salah satu permasalahan utama akibat fenomena ini.

2.2 Gambaran Klimatologi Kabupaten Sumenep

2.2.1 Musim

Kabupaten Sumenep memiliki dua musim utama, yaitu musim hujan dan musim kemarau. Berdasarkan perkiraan, musim hujan di wilayah ini dimulai pada pertengahan November dan berakhir pada awal Desember (Firdausi, 2023).

Peralihan arah angin muson dari angin timur (muson Australia) ke angin barat (muson Asia) merupakan salah satu faktor yang menyebabkan fenomena tersebut. Perkiraan ini mengacu pada keragaman iklim yang tinggi di Indonesia, serta dampak fenomena El Nino yang mengakibatkan perpanjangan musim kemarau hingga November 2023.

Musim kemarau diperkirakan akan terjadi pada bulan April dan Mei, yang didasarkan pada peralihan angin muson dari angin barat (monsun Asia) ke angin timur (monsun Australia). Prediksi ini juga mempertimbangkan keragaman iklim yang signifikan di Indonesia, serta dampak fenomena El Nino yang menyebabkan perpanjangan musim kemarau hingga November 2023.

2.2.2 Suhu Udara

Untuk keperluan operasional klimatologi di Indonesia, perhitungan suhu udara permukaan rata-rata harian dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.1, khususnya pada stasiun yang beroperasi kurang dari 24 jam sehari.

$$T_{\text{mean}} = \frac{2 \cdot T_7 + T_{13} + T_{18}}{4} \quad (2.1)$$

Dengan:

T_{mean} = suhu udara permukaan rata rata harian (°)

T_7 = suhu udara pengamatan jam 07.00 LT

T_{13} = suhu udara pengamatan jam 13.00 LT

T_{18} = suhu udara pengamatan jam 18.00 LT

Variabel-variabel berikut ini akan mempengaruhi suhu udara pada suatu lokasi di permukaan bumi (Tanudidjaja, 1993) :

a. Lamanya penyinaran matahari

Wilayah akan menyerap lebih banyak panas seiring dengan durasi paparan sinar matahari yang lebih lama. Pada siang hari yang cerah, mulai dari fajar hingga senja, suhu atmosfer cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan siang hari yang diliputi awan atau mendung.

b. Kemiringan sinar matahari

Daerah yang mataharinya tegak lurus dengan permukaan tanah akan memperoleh radiasi matahari lebih banyak dan suhunya lebih tinggi daripada daerah yang mataharinya lebih condong.

c. Keadaan awan

Saat awan hadir di atmosfer, radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi akan berkurang. Radiasi yang masuk ke awan akan menyebabkan uap air dipantulkan, diserap, dan didistribusikan.

d. Keadaan permukaan bumi

Penyerapan dan pemantulan radiasi matahari bervariasi tergantung pada karakteristik daratan dan lautan. Perbedaan suhu udara di atas permukaan tanah terjadi karena proses penyerapan dan pelepasan energi panas dari radiasi matahari yang berlangsung lebih cepat di permukaan tanah.

2.2.3 Kelembaban udara

Kelembaban adalah ukuran jumlah uap air di atmosfer. Jumlah air di udara dikenal sebagai kelembaban. Jumlah air yang tinggi di atmosfer disebabkan oleh uap air. Jumlah air yang tersimpan di atmosfer sangat dipengaruhi oleh suhu. Suhu yang rendah memungkinkan uap air meresap ke udara dengan lebih mudah. Ketika udara mulai jenuh, keadaan ini muncul. Karena perubahan tekanan, pergerakan angin memengaruhi suhu ruangan. Setelah udara dingin menyusut pada malam hari, udara yang lebih ringan mengembang sepanjang hari dan digantikan oleh udara yang lebih dingin. Suhu, kualitas dan kuantitas cahaya, angin, tekanan udara, vegetasi, dan ketersediaan air tanah merupakan enam komponen yang diidentifikasi oleh Sankertadi (2013) dan Soegijono (1999). Sudah diketahui bahwa unsur-unsur ini memengaruhi kelembaban udara di suatu daerah.

Kelembaban udara adalah jumlah uap air di udara atau lingkungan. Jumlah tersebut dipengaruhi oleh air tanah yang mengeluarkan uap air ke udara serta penguapan air dari danau, sungai, dan laut. Selain itu, kelembaban udara juga

terbentuk dari proses transpirasi, yaitu penguapan tanaman. Jumlah air di udara juga dipengaruhi oleh sejumlah unsur lain, termasuk angin, suhu udara, tekanan udara, sumber uap, dan ketersediaan air. Uap air di udara dapat berubah menjadi cair atau padat dan akhirnya jatuh ke tanah sebagai hujan. Jelaslah bahwa terdapat banyak uap air atau udara lembap jika udara cukup lembap.

Kelembaban udara relatif merupakan salah satu ukuran yang dapat digunakan untuk menunjukkan nilai kelembaban udara. Menurut Wirjohamidjojo (2006), kelembaban udara relatif merupakan selisih antara tekanan uap air (e) pada saat pengukuran dengan nilai tekanan uap air maksimum (e_m) yang dapat dicapai pada suhu dan tekanan udara tertentu saat Rumus untuk kelembaban relatif udara adalah sebagai berikut :

$$RH = \frac{e}{e_m} \times 100 \quad (2.2)$$

Dengan :

RH = kelembapan udara relatif (%)

e = tekanan uap air pada saat pengukuran (mb)

e_m = tekanan uap air maksimum yang dapat dicapai pada suhu udara dan tekanan udara saat pengukuran (mb).

2.3 Angin

Singkatnya, angin adalah pergerakan udara. Menurut pakar cuaca Prancis Buys Ballot, massa udara yang bergerak dari wilayah bertekanan paling tinggi ke wilayah bertekanan paling rendah disebut angin. Angin didefinisikan sebagai pergerakan horizontal massa udara. Salah satu instrumen untuk mengukur kecepatan angin adalah anemometer cangkir. Kecepatan angin umumnya diukur dalam knot (1 knot = 0,5148 m/s = 1,854 km/jam) atau kilometer per jam.

Angin adalah pergerakan udara yang disebabkan oleh perubahan tekanan di permukaan bumi. Dari daerah bertekanan udara tinggi ke daerah bertekanan udara rendah, angin akan bertiup. Di permukaan bumi, hembusan angin disebabkan oleh perbedaan penerimaan. Radiasi matahari adalah penyebab perubahan suhu di atmosfer.

Angin adalah aliran udara yang sejajar dengan permukaan bumi. Udara mengalir dari daerah bertegangan tinggi ke daerah bertegangan rendah. Menurut Tjasyono (1999), "angin" menggambarkan arah angin bertiup; misalnya, "angin timur" menggambarkan angin yang datang dari timur, "angin laut" menggambarkan angin yang datang dari laut ke darat, dan "angin lembah" menggambarkan angin yang datang dari lembah yang mendaki gunung.

Pergerakan udara terjadi akibat perubahan tekanan yang disebabkan oleh perubahan suhu udara. Perbedaan suhu antara siang dan malam merupakan penggerak utama sistem angin harian. Udara di atas daratan yang tinggi (pegunungan) dan di dataran rendah (lembah) dapat memiliki suhu yang berbeda akibat fenomena ini, demikian pula udara di atas laut (Tjasyono, 2006).

Angin merupakan besaran vektor yang mempunyai arah dan kecepatan. Arah angin dinyatakan dalam satuan derajat (Tjasyono, 1999), yaitu 360° (Utara), $22,5^{\circ}$ (Utara Timur Laut), 45° (Timur Laut), $67,5^{\circ}$ (Timur Timur Laut), 90° (Timur), $112,5^{\circ}$ (Timur Tenggara), 135° (Tenggara), $157,5^{\circ}$ (Selatan Tenggara), 180° (Selatan), $202,5^{\circ}$ (Selatan Barat Daya), 225° (Barat Daya), $247,5^{\circ}$ (Barat Barat Daya), 270° (Barat), $292,5^{\circ}$ (Barat Barat laut), 315° (Barat Laut), $337,5^{\circ}$ (Utara Barat Laut), 0° (Angin Tenang/Calm). Secara klimatologis arah angin diamati 8 penjuru, tetapi dalam dunia penerbangan angin diamati 16 arah. Kecepatan angin

dinyatakan dalam satuan meter per sekon, kilometer per jam, atau knot (1 knot 0,5 m/s).

Arah angin adalah arah darimana angin bertiup atau darimana datangnya arus angin yang dikomunikasikan tidak diatur secara searah jarum jam dan dimulai dari titik utara bumi sehingga berhubungan dengan titik kompas. Umumnya aliran angin diberi nama berdasarkan arah angin bertiup, misalnya angin yang bertiup dari utara disebut angin utara. Kecepatan angin adalah kecepatan penyebaran arus angin dan dinyatakan dalam satuan knot atau kilometer tiap jam atau satuan meter tiap detik (Soepangkat, 1994). Karena kecepatan angin banyak berubah, maka dalam menentukan kecepatan angin kecepatan tipikal diambil dalam rentang waktu sepuluh menit dengan cara dijumlahkan dengan satuan knot terdekat. Keadaan ditentukan sebagai angin teduh (calm) jika kecepatan kurang dari satu knot.

Pemuaian udara menyebabkan terjadinya angin pada saat udara berada, ia mengembang ketika dipanaskan, memperluas udara. Karena ringan, ia mungkin naik. Udara dingin di sekitarnya juga akan demikian bergerak ke arah udara bertekanan rendah, mengubahnya menjadi lebih berat sehingga menyebabkannya jatuh ke bumi. Hingga udara panas naik dan udara dingin turun sehingga menimbulkan arus konveksi, proses pemuaian udara di atas bumi akan terus berlanjut. Temperatur yang tinggi akan menimbulkan tekanan yang tinggi pula. Udara yang bersuhu tinggi akan naik sedangkan udara yang bersuhu rendah akan turun. Skala kecepatan angin satuan dan klasifikasinya ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 2. 1 Skala Beaufort (BMKG, 2000)

Skala Beaufort	Kategori	Skala Satuan			Keadaan di daratan	Keadaan di lautan
		Km/Jam	m/s	Knots		
0	Tenang	< 1	< 0,27	0	Asap bergerak secara vertikal	Permukaan laut seperti kaca
1-3	Lemah	< 19	< 5,27	< 10	Angin terasa di wajah; daun-daun berdesir; kincir angin bergerak oleh angin	Riuk kecil terbentuk namun tidak pecah; permukaan tetap seperti kaca
4	Sedang	20-29	5,55-8,05	11-16	Mengangkat debu dan menerbangkan kertas; cabang pohon kecil bererak	Ombak kecil mulai memanjan; garis-garis buih sering terbentuk
5	Angin Sejuk	30-39	8,33-10,83	17-21	Pohon kecil berayun; siulan terdengar pada kabel telepon; payung sulit digunakan	Ombak ukuran sedang; buih berarak-arak
6	Angin kuat	40-50	11,11-13,88	22-27	Pohon-pohon bergerak; terasa sulit berjalan melawan arah angin.	Ombak besar mulai terbentuk, buih tipis melebar dari puncaknya, kadang-kadang timbul percikan.
7	Mendekati kencang	51-62	14,16-17,22	28-33	Ranting-ranting patah, semakin sulit bergerak maju.	Laut mulai bergejolak, buih putih mulai terbawa angin, dan membentuk alur-alur sesuai arah angin.
8	Kencang	63-75	17,5-20,83	34-40	Kerusakan bangunan mulai muncul; atap rumah	Gelombang agak tinggi dan lebih panjang;

					lepas; cabang yang lebih besar patah	puncak gelombang yang pecah mulai bergulung; buih yang terbesar anginnya semakin jelas alur alurnya
9	Kencang sekali	76-87	21,11-24,16	41-47	Jarang terjadi daratan; pohon-pohon tercabut; kerusakan bangunan yang cukup parah	Gelombang tinggi terbentuk buih tebal berlajur-lajur; puncak gelombang roboh bergulung-gulung; percik-air mulai mengganggu penglihatan.
10	Badai	88-102	24,44-28,33	48-55	Jarang terjadi di daratan; pohon-pohon tercabut; kerusakan bangunan yang cukup parah	Gelombang sangat tinggi dengan puncak memayung; buih yang ditimbulkan membentuk tampal-tampal buih raksasa yang didorong angin, seluruh permukaan laut memutih, gulungan ombak menjadi dahsyat, penglihatan terganggu.

11	Badai dahsyat	103-117	28,61-32,5	56-63	Sangat jarang terjadi kerusakan	Gelombang amat sangat tinggi.
----	---------------	---------	------------	-------	---------------------------------	-------------------------------

2.3.1 Faktor-Faktor Terjadinya Angin

Variasi tekanan udara, perbedaan suhu, ketinggian, rotasi bumi, dan efek coriolis merupakan beberapa variabel yang mempengaruhi kemungkinan terjadinya angin.

1. Tekanan Udara

Tekanan udara adalah gaya yang dimiliki udara pada setiap satuan luas permukaan datar bumi sampai dengan batas atmosfer. Semakin tinggi suatu tempat, maka tekanan udara menurun karena kepadatan udara menurun seiring dengan ketinggian. Garis isobar pada peta dapat digunakan untuk menunjukkan bagaimana distribusi tekanan udara di suatu lokasi tertentu. Garis yang menghubungkan tempat-tempat yang tekanan udaranya sama disebut isobar. Barometer dapat digunakan untuk mengukur tekanan udara. Barometer yang dapat merekam sendiri disebut barograf. Barogram merupakan hasil rekamannya. Ada satu atmosfer atau 76 cm Hg dengan tekanan udara di permukaan bumi. Milibar (mb) adalah satuan ukuran tekanan udara dalam meteorologi. 1,013 mb sama dengan tekanan udara 76 cm Hg. Di permukaan bumi, tekanan udara berubah dari satu tempat ke tempat yang lain. Suhu udara merupakan faktor utama yang mempengaruhi variasi tekanan udara. Tempat yang tekanan udaranya paling rendah adalah tempat yang banyak mendapat panas (-). Pemuatan udara dengan adanya panas adalah sumbernya. Daerah

dengan tekanan tertinggi (+) adalah daerah dengan pemanasan minimal. Dari lokasi yang bertekanan tinggi ke daerah yang bertekanan paling rendah udara akan mengalir. Konveksi mengacu pada pergerakan udara vertikal, adveksi terhadap pergerakan udara horizontal dan turbulensi terhadap pergerakan udara tidak teratur (Drs. Sugiharyanto, 2006).

2. Perbedaan Suhu

Tempat pertama di mana panas matahari dirasakan di bumi adalah permukaannya. Panas sedikit terperangkap oleh udara yang dilaluinya. Ketika bumi dan udara bersentuhan, panas dari permukaan bumi mula-mula dipindahkan ke lapisan atmosfer paling bawah. Dari lapisan atmosfer paling bawah hingga paling atas panas bergerak secara progresif ke atas. Oleh karena itu, lapisan atmosfer bawah lebih panas dibandingkan lapisan atas. Faktor-faktor berikut ini paling mempengaruhi seberapa banyak panas matahari yang diterima permukaan bumi.

- a) Lamanya waktu penyinaran matahari
- b) Sudut datang sinar matahari
- c) Keadaan awan
- d) Keadaan permukaan bumi

Sebagai sumber energi utama bagi planet bumi, matahari sangatlah penting. Pancaran energi yang datang dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Temperatur atau suhu menentukan seberapa banyak radiasi yang ada. Gelombang elektromagnetik lebih pendek dan radiasinya lebih kuat pada suhu yang lebih tinggi. Karena energi matahari diserap bumi kemudian dipindahkan (dipancarkan) kembali menjadi radiasi gelombang panjang, maka

radiasi matahari mempunyai gelombang pendek sedangkan radiasi bumi memiliki gelombang panjang. Variasi suhu atmosfer menyebabkan variasi tekanan udara, yang menyebabkan udara terus mengalir dari tekanan tinggi ke tekanan rendah. Adanya perbedaan tekanan udara yang disebabkan oleh udara hangat yang naik dan udara dingin yang turun, sehingga menyebabkan udara bergerak dan membentuk angin (The King Eduka, 2018).

3. Ketinggian

Karena ketinggian berdampak pada tekanan dan perilaku udara, maka ketinggian merupakan salah satu elemen yang menentukan kapan terjadinya angin. Gaya gesekan yang membatasi kecepatan udara menjadi penyebabnya. Gaya gesekan yang besar dihasilkan oleh medan permukaan bumi yang tidak rata yakni meliputi pegunungan, bukit, dan hutan. Gaya gesekan berkurang seiring dengan ketinggian. Akibatnya angin lebih kencang di dekat khatulistiwa dibandingkan wilayah yang jauh.

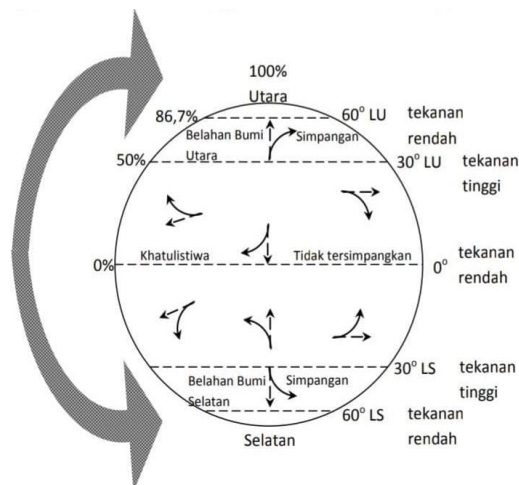
4. Rotasi Bumi

Rotasi bumi yang menyebabkan angin di belahan bumi utara bergerak searah jarum jam menuju arah ekuator juga berkontribusi terhadap pengalihan arah angin dan arus laut tersebut. Sementara itu, angin di belahan bumi selatan bertiup berlawanan arah jarum jam. Efek coriolis adalah nama lain dari pembelokan arah dan pembelokan arus laut. Fenomena ini menyebabkan arus laut dan angin belahan bumi utara berputar searah jarum jam, sedangkan di belahan bumi selatan terjadi sebaliknya yaitu berputar berlawanan arah jarum jam. Variasi suhu dan tekanan udara yang tinggi akan menyebabkan angin

kencang yang dapat mengakibatkan angin topan. Topan dan efek coriolis tidak terdapat di wilayah tropis sekitar khatulistiwa seperti Indonesia.

5. Efek Coriolis

Gradien tekanan yaitu dari daerah isobar tekanan tinggi ke daerah isobar tekanan rendah dan arah angin tidak sepenuhnya sejajar. Reaksi angin terhadap gaya coriolis adalah sumbernya. Gaya coriolis adalah gaya nyata yang dihasilkan dari interaksi dua gerak itu bukan kekuatan nyata. Khususnya : gerak rotasi bumi dan gerak benda terhadap permukaan bumi.



Gambar 2. 1 Efek Coriolis yang timbul karena rotasi bumi mengakibatkan pembelokan arah angin

Gaya Coriolis ditunjukkan pada gambar 2.1 meningkat seiring naiknya titik lintang dan menghilang (menuju nol) di ekuator (garis lintang 0°). Dengan demikian angin tidak dibelokkan saat bergerak di sepanjang garis khatulistiwa. Perubahan lintasan angin disimpulkan oleh Buys Ballot, disebut hukum Buys Ballot yang berbunyi sebagai berikut:

- (a) Dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah terjadi pergerakan udara (angin).
- (b) Angin berubah arah : belok kiri di belahan bumi selatan dan kanan di belahan bumi utara (Agus Fany, 2010).

2.3.2 Jenis-jenis Angin

Secara umum, ada dua jenis angin : angin lokal dan angin muson.

1. Angin Lokal

Angin lokal adalah angin yang bertiup hanya pada waktu tertentu dan pada tempat tertentu saja. Ada banyak kategori yang termasuk dalam angin lokal:

a) Angin Darat dan Angin Laut

Angin laut mengalir dari laut menuju daratan, dan angin darat mengalir dari daratan menuju laut. Perbedaan penyerapan panas matahari antara daratan dan perairan menghasilkan angin darat dan angin laut.

b) Angin Gunung dan Angin Lembah

Pegunungan memanaskan lebih awal pada siang hari dibandingkan lembah. Akibatnya, udara di lembah naik ke atas gunung sebagai angin lembah karena udara di pegunungan lebih longgar dan tekanannya turun. Sebaliknya, jika suhu di pegunungan lebih dingin pada malam hari dibandingkan di dataran rendah, maka tekanan udara di pegunungan meningkat dan angin pegunungan membawa udara turun ke lembah.

c) Angin Siklon dan Angin Anti Siklon

Udara yang bergerak dari lokasi bertekanan udara tinggi menuju pusat bertekanan udara rendah disebut angin siklon. Aliran udara ini

tampaknya berputar dari banyak zona bertekanan udara tinggi yang mengelilingi zona bertekanan rendah. Jika angin dianggap anti-siklon artinya angin bergerak dari pusat bertekanan tinggi menuju area bertekanan rendah disekitarnya. Pergerakan udara ini dapat dilihat saat berputar dan bergerak menuju zona bertekanan rendah. Dibelahan bumi utara dan selatan, angin siklon dan anti siklon berputar ke arah yang berbeda.

d) Angin Fohn

Angin yang bertiup panas dan kering memenuhi lereng gunung disebut angin fohn. Angin ini timbul dari pemanasan dinamis udara yang turun, yang diikuti dengan turunnya kelembapan relatif, sehingga membuat udara yang mencapai daratan menjadi panas dan kering.

2. Angin Muson

Musim barat dan musim timur merupakan dua jenis angin musim yang mempengaruhi Indonesia. Angin muson disebabkan oleh variasi tekanan udara yang berasal dari dua benua: Australia yang gersang dan lautan yang melimpah di Asia.

a) Angin Muson Barat

Bulan Oktober sampai April adalah saat terjadinya angin muson barat. Pada bulan tersebut, matahari terletak di belahan bumi selatan. Akibatnya, belahan bumi selatan mengalami suhu yang lebih tinggi daripada wilayah utara sehingga angin bergerak dari belahan bumi utara ke selatan.

b) Angin Muson Timur

Angin bertiup dari bulan April hingga Oktober. Saat itu, matahari sedang berada di belahan bumi utara.

2.4 Angin Puting Beliung

Kerusakan akibat angin yang paling berbahaya disebabkan oleh angin puting beliung. Angin ini dapat digambarkan sebagai hembusan angin kencang yang muncul secara tiba-tiba, berpusat pada dirinya sendiri, dan berputar-putar hingga mencapai permukaan bumi, dan hanya berlangsung selama 3-5 menit. Kecepatan tornado tersebut berasal dari awan Cumulonimbus (Cb) dan memiliki rentang kecepatan 55–74 km/jam. Angin kencang tidak selalu memenuhi syarat sebagai tornado karena kekuatannya, durasinya yang singkat, dan kecepatan angin yang semakin berkurang. Curah hujan dengan intensitas tinggi biasanya bertepatan dengan hadirnya angin puting beliung atau pusaran air.

Di dalam al-qur'an juga dijelaskan bahwasanya Allah SWT mengirimkan angin untuk merusak dan membinasakan suatu kaum yang melampaui batas. Sebagaimana Allah berfirman dalam QS. Al-Isra' [17] : 69 :

أَمْ أَمِنْتُمْ أَنْ يُعِيدَكُمْ فِيهِ تَارَةً أُخْرَىٰ فَيَرْسِلَ عَلَيْكُمْ قَاصِفًا مِنَ الرِّيحِ فَيُغْرِقَكُم بِمَا كَفَرْتُمْ ثُمَّ

لَا تَجِدُوا لَكُمْ عَلَيْنَا بِهِ تَبِيعًا

Artinya: “Atau apakah kamu merasa aman dari dikembalikan-Nya kamu ke laut sekali lagi, lalu Dia meniupkan atas kamu angin topan dan ditenggelamkan-Nya kamu disebabkan kekafiranmu. Dan kamu tidak akan mendapat seorang penolong pun dalam hal ini terhadap (siksaan) kami”.

Ayat diatas memperjelas bahwa sebagai balasan atas kekafiran mereka, Allah SWT mengirimkan angin kepada orang-orang kafir. Bentuknya seperti badai, dengan hembusan kuat dari laut yang menenggelamkannya.

Selain itu, angin puting beliung juga dapat terjadi pada musim pancaroba atau saat hujan ringan hingga sedang, yang biasanya terjadi pada siang hari setelah pukul 13.00–17.00. Di sisi lain, ada kemungkinan juga terjadi angin puting beliung pada malam hari. Angin puting adalah peristiwa meteorologi lokal yang berumur pendek dan berpotensi menyebabkan kerusakan signifikan dan bahkan korban jiwa.

Berikut adalah gambar penampakan saat terjadi angin puting beliung.



Gambar 2. 2 Angin Puting Beliung

2.4.1 Karakteristik Angin Puting Beliung

walaupun awan cumulonimbus yang sering terbentuk pada musim hujan menjadi sumber terjadinya angin puting beliung, namun tidak semua pertumbuhan awan (Cb) akan mengakibatkan terjadinya angin puting beliung. Namun secara

umum, ada beberapa faktor yang mempengaruhi kemungkinan terjadinya angin puting beliung di suatu wilayah, seperti:

1. Keberadaannya tidak dapat diprediksi.
2. Terjadi dengan cepat di wilayah yang relatif kecil (2–5 menit).
3. Pusaran angin puting beliung menyerupai selang penyedot debu atau belalai gajah.
4. Lintasan tersebut menimbulkan jejak kerusakan jika kejadian berlangsung dalam jangka waktu lama.
5. Lebih banyak terjadi di lokasi dataran rendah dan lebih sering terjadi pada siang hari.

Berikut ini adalah tanda-tanda atau ciri-ciri akan tibanya angin puting beliung di suatu tempat:

1. Sehari sebelumnya, suhu terasa hangat dari malam hingga pagi hari.
2. Awan kumulus mulai terbentuk di antara awan-awan tersebut sekitar pukul 10.00. Ada jenis awan tertentu yang memiliki batas abu-abu yang sangat jelas tegak seperti kembang kol.
3. Pada fase berikutnya, awan dengan cepat berubah warna menjadi abu-abu atau hitam.
4. Pepohonan disekitarnya serta ranting atau dahan yang memulainya berayun dengan cepat, suasananya terasa sedikit dingin.

Berikut proses yang menyebabkan terjadinya angin puting beliung:

1. Wilayah yang meluas biasanya berada di daratan, namun disebut juga “waterspout” bila berada di laut.
2. Arah pergerakan ditentukan oleh pergerakan Cumulonimbus (Cb).

3. Gerakan tidak dilibatkan dalam proses; hanya awan Cumulonimbus (Cb) yang ada bukan pergerakan angin muson.
4. Kecepatan angin mencapai 30 hingga 40 hingga 50 knots.
5. Berlangsung selama 3 menit, dengan maksimal 5 menit.
6. Wilayah yang terkena dampak mencakup antara 5 dan 10 Km.

2.4.2 Fase-fase Angin Puting Beliung

Ada 3 tahap dalam pembentukan angin puting beliung diantaranya ialah fase pertumbuhan, fase dewasa, dan fase kepunahan.

1. Fase Tumbuh

Arus udara ke atas yang kuat menyebabkan awan melewati fase perkembangan yang mana pada saat itu tetesan air dan kristal es dipertahankan oleh arus udara yang naik di atas puncak awan, bahkan saat tidak ada hujan.

2. Fase Dewasa

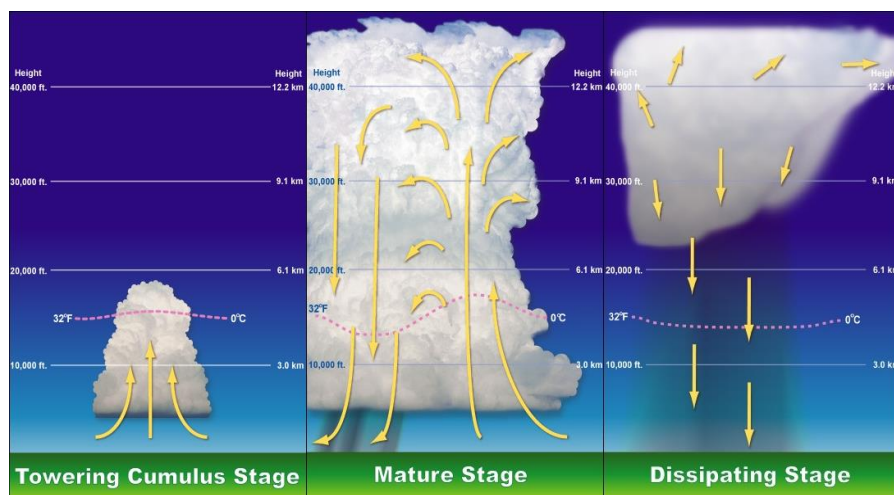
Ketika udara di puncak awan tidak mampu lagi menampung tetesan air, fase dewasa dimulai. Hujan menimbulkan gesekan antara arus udara yang naik dan turun. Arus geser memutar dan menghasilkan vortisitas pada antarmuka antara arus udara naik dan turun karena suhu massa udara yang turun lebih rendah daripada suhu udara di sekitarnya. Arus udara ini berputar semakin cepat, seperti angin topan yang menjilat tanah seperti angin puting beliung dan sesekali mengeluarkan semburan air akibat hujan deras.

3. Fase Punah

Sepanjang fase kepunahan, awan tertutup oleh massa udara yang turun tetapi tidak ada massa udara yang naik. Akibatnya, kondensasi melambat, dan udara di bawahnya semakin lemah hingga perkembangan awan Cumulonimbus (Cb) berhenti.

2.5 Awan Cumulonimbus (Cb)

(Tjasyono dan Harijono, 2012) Salah satu jenis awan yang dapat berbahaya pada situasi tertentu dan sering mengakibatkan cuaca buruk adalah awan cumulonimbus (Cb). Pertumbuhan dan perkembangan awan Cumulonimbus (Cb) dapat dibagi menjadi tiga tahap: tahap pertumbuhan, kedewasaan, dan disipasi. Gambar ketiga fase atau tahapan pengembangan tersebut disajikan di bawah ini:



Gambar 2.3 Siklus Awan Cumulonimbus

Uraian berikut dapat digunakan untuk mengkarakterisasi tahap pertumbuhan, kedewasaan, dan disipasi:

1. Tahapan Tumbuh

Selama fase pertumbuhan, awan terus mengembang hingga suhu bidang udara mencapai suhu udara di sekitarnya atau gaya apung termalnya hilang. Oleh karena fenomena tersebut, awan cumulonimbus didominasi oleh arus udara ke atas atau updraft, dan jarang atau bahkan tidak pernah turun hujan.

2. Tahapan Dewasa (mature)

Awan cumulonimbus mempunyai kematangan yang ganas dan mematikan. Saat ini banyak terjadi hujan, turbulensi, guntur, dan kilat. Hujan dihasilkan oleh arus udara ke bawah, atau aliran udara ke bawah, yang mendominasi awan. Arus udara ke atas mengangkut uap air ke awan sebagai bahan bakar awan, yang digunakan oleh awan saat berubah fase membentuk tetesan awan.

3. Tahapan Disipasi

Ketika arus udara ke bawah mencakup lebih dari 50% sel awan cumulonimbus (Cb), tahap disipasi dimulai. Awan mengalami penurunan aktivitas pada periode ini. Setelah gerimis atau hujan ringan, awan akan berangsur-angsur hilang dan berhenti menghasilkan hujan.

2.6 Satelit Himawari 8

Satelit himawari 8 merupakan bagian generasi baru dari satelit MTSAT yang dilengkapi dengan sensor yang disebut *Advanced Himawari Imager (AHI)*, yang memiliki resolusi temporal, spektral dan spasial yang lebih efisien dibandingkan dengan seri sebelumnya. *Himawari-8* memiliki 16 saluran termasuk 3 saluran tampak, 3 saluran inframerah dekat (*NIR*) dan 10 saluran inframerah (*IR*). Resolusi spasial *Himawari-8* meliputi 0,5 km dan 1 km untuk saluran cahaya tampak, 2 km

untuk data saluran inframerah, dan 1 km dan 2 km untuk data saluran inframerah dekat. Sedangkan untuk resolusi temporal, *Himawari-8* memiliki resolusi setiap 10 menit untuk pengamatan global dan setiap 2,5 menit untuk pengamatan khusus. Selain itu, dengan menggunakan beberapa saluran satelit himawari 8, pengguna dapat membuat produk *RGB* (biru merah hijau) dengan menggabungkan beberapa saluran (Kushardono, 2012).

Tabel 2. 2 Fungsi Band-Band Pada Satelit Himawari-8

Band	Penamaan Kanal	Kategori Sensor	Rentang Panjang Gelombang (μm)	Resolusi Spasial	Kegunaan
1	V1	Visibel	0,43 – 0,48	1 km	Tumbuhan, aerosol
2	V2		0,50 – 0,52	1 km	Tumbuhan, aerosol
3	VS		0,63 – 0,66	0,5 km	Awan rendah, kabut
4	N1	Inframerah Dekat/Near Infrared	0,85 – 0,87	1 km	Tumbuhan, aerosol
5	N2		1,60 – 1,62	2 km	Fase awan
6	N3	Inframerah Dekat/Near Infrared	2,25 – 2,27	2 km	Ukuran Partikel
7	14	Inframerah Termal	3,74 – 3,96	2 km	Awan rendah, kabut,

					kebakaran hutan
8	WV	Water Vapour	6,06 – 6,43	2 km	Kelembaban tingkat menengah dan atas
9	W2		6,89 – 7,01	2 km	Kelembaban tingkat menengah
10	W3		7,26 – 7,43	2 km	Kelembaban tingkat menengah dan atas
11	MI	Inframerah Termal	8,44 – 8,76	2 km	Fase awan, SO ₂
12	O3		9,54 – 9,72	2 km	Kandungan ozon
13	IR		10,3 – 10,6	2 km	Citra awan, informasi puncak awan
14	L2		11,1 – 11,3	2 km	Citra awan, suhu permukaan laut
15	I2		12,2 – 12,5	2 km	Citra awan, suhu permukaan laut
16	CO		13,2 – 13,4	2 km	Tinggi puncak awan

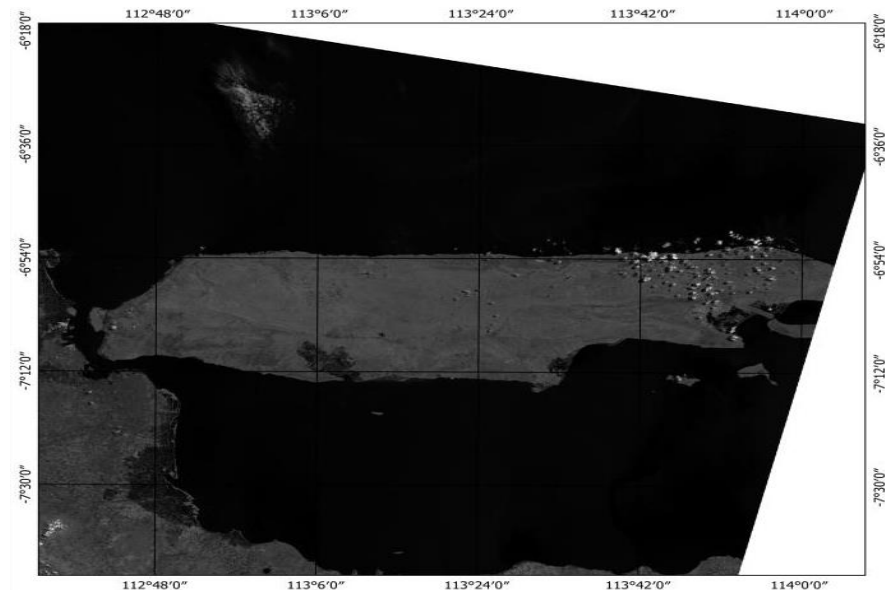
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Berdasarkan keadaan geografisnya, Kecamatan Kalianget mempunyai luas wilayah 3.019,40 km² yang berada pada ketinggian kurang dari 500 meter dari permukaan laut atau termasuk dalam kategori daerah dataran rendah. Secara astronomis Kecamatan Kalianget terletak 113.2 – 113.95 BT dan -7.7 - -7.2 LS. Kecamatan Kalianget memiliki jumlah desa/kelurahan sebanyak 7 desa, terdiri dari 28 dusun, 166 RT dari 32 RW. Di wilayah ini juga terdapat pelabuhan yang menghubungkan ke kecamatan-kecamatan kepulauan di Kabupaten Sumenep, termasuk juga ke wilayah jawa yaitu ke Kabupaten Situbondo melalui pelabuhan jangkar. Adapun batas-batas wilayah Kecamatan Kalianget sebagai berikut:

1. Sebelah Utara berbatasan dengan Kecamatan Gapura
2. Sebelah Selatan berbatasan dengan Selat Madura
3. Sebelah Barat berbatasan dengan Kecamatan Kota
4. Sebelah Timur berbatasan dengan Selat Madura



Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Software SATAID digunakan untuk mengolah dan menganalisis data citra satelit himawari 8
2. Software GrADS untuk mengolah data angin serta mengolah data kelembaban dan Indekstabilitas atmosfer
3. Microsoft Excel
4. Microsoft Word
5. Data Suhu Udara Permukaan
6. Data Tekanan Udara Permukaan
7. Data Reanalysis Angin Zonal dan Meridional
8. Data Kelembaban (Relative Humidity)
9. Data Indekstabilitas (K-Indeks dan TT-Indeks)
10. Data Citra Satelit Himawari-8

3.3 Data dan Metode

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data Reanalysis berupa angin zonal dan angin meridional untuk melihat streamline angin sehingga dapat diketahui pola anginnya, data Kelembaban (RH), dan K-Indeks, TT-Indeks yang diambil dari situs <https://cds.climate.copernicus.eu/> .

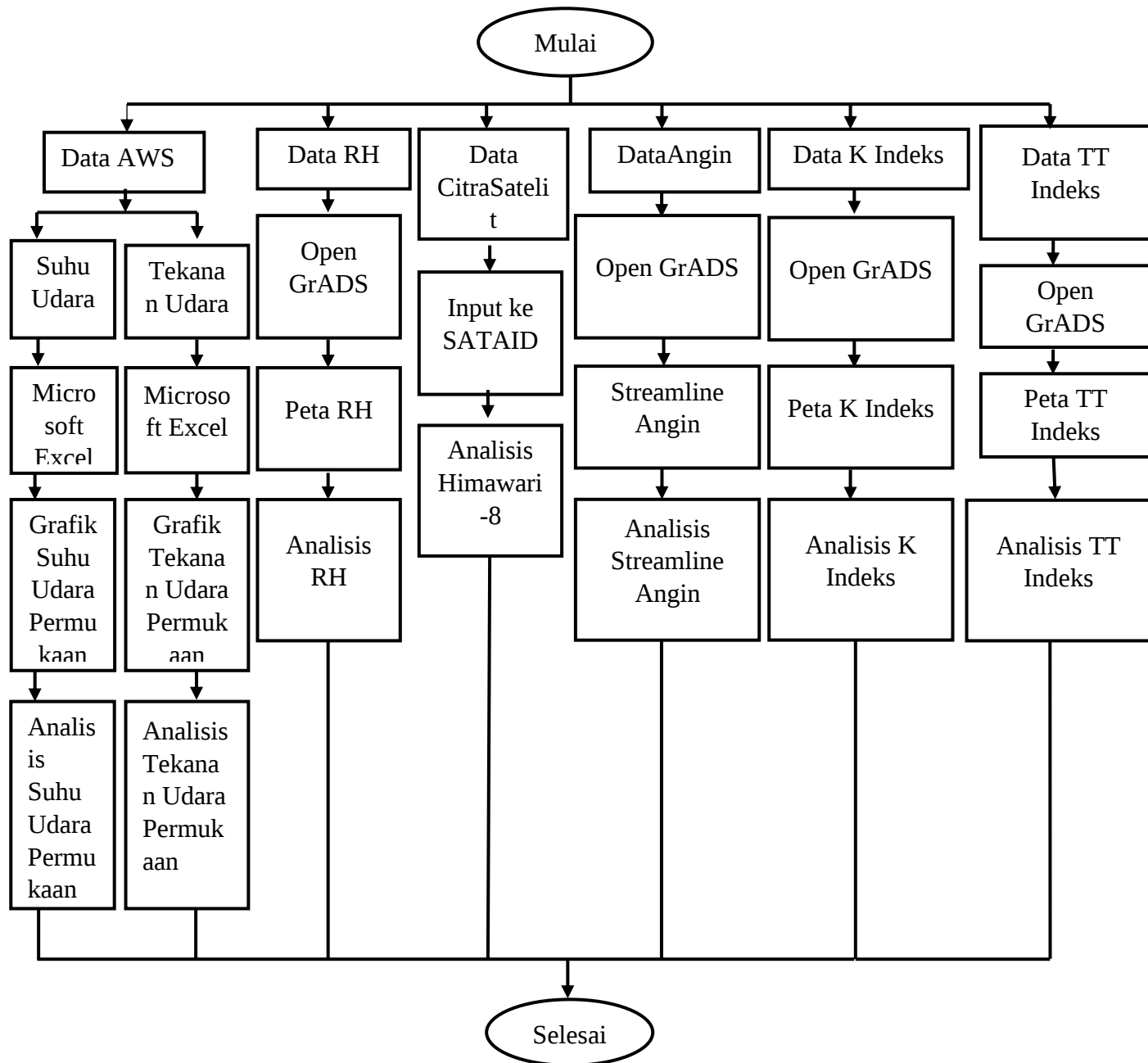
Selain itu, data suhu udara permukaan dan tekanan udara permukaan yang diperoleh langsung dari pengamatan harian Stasiun BMKG Trunojoyo Sumenep.

Aplikasi Satellite Animation and Interactive Diagnosis (SATAID) digunakan untuk menangani data dari satelit IR Himawari 8. Untuk sistem operasi (OS) windows, SATAID merupakan software yang berguna dalam mengubah data biner menjadi gambar. Kajian citra satelit sebaran awan Cb saat terjadi angin puting beliung di Kecamatan Kalianget ditampilkan dengan menggunakan Himawari-8. Selain itu, suhu puncak awan ditampilkan menggunakan SATAID. Menampilkan foto atau gambar dari data satelit biner merupakan tujuan dari program SATAID (Harsa et al., 2011). Data satelit Himawari-8 dikumpulkan selama 1 hari pada bulan April yakni pada tanggal 03 tahun 2021.

Perangkat lunak Microsoft Word, Microsoft Excel, SATAID, dan GrADS adalah beberapa perangkat yang memproses data ini.

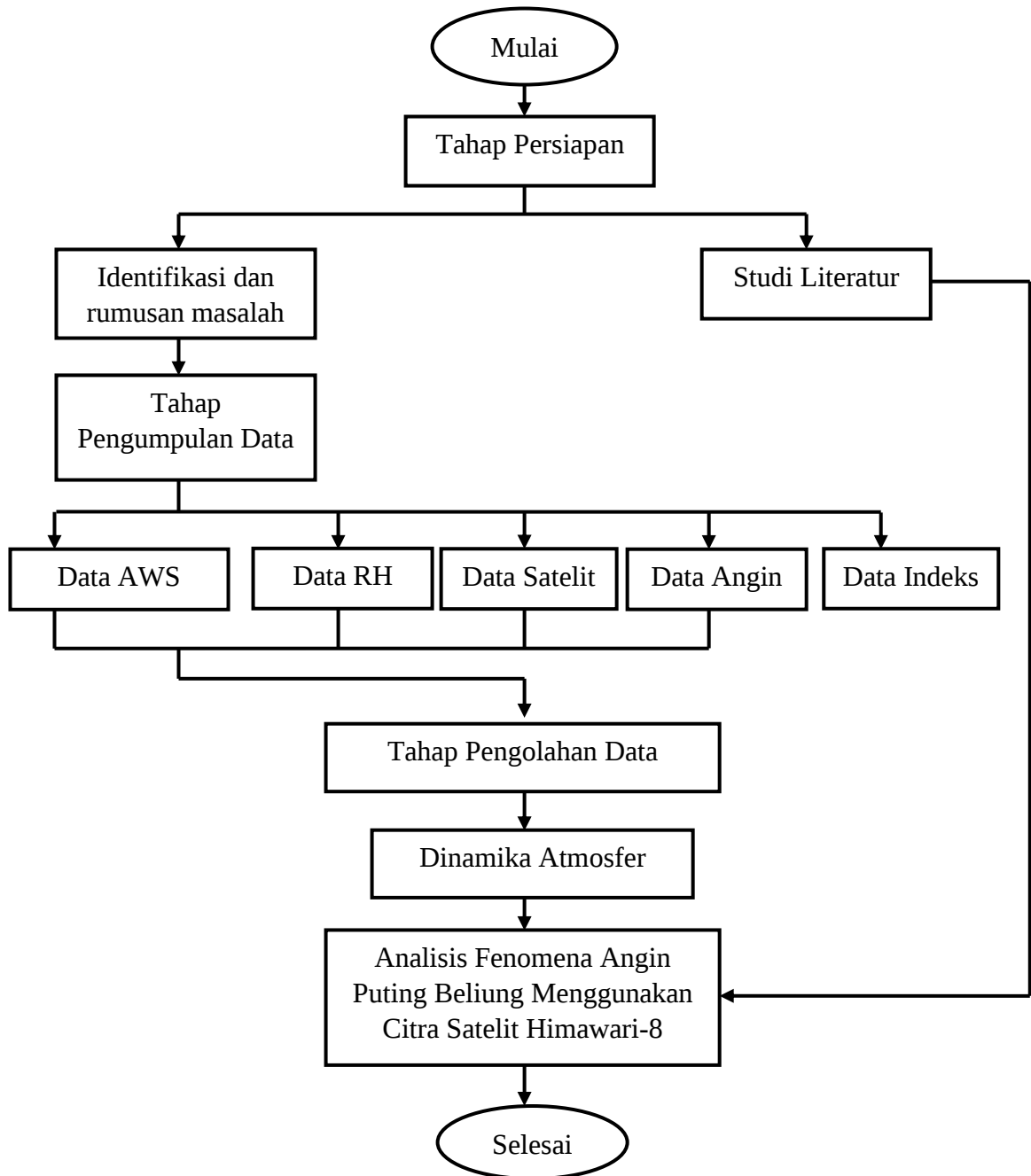
3.4 Tahapan Pengolahan Data

Berikut merupakan proses pengolahan data dari penelitian ini :



Gambar 3. 2 Tahapan Pengolahan Data

3.5 Diagram Alir



Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian

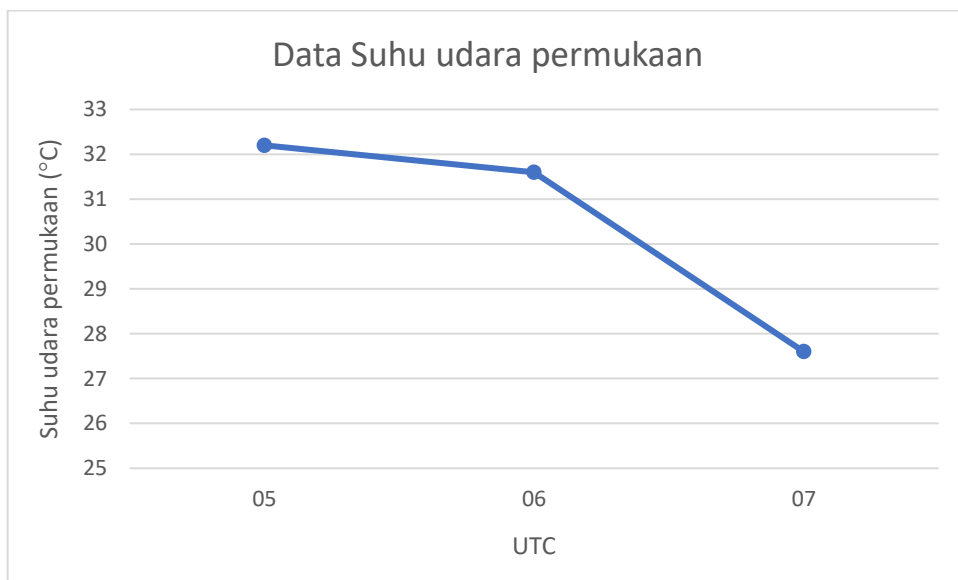
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Proses Pergerakan, Pembentukan Awan Konvektif dan Perubahan Suhu Puncak Awan Berdasarkan CitraSatelit Himawari-8

4.1.1 Analisis Suhu Udara Permukaan

Adapun tujuan dianalisisnya suhu udara permukaan yakni untuk memahami bagaimana suhu udara di permukaan bumi memengaruhi proses pembentukan dan pergerakan awan konvektif, serta bagaimana interaksi tersebut berkontribusi pada perubahan suhu puncak awan di Kecamatan Kalianget.



Gambar 4. 1 Grafik Suhu Udara Permukaan Kecamatan Kalianget

Suhu udara pada jam 05 UTC (12.00 WIB) berada pada puncaknya sekitar 32°C, hal ini menunjukkan bahwa suhu udara cukup tinggi meningkatkan energi termal di atmosfer, menyebabkan udara dekat permukaan memanaskan dan naik lebih cepat. Ketika udara panas naik, ia dapat bertemu dengan lapisan udara yang lebih dingin di atas, yang menciptakan kondisi ketidakstabilan. Ketidakstabilan atmosfer

ini sering kali menjadi pemicu terbentuknya awan konvektif seperti awan cumulonimbus yang bisa berkembang menjadi angin puting beliung. Kemudian pada jam 06 UTC (13.00 WIB) suhu udara mulai menunjukkan sedikit penurunan tetapi masih kurang dari 32°C. Kondisi ini menunjukkan bahwa masih ada cukup energi termal di atmosfer yang dapat mendukung proses konveksi yang intensif. Energi termal di atmosfer berasal dari pemanasan permukaan oleh radiasi matahari. Ketika permukaan bumi memanaskan, udara di atasnya juga memanaskan dan menjadi lebih ringan sehingga naik ke atas. Proses ini dikenal sebagai konveksi. Udara hangat yang naik membawa energi termal ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi. Jika suhu udara di permukaan tetap tinggi seperti yang ditunjukkan oleh suhu mendekati 32°C pada pukul 06 UTC (13.00 WIB), maka proses konveksi ini bisa berlangsung dengan intensif. Suhu permukaan yang tinggi dapat menyebabkan pembentukan awan konvektif yang lebih tinggi (deep convective clouds) hal ini berdampak pada penurunan suhu puncak awan, karena puncak awan yang lebih tinggi biasanya memiliki suhu yang lebih rendah. Suhu udara mengalami penurunan yang signifikan pada jam 07 UTC (14.00 WIB) menjadi sekitar 28°C. penurunan suhu tersebut dapat menunjukkan adanya adveksi udara yang lebih dingin atau adanya peningkatan awan dan curah hujan yang mengakibatkan pendinginan permukaan.

Kenaikan suhu yang cukup signifikan sebelum penurunan menunjukkan adanya pemanasan yang kuat di permukaan. Pemanasan ini bisa meningkatkan konveksi yang membawa udara panas dan lembab ke atmosfer yang lebih tinggi memicu pembentukan awan cumulonimbus yang dapat menghasilkan angin puting beliung. Sedangkan penurunan suhu pada jam 07 UTC (14.00 WIB) dapat dikaitkan

dengan turunnya curah hujan yang intens atau aliran masuk udara dingin dari sekitar yang sering terjadi bersamaan dengan fenomena angin puting beliung. Penurunan ini juga mengindikasikan bahwa proses konveksi kuat telah terjadi dan melepaskan energi ke atmosfer.

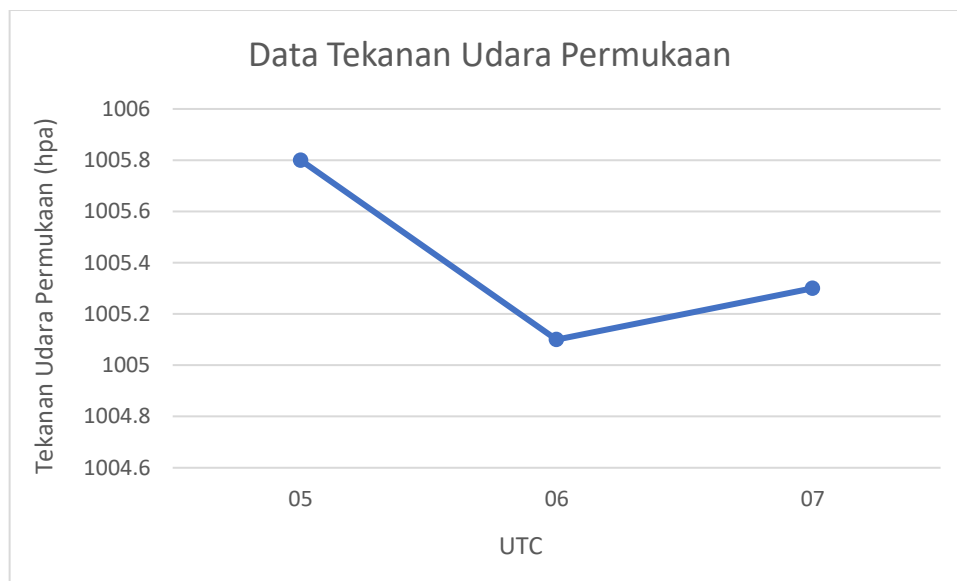
Grafik suhu udara permukaan yang menunjukkan penurunan suhu signifikan dari 32°C hingga 28°C dalam rentang waktu 2 jam ini menggambarkan dinamika cuaca yang sangat aktif. Sebelum terjadinya angin puting beliung, pemanasan permukaan yang signifikan menciptakan kondisi ketidakstabilan atmosfer yang memicu pembentukan awan cumulonimbus. Saat angin puting beliung terjadi, presipitasi intens dan aliran udara dingin dari awan cumulonimbus menyebabkan penurunan suhu yang cepat. Setelah angin puting beliung berlalu, suhu tetap rendah karena efek pendinginan masih berlangsung dengan atmosfer yang perlahan pulih dari aktivitas cuaca ekstrem tersebut.

Secara teori, suhu udara tinggi di permukaan memicu konveksi, yaitu naiknya udara hangat ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi. Perbedaan suhu yang signifikan antara permukaan dan lapisan atas atmosfer menciptakan ketidakstabilan, mendukung pembentukan awan cumulonimbus.

Menurut hasil pembahasan : Suhu permukaan mencapai 32°C sebelum kejadian (pukul 05 UTC) menunjukkan energi termal yang tinggi di wilayah tersebut. Setelah kejadian, suhu turun menjadi 28°C (pukul 07 UTC) akibat pendinginan curah hujan intens. Perbedaan suhu signifikan sebelum dan sesudah kejadian mendukung teori bahwa suhu tinggi di permukaan menciptakan energi untuk pembentukan awan cumulonimbus yang menyebabkan angin puting beliung.

4.1.2 Analisis Tekanan Udara Permukaan

Tujuan dari analisis tekanan udara permukaan adalah untuk memahami peran tekanan atmosfer dalam proses pembentukan, pergerakan awan konvektif dan perubahan suhu puncak awan.



Gambar 4. 2 Grafik Tekanan Udara Permukaan Kecamatan Kalianget

Pada jam 05 UTC (12.00 WIB), tekanan udara permukaan berada di sekitar 1005.8 hPa. Tekanan udara ini relatif tinggi dan menandakan kondisi atmosfer yang cukup stabil. Stabilitas ini biasanya ditandai oleh kurangnya perubahan signifikan dalam suhu dan kelembapan udara. Namun, dalam konteks sebelum terjadinya angin puting beliung, kondisi ini bisa berubah dengan cepat. Tanda-tanda awal ketidakstabilan mungkin mulai muncul, seperti peningkatan kecepatan angin dan perubahan pola awan. Pada tahap ini, atmosfer mulai mengalami pemanasan permukaan yang intens, yang menyebabkan udara hangat naik ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi.

Pada jam 06 UTC (13.00 WIB), terjadi penurunan drastis tekanan udara permukaan hingga sekitar 1005.0 hPa. Penurunan tekanan ini sangat signifikan dan mencerminkan pembentukan sistem tekanan rendah yang kuat di area tersebut. Sistem tekanan rendah ini biasanya disebabkan oleh konveksi yang intens, di mana udara hangat dan lembab naik dengan cepat, menciptakan daerah dengan tekanan udara yang lebih rendah di permukaan. Kondisi ini sangat mendukung pembentukan angin puting beliung, yang merupakan hasil dari interaksi kompleks antara aliran udara naik dan turun, serta rotasi atmosfer lokal. Angin puting beliung sendiri terbentuk ketika ada perbedaan kecepatan dan arah angin yang signifikan pada berbagai ketinggian (wind shear), yang menyebabkan pembentukan pusaran atau vorteks.

Pada jam 07 UTC (14.00 WIB), tekanan udara permukaan mulai meningkat kembali, mencapai sekitar 1005.3 hPa. Kenaikan tekanan ini menunjukkan bahwa sistem tekanan rendah yang menyebabkan angin puting beliung mulai melemah atau bergerak menjauh. Setelah puncak ketidakstabilan atmosfer berlalu, tekanan udara biasanya kembali meningkat karena udara yang sebelumnya naik dan membentuk awan serta hujan mulai mendingin dan turun kembali ke permukaan. Kenaikan tekanan ini mengindikasikan bahwa atmosfer sedang berusaha kembali ke kondisi stabilnya, dengan udara yang lebih dingin dan kering menggantikan udara hangat dan lembab yang sebelumnya naik.

Pada saat jam terjadinya angin puting beliung (06 UTC atau 13.00 WIB), penurunan tekanan udara lebih cepat terjadi dibandingkan dengan penurunan suhu udara permukaan. Pada saat terjadi angin puting beliung suhu udara masih tinggi sedangkan tekanan udara menurun secara drastis. Hal ini terjadi karena pada

tekanan udara terdapat proses konveksi yang intens. Saat udara hangat naik ke atmosfer yang lebih tinggi akibat pemanasan, tekanan udara di permukaan menurun. Penurunan tekanan terjadi lebih cepat dibandingkan dengan penurunan suhu karena konveksi yang terjadi langsung mengubah distribusi massa udara di atmosfer dan menyebabkan penurunan tekanan secara lokal.

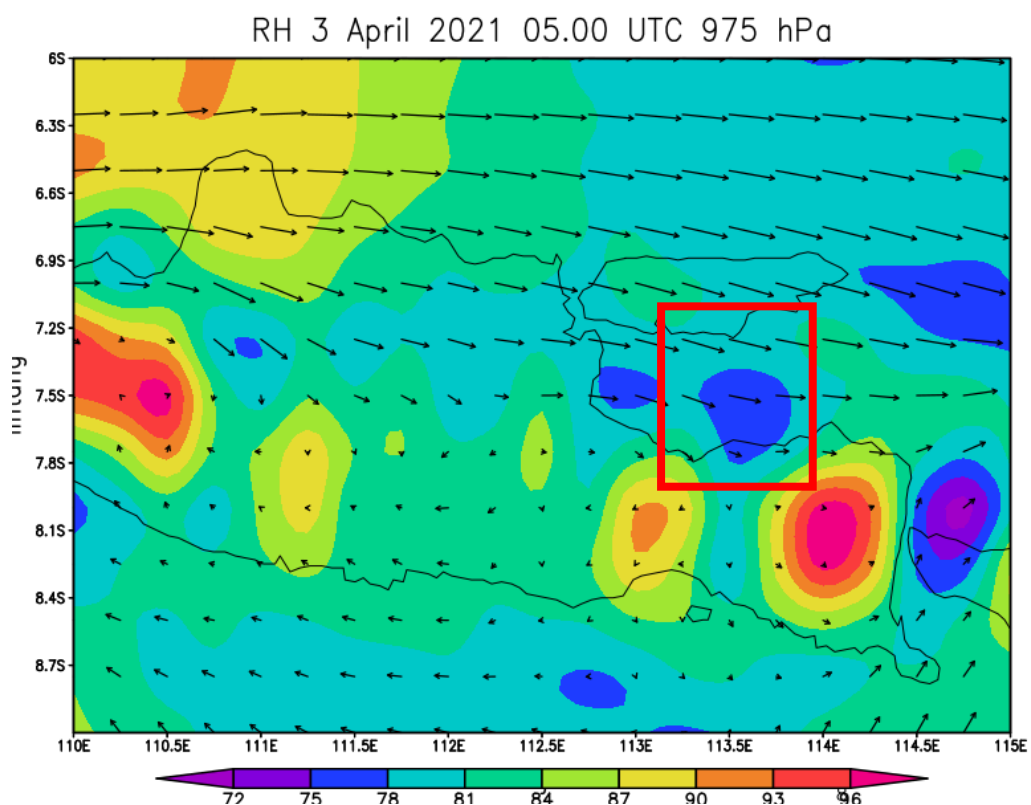
4.1.3 Analisis Kelembaban Relatif (RH)

Kelembaban relatif atau Relative Humidity (RH), dinyatakan dalam persen (%) adalah rasio antara tekanan parsial aktual yang diterima uap air dalam suatu volume udara tertentu dengan tekanan parsial udara yang diterima uap air pada kondisi saturasi pada suhu udara saat itu (Widodo, Sapto, dkk 2008). Pengertian lain dari kelembaban adalah perbandingan antara jumlah uap air yang terkandung dalam udara pada suatu waktu tertentu dengan jumlah uap air maksimal yang dapat ditampung oleh udara tersebut pada tekanan dan temperatur yang sama (Yusuf, dkk. 2018).

Adapun hubungan kelembaban, suhu udara, dan tekanan ialah ketika suhu udara permukaan tinggi, maka energi termal di atmosfer meningkat sehingga menciptakan konveksi yang intens. Udara yang naik membawa uap air (kelembaban) yang pada akhirnya membentuk awan jika suhu di atmosfer lebih tinggi mencapai titik jenuh. Kelembaban yang tinggi mendukung pembentukan awan besar seperti cumulonimbus. Proses ini diperkuat oleh kondisi tekanan rendah di permukaan yang disebabkan oleh naiknya udara hangat. Sedangkan tekanan rendah memungkinkan terjadinya lebih banyak konveksi dengan udara lembab yang naik cepat ke atmosfer dan di beberapa kasus terjadi perubahan arah dan kecepatan angin (wind shear) yang dapat menyebabkan terbentuknya pusaran angin

seperti angin puting beliung. Secara teori, ketidakstabilan atmosfer, peningkatan kelembaban, suhu tinggi, dan penurunan tekanan semua bekerja bersama-sama dalam menciptakan kondisi yang mendukung fenomena cuaca ekstrem termasuk angin puting beliung.

Adapun tujuan dianalisisnya parameter ini ialah untuk memahami kondisi atmosfer di Kecamatan Kalianget sebelum terjadinya angin puting beliung.



Gambar 4. 3 Nilai Skala RH pukul 05.00 UTC (12.00 WIB) pada lapisan 975 hPa di Kecamatan Kalianget

Gambar tersebut menunjukkan distribusi kelembaban relatif di lapisan adalah 975 hpa pada 05.00 UTC (12.00 WIB). Warna yang berbeda menunjukkan nilai RH yang berbeda dengan legenda dibagian bawah gambar yang menunjukkan skala kelembaban relatif dari 72% hingga 96%.

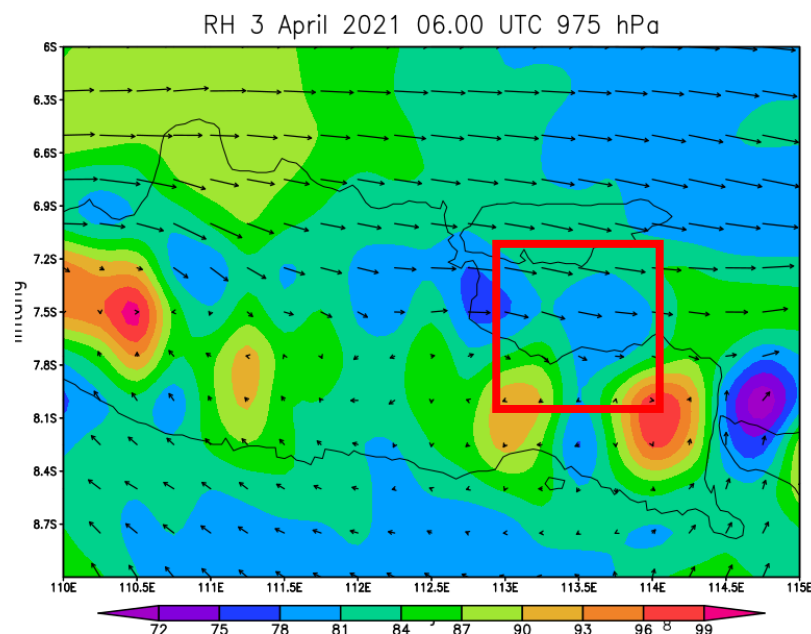
Pada sekitar koordinat $113^{\circ}\text{E} - 114^{\circ}\text{E}$ dan $7.2^{\circ}\text{S} - 8^{\circ}\text{S}$ (yang mencakup kecamatan kalianget), terlihat adanya area dengan kelembaban relatif yang tinggi yang ditunjukkan oleh warna orange hingga merah muda. Nilai RH di area ini berada di kisaran 90% hingga 96%, kelembaban yang tinggi ini mengindikasikan adanya banyak uap air di atmosfer yang merupakan kondisi yang mendukung pembentukan awan dan potensi hujan deras serta aktivitas konvektif. Namun pada daerah kecamatan kalianget, terdapat pula area dengan warna dongker dan tosca. Warna dongker mengindikasikan nilai kelembaban relatif yang lebih rendah yakni di kisaran 72% - 78%, sedangkan warna tosca menunjukkan kelembaban relatif yang rendah yakni sekitar 78% - 87%. Area dengan warna dongker dan tosca ini menunjukkan wilayah dengan kandungan uap air yang lebih sedikit dibandingkan area merah muda. Keberadaan area dengan variasi kelembaban ini menggambarkan adanya gradien kelembaban yang cukup tajam di sekitar wilayah tersebut. Gradien ini dapat memicu ketidakstabilan atmosfer lokal, terutama jika disertai adanya pergerakan angin konvergen sehingga tetap berpotensi memicu pembentukan awan konvektif dan cuaca ekstrem di daerah dengan kelembaban yang lebih tinggi. Arah angin (diwakili oleh vektor) di lapisan ini juga menunjukkan adanya pergerakan udara yang mendukung pola konvergensi yakni udara dari berbagai arah bertemu dan naik ke atas.

Secara ilmiah, kelembaban relatif yang tinggi di lapisan 975 hPa sebelum terjadinya angin puting beliung menandakan bahwa lapisan ini sangat jenuh dengan uap air sehingga memfasilitasi pembentukan awan tebal seperti cumulonimbus. Hal ini sesuai dengan penelitian asfahanif, 2022 yang juga menggunakan citra satelit

himawari-8. Kondisi ini diperkuat oleh pola angin yang menunjukkan adanya pergerakan udara yang konvergen di wilayah sekitar Kalianget.

Dalam dinamika atmosfer, kelembapan tinggi di lapisan 975 hPa memainkan peran penting sebagai sumber energi untuk proses pengangkatan udara. Ketika udara lembap ini naik ke lapisan yang lebih tinggi (seperti 700 hPa) akibat mekanisme pengangkatan misalnya oleh konvergensi angin, pemanasan permukaan, atau adanya gangguan frontal uap air akan mengalami pendinginan dan kondensasi, menghasilkan awan-awan tebal seperti cumulonimbus.

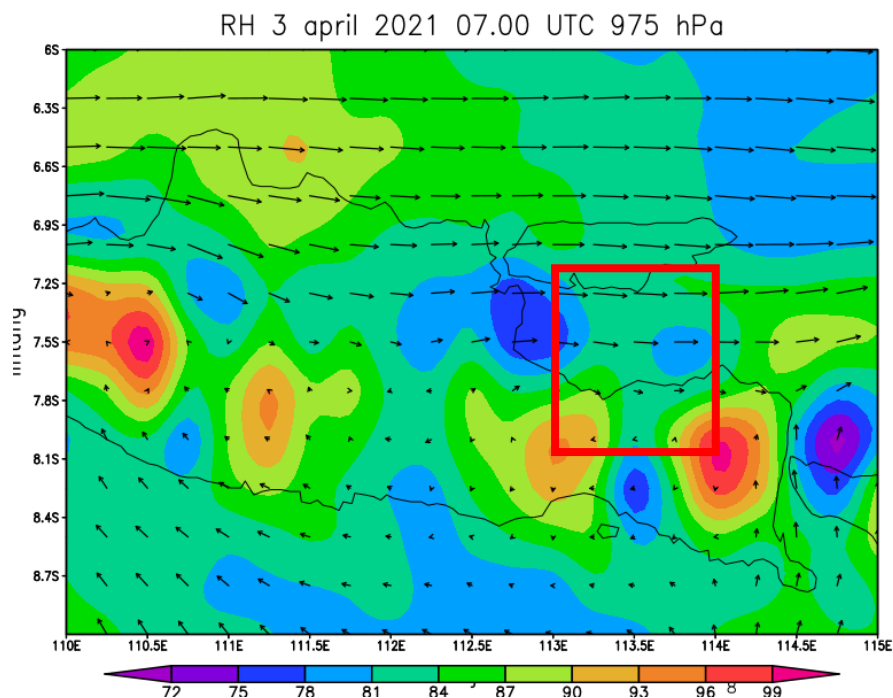
Selain itu, kelembapan tinggi di lapisan 975 hPa juga menciptakan ketidakstabilan atmosfer vertikal, terutama jika terdapat perbedaan suhu yang signifikan dengan lapisan di atasnya. Ketidakstabilan ini memperkuat konveksi yang dapat menghasilkan angin kencang, hujan deras, atau bahkan fenomena seperti angin puting beliung.



Gambar 4. 4 Nilai Skala RH pukul 06 UTC (13.00 WIB) pada lapisan 975 hpa di Kecamatan Kalianget

Pada kotak warna merah merupakan daerah yang dominasi Kecamatan Kalianget yang berpotensi terjadi angin puting beliung. Berdasarkan gambar diatas (kotak merah) memiliki distribusi kelembaban pada pukul 05 UTC yakni 63% - 93% dan ini berkesesuaian dengan terbentuknya angin puting beliung. Terlihat bahwa daerah ini berada di dekat zona kelembaban tinggi yang diwakili oleh warna kuning, hijau dan orange (sekitar 78-90%). Kelembaban tinggi ini menunjukkan banyaknya uap air di udara yang merupakan bahan bakar utama untuk pembentukan awan konvektif dan potensi badai. Sedangkan di sekitarnya, terutama di barat laut (sekitar 112°E hingga 111.5°E) terdapat zona dengan kelembaban yang relatif lebih rendah (sekitar 66-72%) yang diwakili oleh warna biru dan ungu.

Panah yang menunjukkan arah angin memperlihatkan pola konvergensi di beberapa titik, khususnya di sekitar koordinat 113.5°E dan 8.1°S. Konvergensi ini terjadi ketika angin dari berbagai arah bertemu sehingga menyebabkan udara naik ke atas. Arah angin yang bertemu di daerah konvergensi ini menciptakan kondisi yang ideal untuk pembentukan awan cumulonimbus yang tinggi dan padat yang merupakan sumber utama dari fenomena cuaca ekstrem seperti angin puting beliung. Pada gambar 4.4, terlihat pola konvergensi yang kuat di sekitar 113.5°E dan 8.1°S. konvergensi ini menyebabkan udara yang lembab dari lapisan bawah naik ke lapisan yang lebih tinggi, mendingin, dan membentuk awan cumulonimbus. Selain konvergensi, ada juga daerah divergensi yang ditunjukan oleh panah yang menyebar. Divergensi ini biasanya menunjukkan area dengan tekanan tinggi atau stabilitas atmosfer yang lebih tinggi yang cenderung menghambat pembentukan awan konvektif.



Gambar 4. 5 Nilai Skala RH pukul 07 UTC (14.00 WIB) pada lapisan 975 hpa di Kecamatan Kalianget

Gambar 4.5 menunjukkan pola distribusi kelembaban yang mencolok, terutama wilayah Kecamatan Kalianget yang berada pada koordinat $113^{\circ}\text{E} - 114^{\circ}\text{E}$ dan $7.2^{\circ}\text{S} - 8^{\circ}\text{S}$. Pada wilayah ini kelembaban relatif sangat tinggi mencapai lebih dari 96% yang ditandai dengan warna merah muda pada peta. Kelembaban relatif yang sangat tinggi ini menunjukkan bahwa atmosfer di lapisan bawah sangat jenuh dengan uap air, yang merupakan komponen penting untuk pembentukan awan awan tebal seperti cumulonimbus.

Kondisi ini tidak berdiri sendiri, melainkan diperkuat oleh pola streamline angin yang terlihat pada peta. Pola angin menunjukkan adanya konvergensi di sekitar wilayah Kalianget. Konvergensi angin terjadi ketika massa udara dari berbagai arah bertemu di satu titik dan tidak memiliki jalan keluar selain naik ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi. Proses ini menghasilkan pengangkatan massa

udara yang membawa uap air ke ketinggian yang lebih tinggi. Ketika udara ini naik, suhu udara akan turun akibat proses pendinginan adiabatik, sehingga uap air mengalami kondensasi dan membentuk awan. Dengan kelembapan relatif yang tinggi, proses kondensasi berlangsung lebih cepat dan lebih intensif, sehingga memungkinkan pembentukan awan cumulonimbus yang tebal dan menjulang tinggi.

Selain itu, gradien kelembapan relatif yang terlihat di sekitar wilayah ini juga menunjukkan adanya variasi tingkat kelembapan antara satu area dengan area lain. Gradien ini dapat menciptakan ketidakstabilan atmosfer lokal, terutama jika didukung oleh faktor pemanasan permukaan yang memicu konveksi. Ketidakstabilan atmosfer ini memperkuat pengangkatan udara secara vertikal, meningkatkan potensi terjadinya turbulensi dan fenomena cuaca ekstrem.

Pada saat kejadian angin puting beliung, kelembapan tinggi di lapisan 975 hPa memainkan peran sebagai "bahan bakar" utama, sementara konvergensi angin menjadi pemicu mekanisme pengangkatan udara. Kombinasi keduanya menciptakan kondisi yang sangat mendukung untuk pembentukan dan intensifikasi fenomena cuaca ekstrem seperti angin puting beliung.

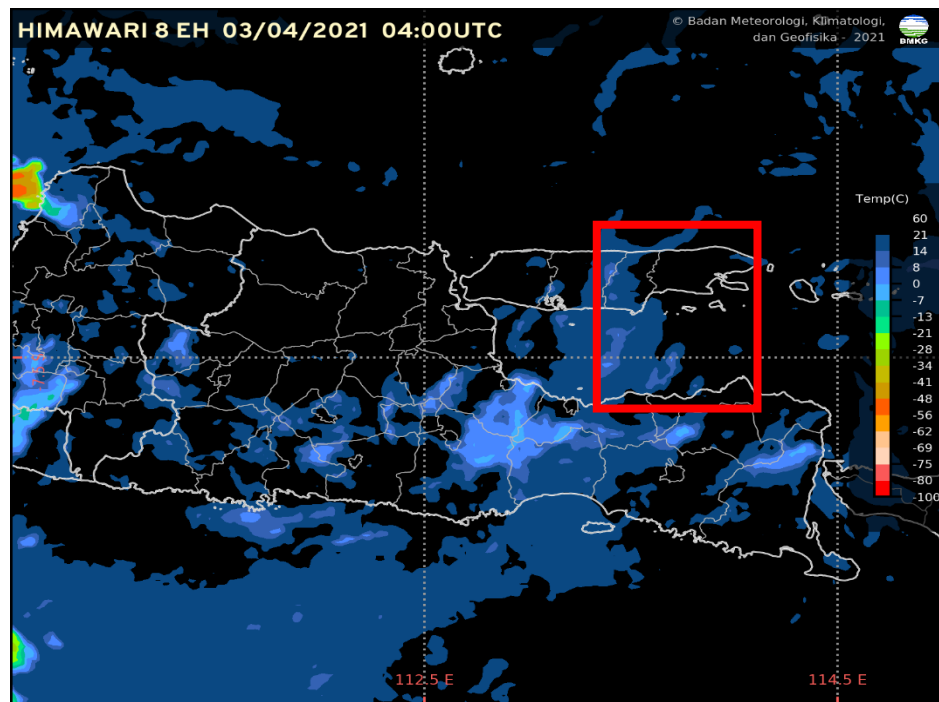
Panah pada gambar menunjukkan arah dan kecepatan angin. Panah yang lebih panjang menunjukkan angin yang lebih kuat, sedangkan panah yang lebih pendek menunjukkan angin yang lebih lemah. Arah panah menunjukkan dari mana angin datang dan kemana angin bergerak. konvektif.

4.1.4 Analisis Citra Satelit Himawari-8

Merupakan analisis yang digunakan untuk mengetahui nilai suhu puncak awan yang didapatkan dari hasil pengamatan radiasi yang kemudian

diklasifikasikan dengan pewarnaan-pewarnaan tertentu. Selanjutnya akan dilakukan analisis himawari-8 IR dengan menggunakan software SATAID untuk sekitaran wilayah Kecamatan Kalianget untuk mengetahui suhu puncak awan.

a) Tahap Pertumbuhan



Gambar 4. 6 Himawari-8 IR Tutupan Awan 04.00 UTC (11.00 WIB) di Kecamatan Kalianget

Gambar satelit menunjukkan distribusi suhu puncak awan yang direpresentasikan oleh spektrum warna dari orange hingga biru. Suhu ini adalah indikator ketinggian awan, warna hijau hingga orange mengindikasikan suhu yang sangat rendah dan karenanya puncak awan yang tinggi. Pada gambar ini, dapat dilihat area dengan suhu puncak awan yang sangat rendah berkisar antara -13°C hingga -80°C . Suhu ini mengindikasikan adanya awan dengan puncak yang sangat tinggi biasanya tipe cumulonimbus yang sering kali berhubungan dengan badai petir yang kuat.

Ketika suhu lingkungan awan sama dengan suhu titik embun dari parcel udara, kondensasi mulai terjadi dan awan mulai terbentuk. Kondisi ini dikenal sebagai level kondensasi yang merupakan dasar awan. Proses ini penting karena merupakan langkah awal dalam pembentukan awan tebal yang berpotensi menjadi awan hujan atau badai. Pada gambar ini suhu rendah yang terdeteksi menandakan bahwa parcel udara telah mencapai ketinggian kondensasi terjadi, dan awan yang terbentuk telah mencapai ketinggian yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa ada ketidakstabilan atmosfer yang cukup untuk mendukung pertumbuhan vertikal awan.

Gambar menunjukkan adanya tutupan awan di wilayah Kalianget. Pada pukul 04.00 UTC, awan tebal terlihat sudah menutupi sebagian besar wilayah tersebut. Distribusi awan ini juga menunjukkan adanya pergerakan awan dari arah barat daya ke timur laut yang mungkin merupakan dampak dari pergerakan angin di lapisan atmosfer tengah dan atas. Arah pergerakan ini bisa menunjukkan adanya sistem tekanan rendah di wilayah tersebut yang dapat memperkuat pembentukan awan.

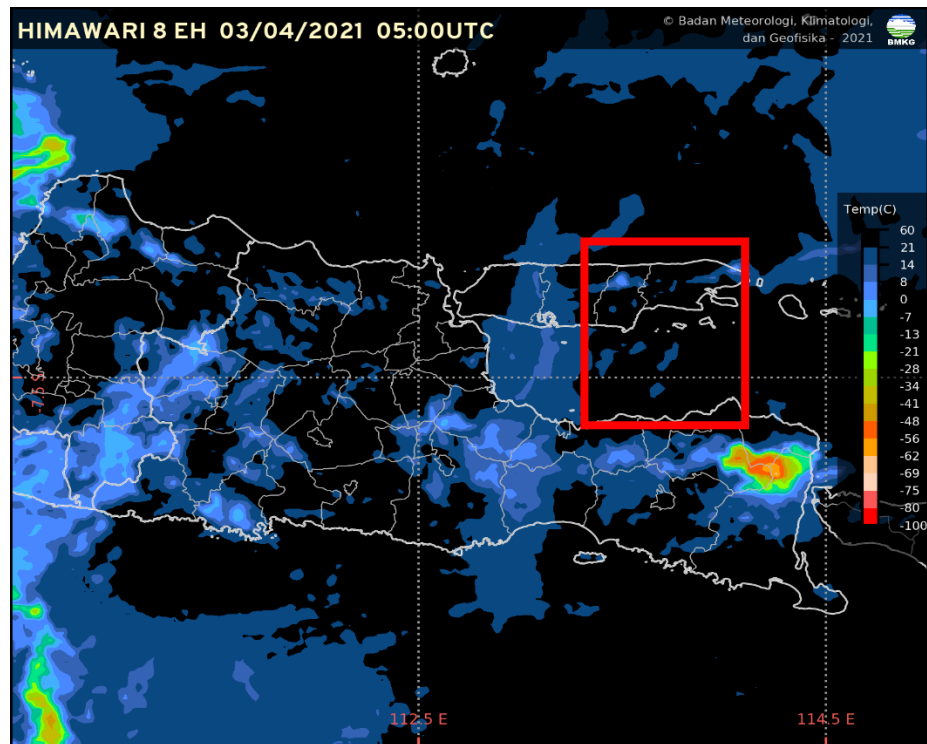
Awan yang terlihat pada gambar ini kemungkinan besar mengalami pertumbuhan vertikal yang kuat. Pertumbuhan vertikal awan ini penting karena awan yang lebih tinggi cenderung lebih tidak stabil dan berpotensi menyebabkan fenomena cuaca ekstrem seperti hujan deras, petir dan angin kencang. Awan cumulonimbus yang terdeteksi ini memiliki potensi untuk berkembang menjadi badai petir yang kuat, yang merupakan salah satu syarat utama untuk terjadinya angin puting beliung. Badai petir ini dapat memproduksi downdraft yang kuat, yang ketika mencapai permukaan dapat

menyebabkan rotasi horizontal yang kemudian berubah menjadi angin puting beliung.

Angin puting beliung biasanya terbentuk dari interaksi kompleks antara downdraft yang kuat dan updraft dalam badai petir. Downdraft ini terjadi ketika udara dingin turun dengan cepat dari awan cumulonimbus yang tinggi dan mencapai permukaan. Dalam kasus ini, gambar satelit menunjukkan bahwa pukul 04.00 UTC, ada potensi pembentukan awan cumulonimbus di sekitar wilayah Kalianget yang bisa memicu terjadinya angin puting beliung beberapa saat kemudian. Pembentukan ini mungkin dimulai dengan adanya ketidakstabilan atmosfer yang menyebabkan terjadinya konveksi kuat dan pertumbuhan awan vertikal.

Awan cumulonimbus yang terlihat pada gambar mungkin telah mencapai puncak yang sangat tinggi sebelum akhirnya mengalami siklus runtuh yang menghasilkan downdraft. Downdraft ini, ketika berinteraksi dengan angin di permukaan dapat menghasilkan vorteks yang kemudian berubah menjadi angin puting beliung.

b) Tahap Pematangan



Gambar 4. 7 Himawari-8 IR Tutupan Awan 05.00 UTC (12.00 WIB) di Kecamatan Kalianget

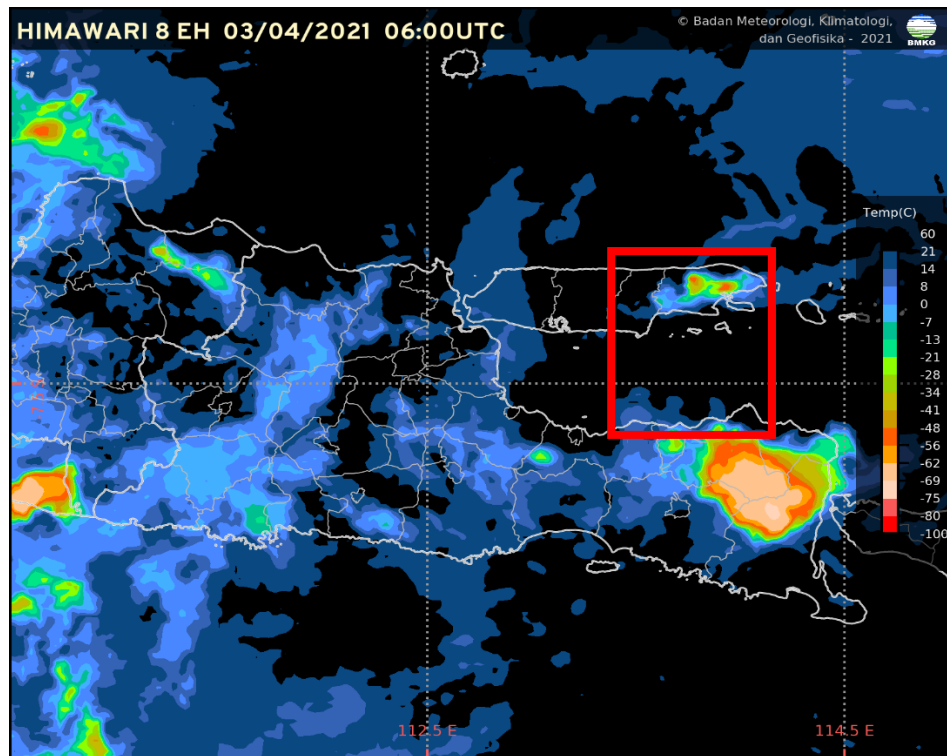
Citra ini menunjukkan kondisi atmosfer di wilayah Jawa Timur saat fase pematangan dalam pembentukan angin puting beliung di Kalianget. Warna-warna dalam citra tersebut menunjukkan suhu puncak awan (Cloud Top Temperature, CTT), warna hijau hingga orange menunjukkan suhu yang lebih rendah, mengindikasikan keberadaan awan yang tinggi dan tebal.

Pada fase pematangan ini, proses pertumbuhan awan konvektif sedang berlangsung dengan intensif. Proses ini ditandai dengan adanya gerakan udara vertikal yang kuat di dalam awan, menyebabkan butiran-butiran air di dalamnya terus bertumbuh melalui proses kondensasi, tumbukan dan penggabungan. Warna-warna cerah (hijau hingga orange) di sekitar awan utama menunjukkan area dengan suhu puncak awan yang lebih dingin yang

kemungkinan besar menunjukkan keberadaan awan cumulonimbus (awan cumulonimbus seringkali menjadi indikator adanya cuaca ekstrim).

Pada fase ini, awan konvektif berada dalam tahap pertumbuhan yang pesat. Gerakan vertikal dalam awan masih sangat aktif, udara hangat dan lembab terus naik menyebabkan butiran air dalam awan bertambah besar. Proses kondensasi yang terjadi terus menerus menyebabkan peningkatan masa butiran air yang pada akhirnya jatuh ke level yang lebih rendah di dalam awan. Dalam awan konvektif yang terlihat pada gambar, butiran air tumbuh melalui proses tumbukan dan penggabungan. Ketika butiran air mencapai ukuran tertentu, maka akan mulai turun ke bagian bawah awan. Gerakan vertikal yang masih terjadi pada fase ini memungkinkan butiran air yang lebih besar untuk terus bertambah besar hingga akhirnya gaya gravitasi mendominasi dan butiran tersebut jatuh sebagai hujan. Pada fase ini, gerakan vertikal dalam awan masih sangat kuat sehingga menyebabkan butiran air dalam awan tumbuh besar dan membentuk awan cb yang tebal. Proses ini menghasilkan kondisi atmosfer yang sangat tidak stabil sehingga memicu terjadinya angin puting beliung.

c) Tahap Disipasi



Gambar 4. 8 Himawari-8 IR Tutupan Awan 06.00 UTC (13.00 WIB) di Kecamatan Kalianget

Gambar himawari-8 ini diambil pada tanggal 03 April 2021 pukul 06.00 UTC yang bertepatan dengan fase disipasi dari angin puting beliung yang terjadi di Kalianget. Pada citra tersebut, warna-warna yang tergambar merepresentasikan suhu puncak awan (Cloud Top Temperature, CTT). Warna hijau hingga orange pada gambar menunjukkan awan dengan suhu puncak yang sangat rendah yang berarti awan-awan tersebut berada pada ketinggian yang tinggi dan memiliki ketebalan yang signifikan.

Dalam fase disipasi angin puting beliung, awan konvektif yang awalnya terbentuk secara intensif selama fase pertumbuhan mencapai kondisi energi kinetik dalam awan mulai melemah. Pada gambar ini, tampak jelas bahwa wilayah sekitar kalianget sudah terlihat awan-awan dengan suhu puncak yang

sangat rendah. Awan-awan ini sangat mungkin merupakan awan cumulonimbus (awan cb) yang terkenal karena kemampuannya menghasilkan cuaca ekstrem seperti hujan deras dan angin kencang.

Suhu puncak awan di wilayah ini tercatat berada pada rentang -7°C hingga -80°C . Suhu yang sangat rendah ini menunjukkan bahwa puncak awan berada pada ketinggian yang sangat tinggi, umumnya melebihi 10 km dari permukaan tanah. Kondisi ini menggambarkan bahwa walaupun angin puting beliung sedang dalam fase disipasi, awan-awan diatas Kalianget masih memiliki potensi untuk menghasilkan curah hujan yang signifikan. Hal ini juga dapat diindikasikan sebagai sisa-sisa aktivitas konvektif yang terjadi sebelum disipasi lengkap.

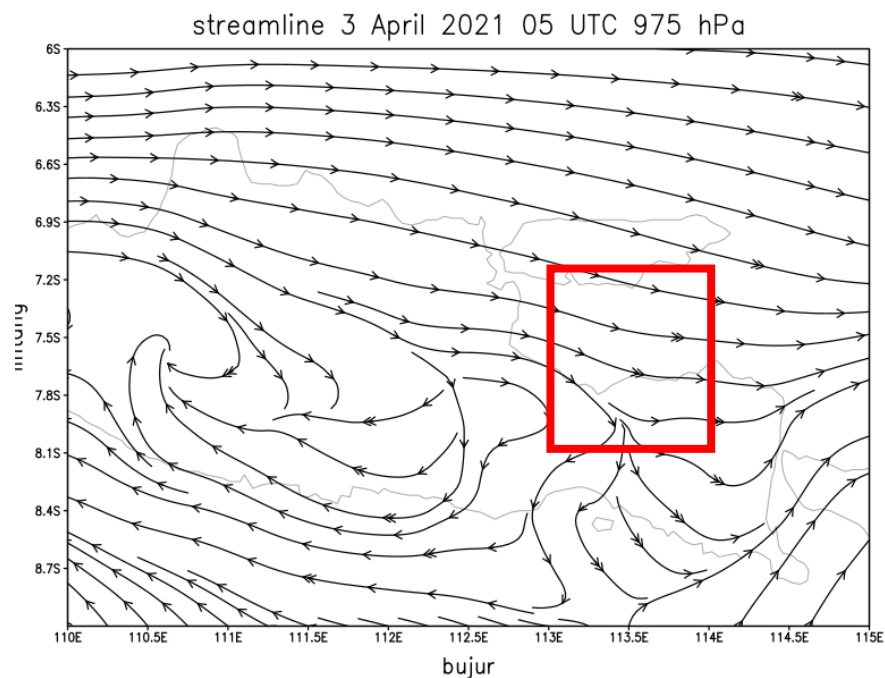
Pada tahap disipasi, partikel air di dalam awan yang telah mencapai ukuran maksimal mulai jatuh sebagai hujan. Pada saat yang sama, partikel-partikel yang lebih kecil mungkin akan menguap kembali sebelum mencapai permukaan bumi, terutama jika energi dari sistem konvektif ini mulai berkurang.

Keberadaan awan cb yang besar di wilayah tersebut mengindikasikan bahwa curah hujan masih bisa terjadi walaupun angin puting beliung telah melemah. Pada kondisi ini, area yang berada di bawah awan cb akan mengalami hujan yang cukup lebat, yang bisa disertai oleh petir dan angin kencang, walaupun intensitasnya menurun dibandingkan dengan fase puncak badai.

4.2 Analisis Dinamika Atmosfer Pada Kejadian Angin Puting Beliung

4.2.1 Analisis Streamline Angin

Tujuan dari analisis streamline angin yaitu untuk menjelaskan pola aliran angin, arah angin, kecepatan angin, serta area konvergensi dan divergensi yang mungkin mendukung pembentukan angin puting beliung di wilayah yang terpengaruh. Berdasarkan teori, arah angin tidak secara langsung mengindikasikan perubahan pola angin dari angin biasa menjadi angin puting beliung. Arah angin dipengaruhi oleh perbedaan tekanan antara tempat yang berbeda yang mempengaruhi pergerakan massa udara dan kecepatan angin. Angin puting beliung terjadi ketika terbentuknya daerah-daerah konvergen, yaitu tempat berkumpulnya udara yang berbeda tekanan.



Gambar 4. 9 Streamline angin sebelum terjadinya angin puting beliung di Kecamatan Kalianget 05.00 UTC (12.00 WIB)

Streamline menggambarkan arah aliran angin pada suatu waktu tertentu. Garis-garis streamline yang rapat menunjukkan kecepatan angin yang lebih tinggi, sedangkan pola lengkungan atau pertemuan garis-garis streamline dapat menunjukkan area konvergensi atau divergensi. Dari analisis gambar terlihat bahwa arah angin dominan menunjukkan pergerakan dari barat daya ke timur laut di bagian atas peta (sekitar 6°S hingga 6.5°S), dengan aliran angin yang relatif lurus dan konsisten. Di bagian tengah peta (sekitar 7°S hingga 8°S) angin menunjukkan pola yang lebih kompleks dengan beberapa lengkungan signifikan yang menunjukkan adanya interaksi antara aliran angin yang berbeda. Di bagian bawah peta (sekitar 8°S hingga 9°S) arah angin berubah lebih ke arah barat daya yang menunjukkan adanya variasi yang lebih besar dalam pola aliran. Di wilayah Kecamatan Kalianget (kotak merah), terlihat adanya pola pertemuan angin atau konvergensi. Konvergensi ini terjadi ketika aliran angin dari berbagai arah yang berbeda bertemu di suatu area, sehingga menyebabkan udara naik. Hal ini dapat menciptakan kondisi yang tidak stabil di atmosfer, yang dapat memicu terjadinya fenomena cuaca ekstrem seperti angin puting beliung.

Di wilayah yang ditunjukkan oleh gambar 4.9, terlihat adanya pola aliran angin yang berputar di beberapa area, khususnya di sekitar $7.5^{\circ}\text{S} - 8.1^{\circ}\text{S}$ dan $112.5^{\circ}\text{E} - 114.0^{\circ}\text{E}$. angin dari bagian barat dan selatan bertemu dan membentuk konvergensi di wilayah sekitar 7.0°S hingga 8.0°S , terutama di sekitar 112.0°E hingga 113.5°E . pola angin yang berputar ini menunjukkan adanya sistem tekanan rendah yang berkembang di wilayah tersebut dengan angin yang berputar ke dalam pusat tekanan rendah.

Awan konvektif seperti awan cumulonimbus sering terbentuk di daerah konvergensi angin. Di area angin dari berbagai arah bertemu, udara dipaksa naik ke atas kemudian udara yang naik ini mendingin dan mengembun membentuk awan konvektif. Pada gambar tersebut, daerah konvergensi di sekitar 7.5°S hingga 8.0°S dan 112.5°E hingga 113.5°E kemungkinan besar merupakan tempat terbentuknya awan konvektif. Kondisi ini sangat mendukung pembentukan awan cumulonimbus, yang dapat berkembang menjadi badai petir dan berpotensi menghasilkan angin puting beliung.

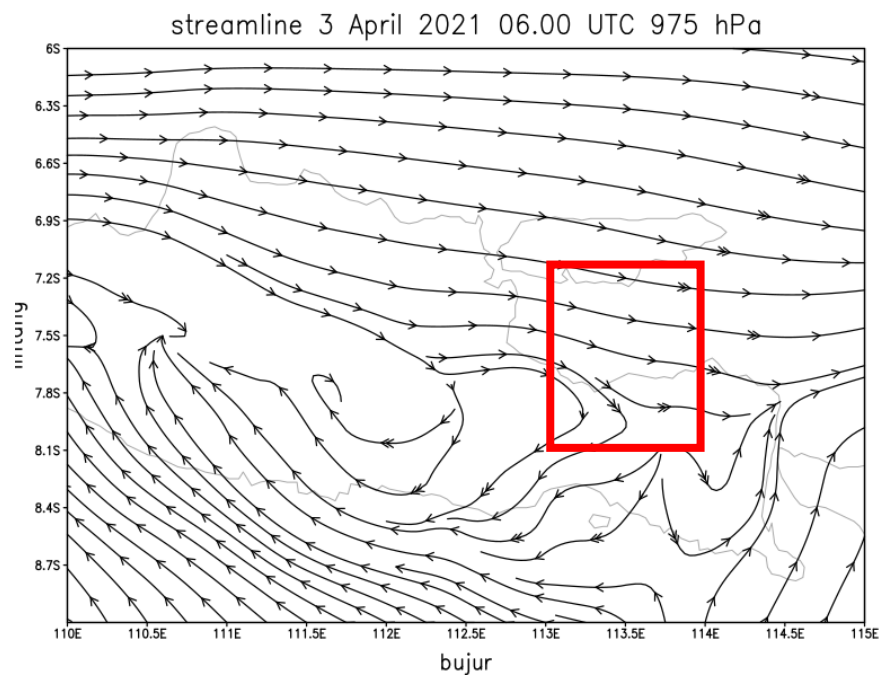
Pada gambar 4.9, terdapat 2 pola aliran berputar yang terlihat. Pola aliran pertama terletak di sekitar koordinat $7.5^{\circ}\text{S} - 7.8^{\circ}\text{S}$ dan $112.5^{\circ}\text{E} - 113.0^{\circ}\text{E}$. Aliran angin di sini menunjukkan putaran ke dalam yang menciptakan pola siklonik, menunjukkan adanya sistem tekanan rendah lokal. Sedangkan pola aliran kedua terletak di sekitar koordinat $7.8^{\circ}\text{S} - 8.1^{\circ}\text{S}$ dan $113.0^{\circ}\text{E} - 113.5^{\circ}\text{E}$. Pola ini juga menunjukkan putaran ke dalam, memperkuat adanya sistem tekanan rendah atau konvergensi yang lebih besar.

Peta streamline tidak secara langsung menunjukkan kecepatan angin, tetapi kepadatan garis streamline dapat memberikan indikasi. Semakin rapat garis streamline, semakin tinggi kecepatan angin di daerah tersebut. Dari peta ini, terlihat daerah dengan garis yang tampak lebih rapat di sekitar 7.5°S hingga 8°S dan 111.5°E hingga $113.^{\circ}\text{E}$ menunjukkan kecepatan angin yang lebih tinggi, yang mendukung pembentukan cuaca buruk.

Pada saat yang sama, kehadiran pola aliran angin yang konvergen bisa menyebabkan udara naik ke atas dengan cepat. Ketika udara naik, ia mendingin dan mengalami kondensasi, uap air yang terkandung di dalamnya mengembun

membentuk awan cumulonimbus. Proses pembentukan awan ini bisa terjadi dengan cepat dalam kondisi konvergensi angin yang kuat, seperti yang terlihat pada peta streamline. Pada peta ini, divergensi tidak dampak dominan, hal ini menunjukkan bahwa wilayah ini lebih didominasi oleh kondisi konvergensi yang mendukung pembentukan angin puting beliung.

Dengan mempertimbangkan data dari peta streamline, dapat disimpulkan bahwa pola aliran angin yang konvergen di kecamatan Kalianget pada tanggal 03 April 2021 pukul 05.00 UTC (12.00 WIB) mendukung pembentukan angin puting beliung.



Gambar 4. 10 Streamline angin saat terjadinya angin puting beliung di Kecamatan Kalianget 06.00 UTC (13.00 WIB)

Pada peta ini, terlihat di bagian atas peta (sekitar 6°S hingga 6.6°S) arah angin dominan adalah dari barat daya ke timur laut, angin bergerak relatif lurus dengan

sedikit perubahan arah. Sedangkan di bagian tengah peta (sekitar 7°S hingga 8°S), pola angin menjadi lebih kompleks dengan adanya lengkungan signifikan yang menunjukkan interaksi antara aliran angin yang berbeda. Di bagian bawah peta (sekitar 8°S hingga 9°S) arah angin cenderung lebih bervariasi, menunjukkan pola yang lebih dinamis dengan beberapa arah aliran angin berbeda.

Peta streamline ini tidak memberikan informasi langsung tentang kecepatan angin, akan tetapi mendapatkan petunjuk dari kerapatan garis streamline. Di area garis-garis streamline lebih rapat, kecepatan angin cenderung lebih tinggi. Sebaliknya, di area di mana garis-garis tersebut lebih renggang, kecepatan angin cenderung lebih rendah. Konvergensi angin terjadi ketika aliran angin dari berbagai arah bertemu di satu titik, menyebabkan peningkatan tekanan ke atas dan mendukung pembentukan awan cumulonimbus yang dapat memicu badai petir dan angin puting beliung. Pada peta ini, area konvergensi dapat diidentifikasi di sekitar 7.5°S hingga 8°S dan 111.5°E hingga 112.5°E . Garis-garis streamline di daerah ini bertemu, menunjukkan bahwa udara sedang berkumpul dan naik. Dan untuk area divergensi dapat diidentifikasi di sekitar 8.5°S hingga 9°S dan 114°E hingga 115°E yakni garis-garis streamline tampak menyebar.

Kepadatan garis streamline memberikan indikasi kecepatan angin. Garis-garis yang lebih rapat menunjukkan kecepatan angin yang lebih tinggi. Di area konvergensi (sekitar 7.5°S hingga 8°S dan 111.5°E hingga 112.5°E) garis-garis streamline tampak lebih rapat hal ini menunjukkan bahwa kecepatan angin lebih tinggi di area ini sehingga mendukung kondisi yang memungkinkan pembentukan badai petir. Di bagian lain peta, garis-garis streamline lebih renggang hal ini

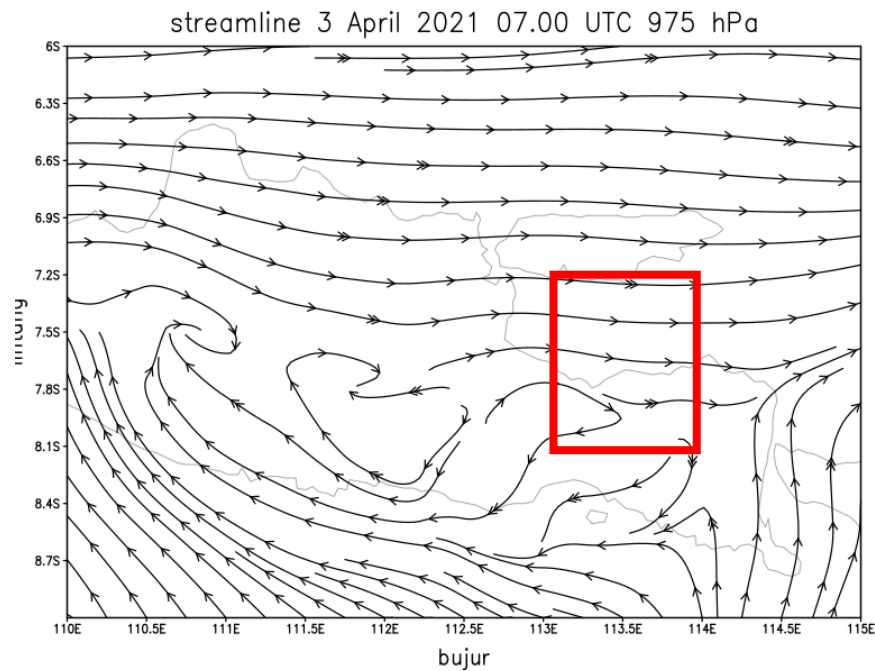
menunjukkan kecepatan angin yang lebih rendah dan kondisi atmosfer yang lebih stabil.

Awan konvektif terbentuk ketika udara hangat dan lembap naik dengan cepat ke atmosfer, biasanya di daerah konvergensi angin atau tekanan rendah. Di area yang ditunjukkan oleh pola berputar (siklonik), udara hangat dari permukaan naik, mendingin, dan mengembun, membentuk awan konvektif yang dapat berkembang menjadi awan cumulonimbus.

Kehadiran konvergensi di sekitar Kecamatan Kalianget pada peta streamline ini menunjukkan bahwa ada kemungkinan peningkatan aliran udara ke atas di wilayah tersebut. Konvergensi angin di permukaan dapat menyebabkan udara naik, mendingin, dan membentuk awan cumulonimbus yang tinggi, yang sering dikaitkan dengan badai dan angin puting beliung. Proses ini diperkuat oleh adanya shear angin, yaitu perubahan kecepatan dan arah angin dengan ketinggian, yang memberikan rotasi tambahan pada sistem cuaca.

Pada peta streamline ini, adanya lengkungan garis-garis streamline menunjukkan indikasi adanya shear angin. Shear angin ini dapat menyebabkan rotasi dalam arus udara yang naik, yang jika cukup kuat, dapat membentuk mesocyclone - inti rotasi dalam badai yang dapat menghasilkan angin puting beliung.

Dalam konteks angin puting beliung, shear angin memainkan peran penting dalam pembentukan dan intensifikasi sistem rotasi. Pada peta ini, pola streamline yang melengkung di beberapa area menunjukkan adanya shear angin yang cukup signifikan. Hal ini meningkatkan peluang terbentuknya sistem rotasi yang kuat dan berpotensi menjadi angin puting beliung.



Gambar 4. 11 Streamline angin setelah terjadinya angin puting beliung di Kecamatan Kalianget 07.00 UTC (14.00 WIB)

Peta ini menunjukkan bahwa pola angin pada pukul 07.00 UTC terlihat cukup teratur mengindikasikan bahwa angin pada waktu tersebut tidak terlalu turbulen dan cenderung stabil setelah kejadian angin puting beliung. Pada wilayah sekitar 6°S hingga 6.9°S arah angin tetap dominan dari barat daya ke timur laut dengan aliran yang relatif lurus dan konsisten. Sedangkan pada wilayah sekitar 7°S hingga 8°S arah angin tampak masih memiliki pola berputar walaupun tidak sekuat sebelum kejadian. Dan pada bagian bawah peta sekitar 8°S hingga 9°S arah angin bervariasi dengan beberapa arah aliran yang berbeda yang dalam hal ini menunjukkan dinamika atmosfer yang kompleks. Pada peta tersebut, area konvergensi dapat diidentifikasi di sekitar 7.5°S hingga 8°S dan 111.5°E hingga 112.5°E. Garis-garis streamline di daerah ini bertemu, menunjukkan bahwa udara sedang berkumpul dan naik. Sedangkan untuk area divergensi biasanya menunjukkan

daerah tekanan tinggi dan cuaca yang lebih stabil yang dalam hal ini area divergensi dapat diidentifikasi disekitar 8°S hingga 9°S dan 113°E hingga 114°E yang menunjukkan garis-garis streamline tampak menyebar.

Pada area sekitar 7.5°S hingga 8°S dan 111.5°E hingga 112.5°E , garis-garis streamline tampak lebih rapat. Ini menunjukkan bahwa kecepatan angin lebih tinggi di area ini sehingga mendukung kondisi yang memungkinkan pembentukan angin puting beliung sebelumnya. Sedangkan pada bagian garis-garis streamline yang lebih renggang, kondisi ini menunjukkan bahwa kecepatan anginnya lebih rendah dan kondisi atmosfernya lebih stabil.

Awan konvektif terbentuk ketika udara hangat dan lembap naik dengan cepat ke atmosfer. Ini biasanya terjadi di daerah konvergensi angin atau tekanan rendah. Pola berputar yang masih terlihat menunjukkan bahwa daerah tersebut masih memiliki aktivitas konvektif yang bisa menyebabkan pembentukan awan kumulonimbus meskipun dengan intensitas yang berkurang.

Setelah terjadinya angin puting beliung, atmosfer biasanya menunjukkan tanda-tanda stabilisasi walaupun pola konvergensi dan divergensi mungkin masih ada. Pada peta ini, area konvergensi di sekitar 7.5°S hingga 8°S dan 111.5°E hingga 112.5°E masih menunjukkan aktivitas konvektif yang berkelanjutan akan tetapi tidak seintens saat terjadinya angin puting beliung. Arah angin di area konvergensi cenderung berubah yang dalam hal ini menunjukkan dinamika yang masih aktif. Setelah angin puting beliung, mesocyclone yang telah terbentuk mulai melemah. Udara yang berkumpul dan naik di area konvergensi mulai menyebar sehingga menyebabkan divergensi di permukaan.

4.2.2 Analisis K-Indeks dan Total-total (TT) indeks

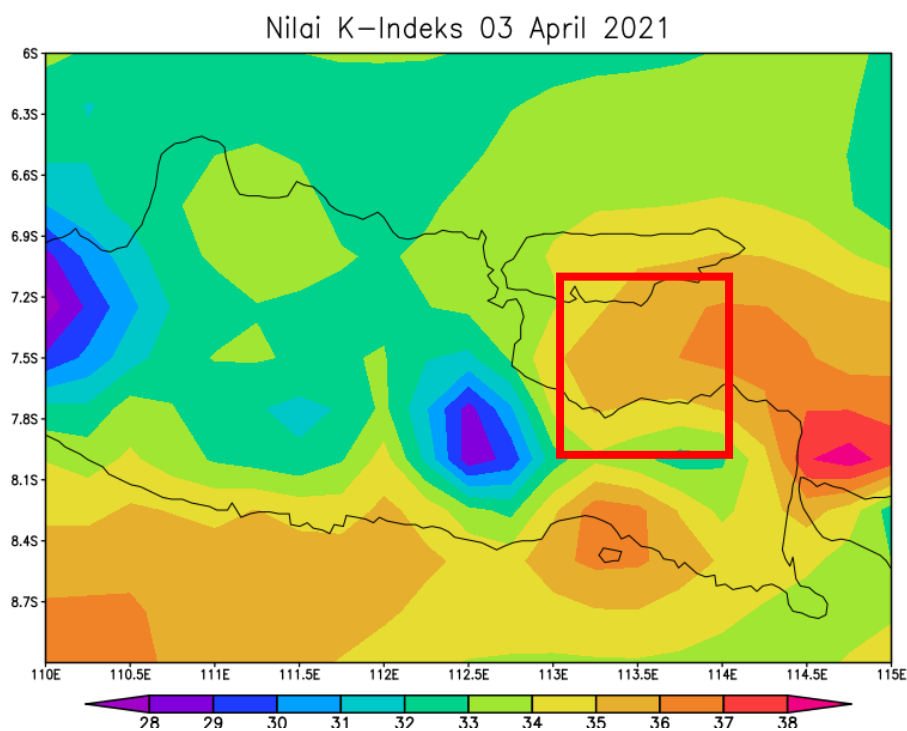
K-Indeks adalah parameter cuaca yang digunakan untuk mengindikasikan potensi terjadinya badai petir berdasarkan kondisi atmosfer (Wirjohamidjojo dan Swarinoto, 2014). Sedangkan TT Indeks digunakan untuk mengindikasikan potensi cuaca buruk (Prasetyo dkk, 2020).

Adapun kriteria nilai dari indeks tersebut yang dijabarkan pada tabel berikut.

Tabel 4. 1 Kriteria Nilai Indeks Stabilitas Atmosfer

Indeks	Lemah	Moderate	Kuat
K Indeks	< 29	29 – 37	>37
TT Indeks	< 42	42 - 46	>46

(Sumber: Wirjohamidjojo dan Swarinoto. (2014), Prasetyo dkk. (2020))



Gambar 4. 12 Peta K-Indeks di Kecamatan Kalianget

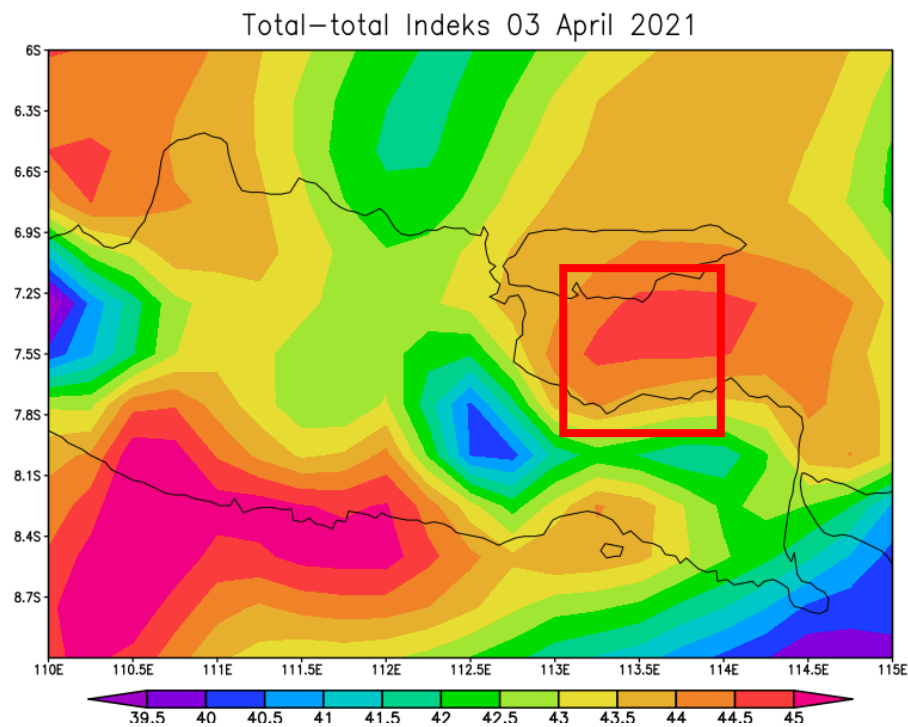
Pada peta ini, berbagai warna menunjukkan nilai k-indeks dengan skala warna di bagian bawah gambar yang menunjukkan nilai-nilai dari 28 hingga 38. Warna ungu mewakili nilai K-Indeks lemah (sekitar 28) yang artinya nilai ini menunjukkan kondisi atmosfer yang kurang mendukung untuk mengindikasikan potensi terjadinya badai petir. Biru dan hijau mewakili nilai K-Indeks moderat (sekitar 29-31), nilai ini menunjukkan kondisi atmosfer yang moderat untuk konveksi kuat dan badai petir. Hijau muda dan kuning juga mewakili nilai K-Indeks moderat (sekitar 32-34), nilai ini menunjukkan kondisi atmosfer yang moderat untuk konveksi dan potensi badai petir. Kuning tua dan merah mewakili nilai K-Indeks moderat (sekitar 35-37), nilai ini menunjukkan kondisi atmosfer yang mendukung untuk konveksi kuat dan badai petir. Merah muda mewakili nilai K-Indeks sangat kuat (38), ini adalah nilai yang sangat mendukung untuk pembentukan badai petir yang kuat dan potensi angin putting beliung.

Kecamatan Kalianget berada di sekitar 113.5°E dan 7.2°S (kotak warna merah). Pada peta, daerah ini ditunjukkan dengan warna orange hingga merah muda yang menunjukkan nilai K-Indeks tinggi hingga sangat tinggi sekitar 36-38. Nilai ini, mengindikasikan potensi tinggi untuk terjadinya konveksi dan badai petir yang kuat. Nilai K-Indeks yang tinggi hingga sangat tinggi di sekitar kecamatan kalianget menunjukkan kondisi atmosfer yang sangat mendukung untuk pembentukan awan konvektif dan badai petir. Hal ini mengartikan bahwa terdapat banyak energi tersedia di atmosfer untuk mendukung pertumbuhan awan cumulonimbus yang dapat memicu angin puting beliung.

K-Indeks tinggi menunjukkan bahwa terdapat kelembaban yang cukup di lapisan tengah atmosfer (850 hpa hingga 700 hpa) dan perbedaan suhu yang

signifikan antara lapisan bawah dan atas atmosfer. Kondisi ini menciptakan ketidakstabilan udara yang tinggi, yang merupakan salah satu faktor penting dalam pembentukan badai petir. Daerah dengan K-Indeks tinggi memiliki potensi besar untuk terjadinya badai petir yang kuat. Badai petir ini dapat menghasilkan angin kencang, hujan deras, dan angin puting beliung. Nilai K-Indeks diatas 35 sering kali dikaitkan dengan potensi terjadinya badai petir yang parah dan angin puting beliung.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan asfahanif, 2022 yang juga menggunakan citra satelit Himawari-8 menunjukkan bahwa kondisi atmosfer dengan kelembaban tinggi dan ketidakstabilan udara yang tinggi sangat mendukung terjadinya angin puting beliung. Nilai K-Indeks yang tinggi pada peta ini konsisten dengan temuan tersebut, menunjukkan bahwa pada tanggal 3 April 2021, kondisi atmosfer di sekitar Kalianget sangat mendukung untuk terjadinya fenomena angin puting beliung.



Gambar 4. 13 Peta Total-Total (TT) Indeks di Kecamatan Kalianget

Peta TT-Indeks pada tanggal 03 april 2021 memberikan informasi tentang kondisi atmosfer yang relevan dengan kejadian angin puting beliung di Kecamatan Kalianget.

Peta ini menunjukkan berbagai warna yang merepresentasikan nilai TT-Indeks dengan skala warna di bagian bawah gambar, yang berkisar dari 39.5 hingga 45. Warna ungu dan biru gelap mewakili nilai TT-Indeks lemah (sekitar 39.5-40.5), nilai ini menunjukkan kondisi atmosfer stabil dengan potensi cuaca buruk yang rendah, wilayah ini tidak menunjukkan ketidakstabilan atmosfer yang signifikan. Warna toska dan hijau juga mewakili nilai TT-Indeks lemah (sekitar 41-42), nilai ini menunjukkan wilayah dengan ketidakstabilan atmosfer yang mulai terbentuk tetapi masih tergolong rendah potensi cuaca buruknya. Hijau terang dan kuning mewakili nilai TT-Indeks moderat (sekitar 42.5-43.5), nilai ini menunjukkan

kondisi atmosfer mulai mengalami ketidakstabilan dengan potensi cuaca buruk yang lebih tinggi, seperti hujan lebat atau badai petir ringan. Warna orange dan merah mewakili nilai TT-Indeks moderat (44-45), nilai ini memiliki potensi tinggi untuk cuaca buruk yang signifikan termasuk kemungkinan badai petir yang kuat.

Kecamatan Kalianget berada di sekitar 113.5°E dan 7.2°S (kotak warna merah). Pada peta, daerah ini ditunjukkan dengan warna kuning hingga orange, yang menunjukkan nilai TT-Indeks sedang hingga tinggi, sekitar 43-44. Nilai ini mengindikasikan potensi yang cukup tinggi untuk terjadinya cuaca buruk. Nilai TT-Indeks yang tinggi di sekitar Kecamatan Kalianget menunjukkan bahwa kondisi atmosfer cukup mendukung untuk pembentukan awan konvektif yang kuat, yang dapat memicu badai petir dan angin puting beliung. TT-Indeks tinggi menunjukkan bahwa terdapat kelembaban yang cukup di lapisan atmosfer dan perbedaan suhu yang signifikan antara lapisan bawah dan atas atmosfer. Hal ini menciptakan ketidakstabilan udara yang tinggi, yang merupakan salah satu faktor penting dalam pembentukan badai petir. Daerah dengan TT-Indeks tinggi memiliki potensi besar untuk terjadinya badai petir yang kuat. Badai petir ini dapat menghasilkan angin kencang, hujan deras, dan dalam beberapa kasus, angin puting beliung. Nilai TT-Indeks di atas 44 sering kali dikaitkan dengan potensi terjadinya badai petir yang parah dan angin puting beliung.

Adapun hubungan K-indeks, TT-indeks, kelembaban, suhu udara dan tekanan ialah K-indeks dan TT-indeks berfungsi sebagai indikator cuaca konvektif dan badai yang sangat dipengaruhi oleh kelembaban, suhu udara, dan tekanan. Kelembaban tinggi dan suhu permukaan yang tinggi meningkatkan potensi ketidakstabilan atmosfer yang meningkatkan nilai K-indeks dan TT-indeks.

Tekanan rendah mendukung proses konveksi yang tercermin dalam nilai indeks yang lebih tinggi, menunjukkan potensi untuk cuaca ekstrem seperti badai petir dan angin puting beliung.

Penelitian sebelumnya menurut asfahanif, 2022 menunjukkan bahwa kondisi atmosfer dengan kelembaban tinggi dan ketidakstabilan udara yang tinggi sangat mendukung terjadinya angin puting beliung. Nilai TT-Indeks yang tinggi pada peta ini konsisten dengan temuan tersebut, menunjukkan bahwa pada tanggal 3 April 2021, kondisi atmosfer di sekitar Kalianget sangat mendukung untuk terjadinya fenomena angin puting beliung.

4.3 Ibrah dan Hikmah dari Fenomena Angin Puting Beliung dalam Perspektif Al-Qur'an

Penelitian mengenai fenomena angin puting beliung menggunakan citra satelit himawari-8 memberikan wawasan yang mendalam terkait dinamika atmosfer yang kompleks. Walaupun dapat dijelaskan secara ilmiah, fenomena ini juga menyimpan pelajaran spiritual yang sejalan dengan ajaran Al-Quran. Dalam islam, alam semesta dan peristiwa yang terjadi di dalamnya merupakan tanda-tanda kebesaran Allah (ayat-ayat kauniyah) yang dapat direnungkan.

Adapun keterhubungan ilmu pengetahuan dan spiritualitas, penelitian ilmiah tentang angin puting beliung menggambarkan kompleksitas ciptaan Allah. Sebagai contoh, analisis awan cumulonimbus yang menjadi salah satu pemicu utama fenomena ini, menunjukkan bagaimana sistem atmosfer bekerja secara harmonis. Hal ini sejalan dengan firman Allah dalam surah yunus ayat 6:

إِنَّ فِي اخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ وَمَا خَلَقَ اللَّهُ فِي السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ لَآيَاتٍ لِّقَوْمٍ يَتَّقُونَ

“Sesungguhnya pada pergantian malam dan siang dan pada apa yang diciptakan Allah di langit dan di bumi benar-benar terdapat tanda-tanda (kebesaran-Nya) bagi orang-orang yang bertakwa”. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya memberikan manfaat ilmiah tetapi juga memperkuat keyakinan akan kebesaran Allah.

Adapun hikmah dari penelitian ini ialah :

- a. Kesadaran akan kekuasaan Allah.

Penelitian ini menegaskan betapa kecilnya manusia dihadapan kehendak Allah. Fenomena seperti angin putting beliung yang terjadi secara tiba-tiba dan bersifat destruktif, mengingatkan kita bahwa manusia tidak sepenuhnya dapat mengendalikan alam.

- b. Pentingnya ikhtiar

Islam mengajarkan pentingnya usaha (ikhtiar) dalam menghadapi berbagai tantangan. Dengan memahami pola dan karakteristik angin putting beliung melaui penelitian, manusia dapat meningkatkan kemampuan mitigasi bencana untuk mengurangi dampak buruknya.

- c. Keseimbangan antara ilmu dan iman

Penelitian ilmiah seperti ini membuktikan bahwa ilmu pengetahuan dan iman dapat berjalan beriringan. Semakin dalam manusia memahami fenomena alam maka semakin besar keyakinannya terhadap kebesaran Allah.

d. Kontribusi bagi kemaslahatan umat

Penelitian ini memberikan manfaat praktis bagi masyarakat, khususnya dalam mitigasi bencana dan sistem peringatan dini.

Fenomena angin puting beliung bukan sekedar peristiwa meteorologi biasa, melainkan tanda kekuasaan Allah yang penuh pelajaran. Penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk memahami aspek ilmiah dari fenomena tersebut tetapi juga menyediakan ruang refleksi spiritual tentang kebesaran Allah. Dengan mengintegrasikan ilmu pengetahuan dan nilai-nilai keimanan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yang luas, baik dalam pengembangan ilmu pengetahuan maupun dalam kehidupan bermasyarakat.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Angin puting beliung di Kecamatan Kalianget pada 03 April 2021 diawali oleh pemanasan hingga 32°C yang memicu konveksi intensif, membawa udara lembab ke lapisan atmosfer atas. Di dukung oleh tekanan rendah 1005.0 hPa, dan kelembaban relatif tinggi hingga 93%. Konvergensi angin di lapisan 975 hpa mendukung pembentukan awan cumulonimbus dengan suhu puncak rendah (-80°C). Analisis citra satelit himawari-8 menunjukkan siklus pertumbuhan awan cumulonimbus sebagai faktor utama terjadinya fenomena ini.
2. Angin puting beliung di Kecamatan Kalianget pada 03 April 2021 terjadinya akibat dinamika atmosfer yang kompleks, termasuk konvergensi angin di koordinat $7.5^{\circ}\text{S} - 8.0^{\circ}\text{S}$ dan $113.0^{\circ}\text{E} - 113.5^{\circ}\text{E}$, yang memicu pembentukan awan cumulonimbus dengan suhu puncak rendah (80°C). Nilai tekanan rendah (1005.0 hPa), kelembaban tinggi (93%), K-Indeks (36-38), TT-Indeks (43-44), dan shear angin mendukung intensifikasi badai petir. Penelitian ini menegaskan pentingnya analisis atmosfer untuk memprediksi dan mengurangi dampak cuaca ekstrem.

5.2 Saran

Adapun saran dari penelitian ini ialah:

Untuk penelitian lanjutan disarankan menggunakan data satelit dengan resolusi temporal dan spasial yang lebih tinggi seperti satelit Sentinel atau MODIS. Dengan resolusi yang lebih baik, proses deteksi pergerakan angin, pembentukan awan, serta dinamika atmosfer bisa dianalisis lebih detail.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus Fany, 2010. *Gerak Bumi dan Bulan*. Physics Education Department: Universitas Pendidikan Indonesia
- BMKG. 2000. Instruksi MET/101/SYNOP/2000. Jakarta: Indonesia.
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2010). *Peraturan Kepala Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Nomor 009 Tahun 2010 Tentang Prosedur Standar Operasional Pelaksanaan Peringatan Dini, Pelaporan, dan Diseminasi Informasi Cuaca Ekstrem*.
- Bambang Utoyo, 2006. *Geografi Membuka Cakrawala Dunia Untuk Kelas X Sekolah Menengah Atas / Madrasah Aliyah*. PT Setia Purna Inves: Bandung.
- Fawzi, N. 2016. *Penginderaan jauh untuk lingkungan dan konservasi*. Penerbit Ombak, Yogyakarta.
- Firdausi. 2023, 17 September. *Hujan di Sumenep Diprediksi Turun November, Ini Pesan Ketua LPBINU*. Diakses tanggal 29 November 2023. <https://www.nu.or.id/daerah/hujan-di-sumenep-diprediksi-turun-november-ini-pesan-ketua-lpbinu-SqQF1> .
- Gentemann, C. L. 2011. Sea Surface Temperature: Satellite Microwave SSTs for climate. In WCRP OSC, climate Research in Service to Society.
- Harsa, H., Linarka, U. A., Kurniawan, R., & Noviati, S. (2011). Pemanfaatan SATAID untuk analisa banjir dan angin puting beliung: Studi Kasus Jakarta dan Yogyakarta. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 12(2).
<https://sumenepkab.go.id/profil/letak-geografis>, diakses tanggal 28 November 2023.
<https://www.antaranews.com/berita/2079442/angin-puting-beliung-landa-sumenep> diakses tanggal 04 Desember 2023.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Thunderstorm>, diakses tanggal 05 Desember 2023.
- Kim Putra, 2017. *Gambaran Umum Kondisi Daerah*. Sumenep.
- Kushardono, Dony. 2012. *Kajian Satelit Penginderaan Jauh Cuaca Generasi Baru Himawari 8 dan 9*. Jakarta: Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional. (<https://www.researchgate.net>)
- Nirkayanto, 1979. *Angin Ribut di Jawa*. Fipia : Universitas Indonesia.

- Nurjani, E., Rahayu, A., & Rachmawati, F. (2013). *Kajian Bencana Angin Ribut di Indonesia Periode 1990-2011 : Upaya Mitigasi Bencana*. Geomedia : Majalah Ilmiah dan Informasi Kegeografian, 11(2).
- Paski, J. A. I., Sepriando, A., & Pertiwi, D. A. S. (2017). Pemanfaatan Teknik RGB Pada Citra Satelit Himawari-8 Untuk Analisis Dinamika Atmosfer Kejadian Banjir Lampung 20-21 Februari 2017. *Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*, 4(3), 8-15.
- Purkis, S. and V. Klemas. 2011. *Remote sensing and global environmental change. 1st ed. Wiley-Blackwell, West Sussex, UK : 384p.*
- Ratna Indrawasih, 2012. *Gejala Perubahan Iklim, Dampak dan Strategi Adaptasinya Pada Wilayah dan Komunitas Nelayan di Kecamatan Bluto, Kabupaten Sumenep*. Jurnal Masyarakat dan Budaya : Vol. 14 No. 3 (2012).
- Sangkertadi. 2013. *Kenyamanan Termis di Ruang Luar Beriklim Tropis Lembab*. Alfabeta. Bandung
- Soegijono. 1999. *Bangunan di Indonesia dengan Iklim Tropis Lembab Ditinjau dari Aspek Fisika Bangunan*. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan dan Kebudayaan. Jakarta.
- Sugiharyanto, 2016. *Geografi dan Sosiologi Untuk SMP Kelas VII*. Quadra : Dinas Perpustakaan dan Arsip Kab. Deli Serdang.
- Sutanto, 1994. *Penginderaan Jauh Jilid 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Syafitri, Amin Nur; Maru, Rosmini; Invanni, Ichsan. 2021. *Analisis Tingkat Bahaya Bencana Angin Puting Beliung Berbasis Sistem Informasi Geografis di Kabupaten Sidenreng Rappang*. Jurnal Environmental Science, p- ISSN:2654-4490, e-ISSN: 2654-9085, Vol. 3 No. 2, April 2021.
- Soepangkat. 1994. *Pengantar Meteorologi*. Akademi Meteorologi dan Geofisika : Jakarta.
- Sudibyakto, H. A. (2018). *Manajemen Bencana di Indonesia ke mana ?*. UGM PRESS : Yogyakarta.
- Tanudidjaja, (1993). *Ilmu Pengetahuan Bumi dan Antariksa*. Jakarta : Penerbit Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.
- The King Eduka, 2018. *Mega Bank SBMPTN SOSHUM 2018*. Cmedia Imprint Kawan Pustaka : Jakarta Selatan.
- Tjasyono, B. 1999. *Klimatologi Umum*. Institut Teknologi Bandung : Bandung.

- Tjasyono, B. 2006. *Klimatologi Umum*. Institut Teknologi Bandung : Bandung.
- Tjasyono, Bayong & Harijono, Sri woro B. (2012). *Meteorologi Indonesia Vol II (Awan dan Hujan Monsun)*. Jakarta: BMKG.
- Wahyu Dwi Widodo, 2020. *Ekonomi Wilayah Untuk Perencanaan Tata Ruang*. DEEPUBLISH : Yogyakarta.
- Wirjohamidjojo, S. (2006). *Kamus Istilah Meteorologi Aeronautika*. Jakarta : Penerbit Badan Meteorologi dan Geofisika.
- Yudhoyono, E.B. 2010. "*Klasifikasi Tutupan Lahan Dan Tata Guna Lahan di Kabupaten Bandung Barat Menggunakan Citra Landsat 7 ETM dan Alos PALSAR*". Institut Teknologi Bandung.

LAMPIRAN

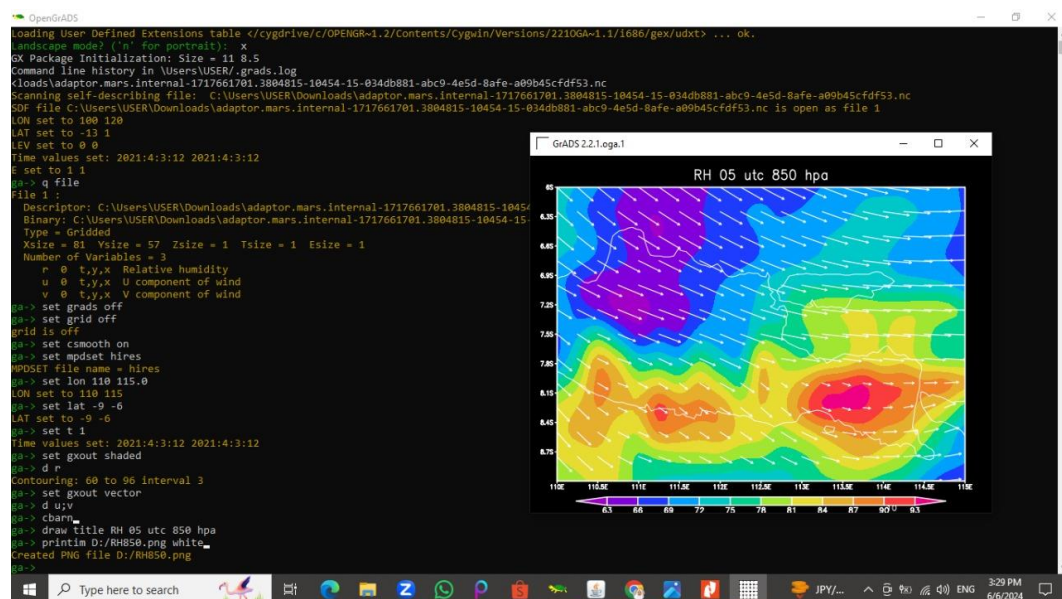
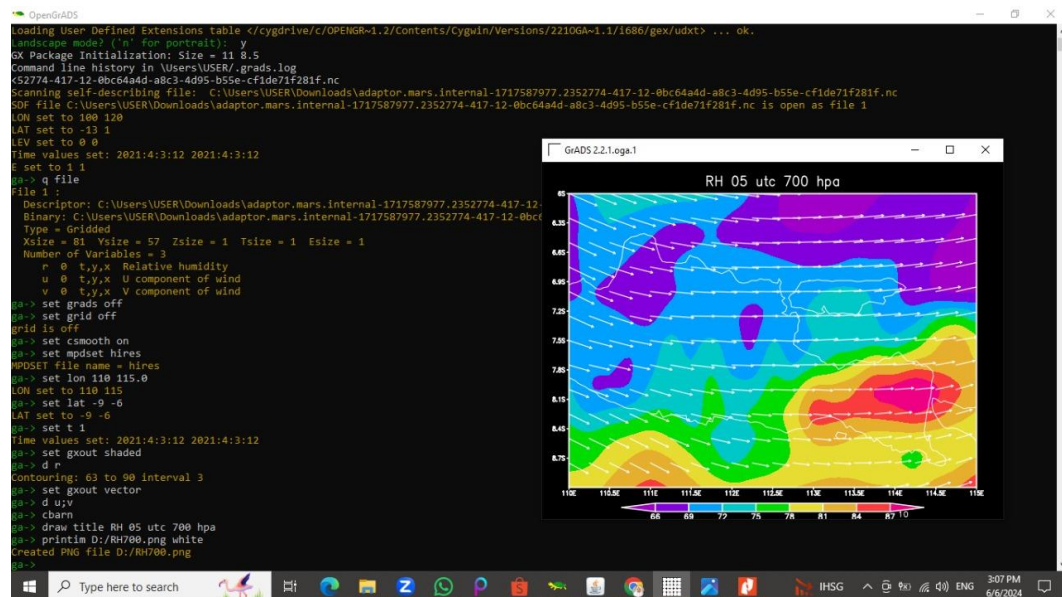
Lampiran 1. Tabel Data Suhu udara Permukaan 3 April 2021

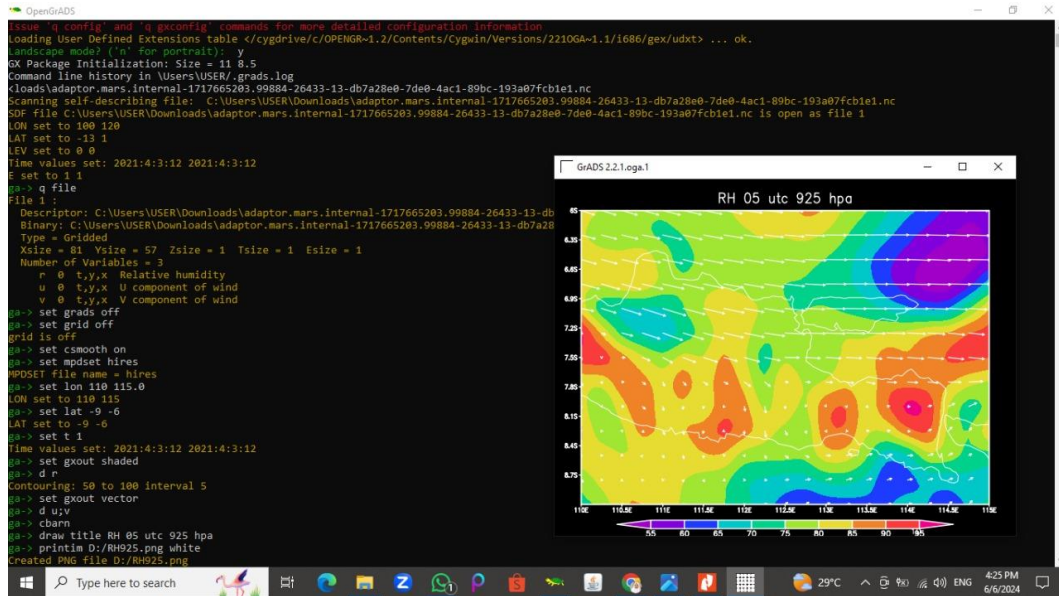
YYY	MM	DD	Jam (UTC)	Suhu Udara Permukaan
2021	4	3	00	27
2021	4	3	01	29
2021	4	3	02	30.8
2021	4	3	03	31.2
2021	4	3	04	31.6
2021	4	3	05	32.2
2021	4	3	06	31.6
2021	4	3	07	27.6
2021	4	3	08	28.2
2021	4	3	09	28.6
2021	4	3	10	28.6
2021	4	3	11	27.8
2021	4	3	12	27.4
2021	4	3	13	27.8
2021	4	3	14	27.4
2021	4	3	15	27.8
2021	4	3	16	27.7
2021	4	3	17	27.6
2021	4	3	18	26.6
2021	4	3	19	26.3
2021	4	3	20	26
2021	4	3	21	25.8
2021	4	3	22	25.8
2021	4	3	23	26.2

Lampiran 2. Tabel Data Tekanan Udara Permukaan 3 April 2021

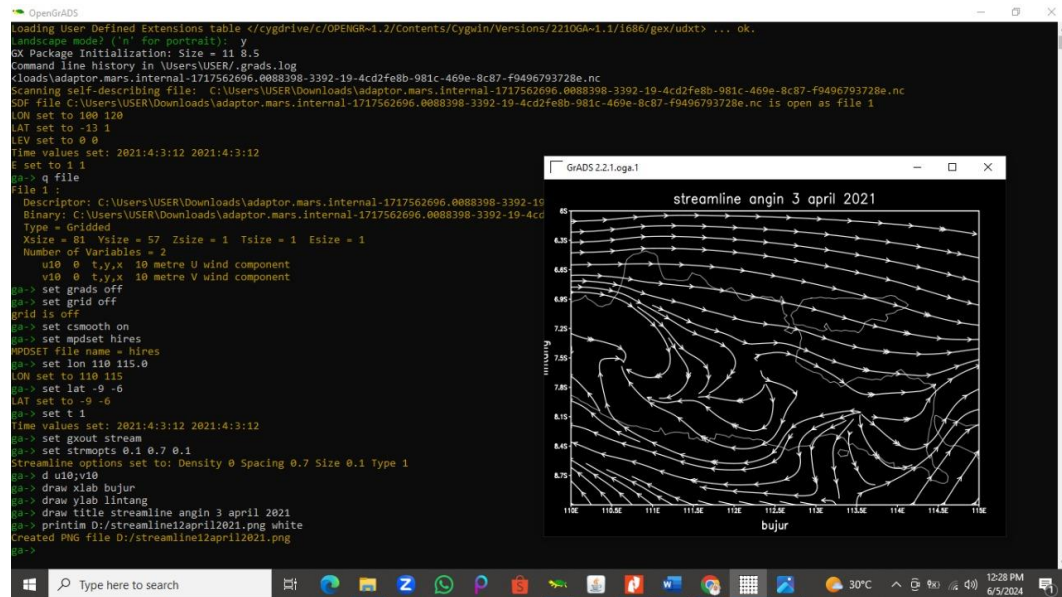
YYY	MM	DD	Jam (UTC)	Tekanan Udara Permukaan
2021	4	3	00	1007.6
2021	4	3	01	1008.3
2021	4	3	02	1008.5
2021	4	3	03	1007.8
2021	4	3	04	1006.9
2021	4	3	05	1005.8
2021	4	3	06	1005.1
2021	4	3	07	1005.3
2021	4	3	08	1004.9
2021	4	3	09	1004.4
2021	4	3	10	1005.3
2021	4	3	11	1006.3
2021	4	3	12	1007.2
2021	4	3	13	1007.8
2021	4	3	14	1008.2
2021	4	3	15	1009
2021	4	3	16	1008.3
2021	4	3	17	1007.8
2021	4	3	18	1007.3
2021	4	3	19	1007
2021	4	3	20	1006.7
2021	4	3	21	1006.8
2021	4	3	22	1007.7
2021	4	3	23	1007.9

Lampiran 3. Proses pengolahan Data Kelembaban (Relative Humidity) di Software GrADS

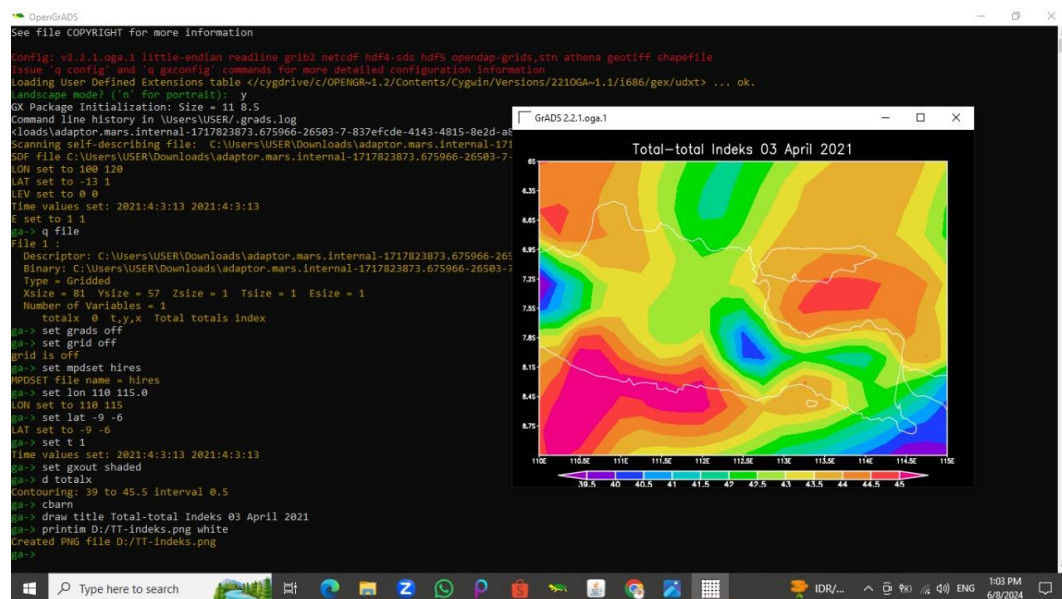




Lampiran 4. Proses pengolahan Data angin zonal-meridional di Software GrADS



Lampiran 5. Proses Pengolahan Data Indeksstabilitas Atmosfer





JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

IDENTITAS MAHASISWA

NIM : 200604110001
Nama : ZUMROTUL FAIZAH
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
Jurusan : FISIKA
Dosen Pembimbing 1 : AHMAD LUTHFIN,M.Si
Dosen Pembimbing 2 : AHMAD ABTOKHI,M.Pd
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : ANALISIS FENOMENA ANGIN PUTING BELIUNG MENGGUNAKAN CITRA SATELIT HIMAWARI 8 (STUDI KASUS KECAMATAN KALIANGET)

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	09 November 2023	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi Judul Skripsi	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
2	15 November 2023	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi Judul Skripsi	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
3	21 November 2023	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi bab I, II dan III	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
4	23 November 2023	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi bab I, II dan III	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
5	15 Desember 2023	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi bab I, II dan III	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
6	18 Desember 2023	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi bab I, II dan III	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
7	21 Desember 2023	AHMAD LUTHFIN,M.Si	ACC seminar proposal	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
8	13 Maret 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Revisi Seminar Proposal	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
9	15 Mei 2024	AHMAD ABTOKHI,M.Pd	Konsultasi Integrasi bab I, II dan IV	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
10	27 Mei 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi bab IV	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
11	03 Juni 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi Bab IV	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
12	05 Juni 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi Bab IV	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
13	10 Juni 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi bab IV	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
14	25 Juni 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi BAB IV	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
15	02 September 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi bab IV	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
16	11 September 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi bab IV	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
17	20 September 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi bab IV	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
18	02 Oktober 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi bab IV	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi

25 Oktober 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Diskusi bab IV untuk maju sidang seminar hasil	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
01 November 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi persiapan untuk maju semhas	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
13 Desember 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	konsultasi hasil revisi bab IV serta meminta ttd untuk daftar sidang skripsi	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2

AHMAD ABTOKHI,M.Pd

Malang, _____

Dosen Pembimbing 1

AHMAD LUTHFIN,M.Si

