

DAMPAK HUJAN METEOR PADA KEMUNCULAN LAPISAN E-SPORADIS DI ATAS SUMEDANG (THE IMPACT OF METEOR SHOWERS ON THE OCCURRENCE OF E-SPORADIC LAYER OVER SUMEDANG)

Rhorom Priyatikanto¹, Farahhati Mumtahana, dan Mumen Tarigan

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Dr. Djundjunan 133 Bandung 40173 Indonesia

¹e-mail: rhorom.priyatikanto@lapan.go.id.

Diterima 24 Januari 2017; Direvisi 15 September 2017; Disetujui 18 September 2017

ABSTRACT

Meteor showers have been believed as one important source of metallic ion which is accumulated at ~100 km altitude and triggering the emergence of E-Sporadic layer. In this study, meteor showers catalogue derived from the observations in visual and radio windows were used to establish a model and temporal map of annual meteor showers expected to be observed in Sumedang, West Java. The map was compared to ionospheric observation data acquired in Sumedang throughout 2014-2015 in order to understand the relation between the showers of various fluxes to the occurrence of E-Sporadic layer. The analysis revealed that several meteor showers with geocentric speed of $v_G < 50$ km/s possibly influence the occurrence of E-Sporadic layer, while the showers with $v_G > 50$ km/s impact insignificantly. However, the seasonal variation of the percentage of E-Sporadic occurrence is far more dominant compared to its fluctuation during meteor showers.

Keyword: *meteor shower, ionosphere, E-sporadic*

ABSTRAK

Hujan meteor dengan fluks tinggi telah dipercaya sebagai salah satu sumber penting ion logam yang terkumpul pada ketinggian ~ 100 km dan memicu kemunculan lapisan E-Sporadis. Pada studi ini, katalog hujan meteor hasil pengamatan pada jendela visual dan radio digunakan untuk membangun model dan peta temporal hujan meteor tahunan yang diharapkan teramati di Sumedang, Jawa Barat. Peta tersebut dibandingkan dengan data pengamatan ionosfer di Sumedang sepanjang 2014-2015 untuk mengetahui keterkaitan antara hujan meteor dengan beragam fluks serta kemunculan lapisan E-Sporadis. Hasil analisis menunjukkan bahwa beberapa hujan meteor dengan kelajuan geosentris $v_G < 50$ km/s memiliki indikasi berpengaruh pada kemunculan E-Sporadis, sementara hujan meteor dengan $v_G > 50$ km/s tidak berdampak signifikan. Namun, variasi musiman dari persentasi kemunculan E-Sporadis jauh lebih dominan dibandingkan fluktuasinya saat hujan meteor.

Kata kunci: *hujan meteor, ionosfer, E-Sporadis*

1 PENDAHULUAN

Bumi mengitari bintang induknya pada lintasan yang tidak sepenuhnya kosong. Sembari bergerak, Bumi menembus kerumunan kerikil dan debu Tata Surya yang berasal dari serpihan komet atau asteroid. Berdasarkan fungsi massa yang dikonstruksi oleh Cepelcha *et al.* (1998), Correira *et al.* (2010) memperkirakan fluks tahunan dari meteor sporadis, yakni sebesar $1,3 \times 10^8$ kg untuk rentang massa 10^{-21} hingga 10^{15} kg. Massa total meteor yang memasuki atmosfer Bumi tidaklah sebesar itu karena meteor bermassa besar ($> 2 \times 10^6$ kg) amat sangat jarang sementara meteor dengan massa terlalu kecil ($< 10^{-11}$ kg) memiliki efek yang tidak signifikan karena tidak mengalami ablasi di atmosfer. Menggunakan batasan yang lebih realistis, Correira *et al.* (2010) memperoleh fluks meteor sporadis sebesar 1×10^7 kg per tahun. Angka tersebut belum menyertakan kontribusi hujan meteor yang memiliki fluks maksimum (*zenithal hourly rate*, ZHR) hingga ratusan kali lipat dari fluks meteor sporadis.

Fluks meteor yang tidak kecil tersebut tentu mempengaruhi kondisi lingkungan dan cuaca antariksa di Bumi. Terdapat setidaknya dua aspek yang menjadi perhatian, yakni pengaruh meteor terhadap keselamatan wahana antariksa dan terhadap peningkatan kandungan ion logam di atmosfer yang

dapat berimbas pada komunikasi radio di permukaan Bumi (Ma *et al.*, 2008; Jenniskens, 2006). Aspek kedua yang akan menjadi pokok bahasan dalam studi ini.

Masuknya meteor ke atmosfer Bumi, terutama saat hujan meteor dapat meningkatkan kelimpahan ion logam di atmosfer pada ketinggian sekitar 100 km. Peningkatan ion dapat memicu terbentuknya lapisan E-Sporadis yang kemunculannya dapat mempengaruhi komunikasi radio frekuensi tinggi. Hujan meteor sebenarnya bukan merupakan mekanisme utama yang melatarbelakangi kemunculan lapisan E-Sporadis. *Wind shear* atau angin geser dianggap sebagai penyebab kemunculan lapisan tipis E-Sporadis (Mathews, 1998). Menurut teori ini, gesekan antara dua lapisan udara meningkatkan konsentrasi ion pada ketinggian 70 hingga 125 km di atas permukaan Bumi. Untuk menghasilkan lapisan E-Sporadis, kumpulan ion tersebut harus memiliki kala hidup yang cukup sebelum mengalami rekombinasi.

Terbentuknya lapisan E-Sporadis saat hujan meteor dimodelkan oleh McNeil *et al.* (2001). Meteor yang mengandung logam akan mengalami ablasi ketika bergesekan dengan atmosfer Bumi. Sebagian komponen meteor, terutama magnesium dan besi mengalami evaporasi pada temperatur yang amat tinggi dan menghamburkan

ion Fe⁺ dan Mg⁺ pada ketinggian sekitar 100 km. Lapisan ion yang dihasilkan diperkirakan memiliki kerapatan dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan angka normal serta memiliki kala hidup dalam orde hari. Model ini memberikan prediksi yang cukup baik ketika dibandingkan dengan kasus hujan meteor Perseid dan Ursid yang menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi ion di lapisan E sebagaimana diukur secara *in-situ*. Hasil pengamatan lain yang dirangkum oleh Ma *et al.* (2008) juga menunjukkan adanya gangguan pada lapisan E-Sporadis di atas daratan Tiongkok saat hujan meteor Leonid, Perseid, dan Draconid 1998 hingga 2002.

Di lain pihak, Correira *et al.* (2010) tidak mendapatkan korelasi yang nyata antara peningkatan fluks meteor dan kerapatan Mg dan Mg⁺ yang teramati oleh satelit *Global Ozone Measuring Experiment* (GOME) sepanjang 1996 hingga 2001 (Correira *et al.*, 2008). Mereka berkesimpulan bahwa hujan meteor, khususnya Geminid dan Quadrantid, tidak memberikan cukup massa untuk menyebabkan peningkatan konsentrasi ion logam skala besar dalam waktu yang lama. Kesimpulan ini tidak semerta-merta mematahkan model McNeil *et al.* (2001) karena data GOME tidak dapat digunakan untuk menelaah perubahan konsentrasi ion yang berlangsung singkat dan bersifat lokal.

Dampak hujan meteor terhadap ionosfer, khususnya terhadap kemunculan lapisan E-Sporadis, merupakan fokus dari studi kali ini. Studi sejenis pernah dilakukan oleh Rusnadi *et al.* (2002), tetapi hanya berfokus pada satu peristiwa tertentu, sementara tujuan dari studi kali ini adalah: (1) mengidentifikasi dan memetakan kejadian hujan meteor yang berpotensi mempengaruhi ionosfer regional, dan (2) memahami dampak kejadian hujan meteor terhadap kemunculan lapisan E-Sporadis di Indonesia yang telah dipetakan oleh Priyatikanto *et al.* (2016). Untuk

menjawab tujuan pertama, digunakan katalog hujan meteor yang telah dipublikasikan (Jenniskens, 1994; Brown *et al.*, 2008; Jenniskens *et al.*, 2016). Untuk menjawab tujuan kedua, digunakan data frekuensi kritis lapisan E-Sporadis (*foEs*) hasil pengukuran ionosonda di Balai Pengamatan Atmosfer dan Antariksa LAPAN di Sumedang, Jawa Barat. Analisis komparatif dilakukan terhadap kedua jenis data untuk mengetahui keterkaitan keduanya.

2 DATA

2.1 Katalog Hujan Meteor

Terdapat sejumlah katalog hujan meteor yang telah dipublikasikan, di antaranya katalog Jenniskens (1994) yang disusun berdasarkan data pengamatan visual pengamat meteor di Belanda dan Australia sepanjang 1981 hingga 1991. Dalam katalog tersebut, terdapat 50 hujan meteor tahunan dengan beberapa parameter penting, di antaranya waktu puncak, koordinat arah pancaran (*radiant*), parameter orbit sumber meteor, hingga perkiraan massa total meteor. Katalog yang lebih baru dikompilasi oleh Brown *et al.* (2008) yang dibangun dari data pengamatan radar dan Jenniskens *et al.* (2016) yang dibangun dari data pengamatan video pada jendela optik. Katalog Brown *et al.* (2008) terdiri dari 45 hujan meteor dengan beragam tingkat aktivitas yang diperoleh berdasarkan data *Canadian Meteor Orbit Radar* sejak tahun 2002, sementara katalog Jenniskens *et al.* (2016) berisikan 70 dari 95 hujan meteor yang dianggap *established* oleh *International Astronomical Union* (IAU). Katalog kedua dibangun dari hasil pengamatan meteor sejak 21 Oktober 2010 hingga 31 Maret 2013 menggunakan *Cameras for Allsky Meteor Surveillance* (CAMS, Jenniskens *et al.*, 2011).

Jenniskens *et al.* (2016) menggunakan data yang lebih baru serta merangkum lebih banyak aliran meteor

(meteor stream), tetapi mereka belum memberikan nilai *Zenithal Hourly Rate* (ZHR) yang amat penting untuk memperkirakan tingkat aktivitas dari suatu hujan meteor. Karena itu, studi ini menggunakan kombinasi katalog Brown *et al.* (2008) dan Jenniskens *et al.*

(2016) ketimbang menggunakan satu katalog saja. Kedua katalog memiliki korelasi yang amat baik, terutama bila dilihat dari hasil penentuan arah pancaran meteor (*radiant point*). Terdapat 42 aliran meteor yang disebutkan dalam kedua katalog.

Tabel 2-1: DAFTAR HUJAN METEOR YANG DIANALISIS DALAM STUDI INI. KEPANJANGAN DARI S DAN N PADA KOLOM NAMA ADALAH *SOUTHERN* DAN *NORTHERN*. PARAMETER AKTIVITAS (F_{max}), BUJUR EKLIPTIKA MATAHARI SAAT MAKSIMUM, AWAL, DAN AKHIR HUJAN METEOR (λ_{max} ; λ_{sta} ; λ_{end}) DIPEROLEH DARI Brown *et al.* (2008), SEMENTARA KOORDINAT ARAH PANCARAN (α , δ), PERGERAKAN HARIANNYA ($\Delta\alpha$, $\Delta\delta$), DAN KECEPATAN GEOSENTRIS RATA-RATA (v_G) DIPEROLEH DARI Jenniskens *et al.* (2016)

Nama	Kode	F_{max}	λ_{max} °	λ_{sta} °	λ_{end} °	α °	δ °	$\Delta\alpha$ °/hari	$\Delta\delta$ °/hari	v_G km/s
April Lyrids	LYR	36	32,5	30,0	34,0	272,0	33,4	0,66	0,02	46,7
Daytime April Piscids	APS	26	32,5	30,0	36,0	4,9	5,5	0,94	0,42	29,2
η Aquariids	ETA	277	44,5	33,0	64,0	338,1	-0,8	0,92	0,37	65,7
N Daytime ω Cetids	NOC	29	47,5	30,0	59,0	9,0	17,3	0,95	0,36	36,8
S Daytime May Arietids	SMA	30	47,5	30,0	61,0	28,4	7,7	0,92	0,32	28,3
S Daytime ω Cetids	OCE	32	49,5	34,0	59,0	20,5	-6,1	0,93	0,44	36,9
Daytime Arietids	ARI	255	76,5	65,0	93,0	43,9	24,4	1,05	0,28	41,1
S June Aquilids	SZC	28	80,5	78,0	81,0	319,3	-27,6	1,05	0,30	39,2
Daytime ζ Perseids	ZPE	41	83,5	47,0	95,0	67,4	23,4	1,00	0,20	26,4
ϵ Perseids	EPR	24	95,5	92,0	107,0	53,8	37,8	1,17	0,23	43,8
Daytime β Taurids	BTA	45	96,5	92,0	103,0	82,0	20,0	0,89	0,04	27,4
β Equuleids	BEQ	20	108,5	104,0	113,0	305,1	1,1	0,91	0,23	33,2
N June Aquilids	NZC	29	108,5	85,0	114,0	309,7	-5,3	0,95	0,26	38,3
α Lacertids	ALA	25	110,5	100,0	113,0	349,4	54,4	0,82	0,39	37,4
φ Cassiopeiids	PCA	27	116,5	112,0	120,0	36,8	72,2	1,68	0,32	42,0
α Capricornids	CAP	36	124,5	102,0	130,0	306,5	-9,2	0,97	0,24	23,0
Piscis Austrinids	PAU	26	125,5	121,0	138,0	352,5	-20,5	0,94	0,40	43,8
S δ Aquariids	SDA	356	125,5	115,0	155,0	341,3	-15,7	0,95	0,38	41,3
S ι Aquariids	SIA	22	129,5	125,0	149,0	332,9	-14,7	0,36	-0,14	30,5
Daytime χ Orionids	XRI	19	131,5	116,0	138,0	102,9	16,6	0,90	-0,40	45,4
N δ Aquariids	NDA	22	137,5	131,0	159,0	347,6	2,1	0,91	0,39	38,4
Perseids	PER	103	139,5	123,0	142,0	48,2	58,1	1,40	0,26	59,1
N ι Aquariids	NIA	33	167,5	113,0	182,0	346,7	-1,2	0,92	0,39	31,3
Daytime κ Leonids	KLE	40	178,5	164,0	189,0	162,3	14,9	0,62	-0,30	43,3
Daytime Sextantids	DSX	83	187,5	180,0	193,0	156,6	-2,4	0,91	-0,37	32,9
S Taurids	STA	56	191,5	166,0	236,0	47,9	12,8	0,99	0,26	26,6
October Draconids	DRA	20	195,5	195,0	196,0	262,9	55,7	0,34	-0,05	20,7
Orionids	ORI	132	209,5	196,0	222,0	95,9	15,7	1,03	-0,05	66,3
N Taurids	NTA	31	223,5	201,0	236,0	48,9	20,7	1,03	0,26	28,0
Leonids	LEO	82	236,5	230,0	238,0	153,8	21,8	0,99	-0,36	70,2
November Orionids	NOO	78	247,5	226,0	256,0	90,6	15,2	1,03	-0,01	42,5
Geminids	GEM	817	260,5	243,0	269,0	113,5	32,3	1,15	-0,16	33,8
December Monocerotids	MON	21	262,5	253,0	266,0	102,9	7,8	0,97	-0,09	41,4
Ursids	URS	29	270,5	270,0	271,0	219,9	75,4	0,05	-0,31	32,9
σ Serpentids	SSE	18	275,5	271,0	282,0	245,4	-4,8	0,95	-0,16	45,5
January Leonids	JLE	42	280,5	278,0	284,0	147,7	24,1	1,01	-0,34	51,4
ω Serpentids	OSE	25	280,5	270,0	281,0	252,3	-5,8	0,76	0,11	45,0
Quadrantids	QUA	238	283,5	281,0	286,0	230,2	49,5	0,56	-0,25	40,7
λ Bootids	LBO	27	295,5	283,0	299,0	221,5	42,4	1,04	-0,76	40,7
χ CoronaeBorealids	XCB	18	295,5	291,0	303,0	250,9	29,7	0,70	-0,13	45,1
θ CoronaeBorealids	TCB	24	296,5	294,0	300,0	233,6	34,4	0,30	0,16	37,7
α Antiliids	AAN	24	313,5	308,0	321,0	157,2	-9,5	0,89	-0,37	45,0

Data dari aliran tersebut dirangkum dalam Tabel 2-1. Satu hal yang perlu dicatat adalah bahwa Brown *et al.* (2008) menyertakan parameter aktivitas relatif yang ditentukan berdasarkan data pengamatan satu stasiun (F'_{\max}). Karena itu, perlu dilakukan koreksi berdasarkan posisi stasiun relatif terhadap arah pancaran meteor:

$$F_{\max} = \frac{F'_{\max}}{\cos(\delta - \varphi)}, \quad (2-1)$$

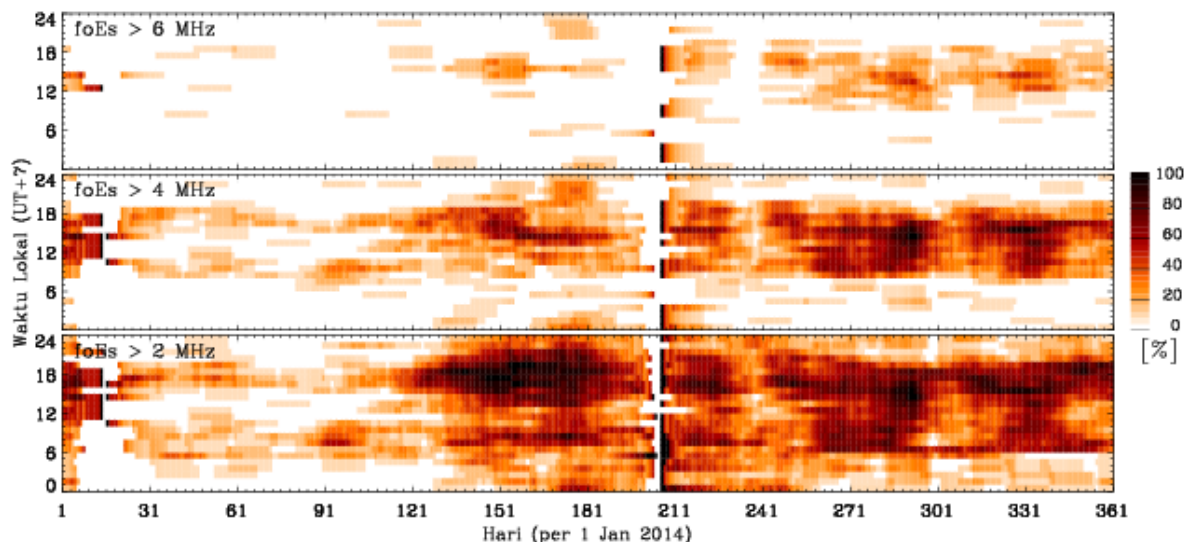
dengan δ dan φ menyatakan deklinasi arah pancaran dan lintang geografis stasiun.

2.2 Persentase Kemunculan Lapisan E-Sporadis

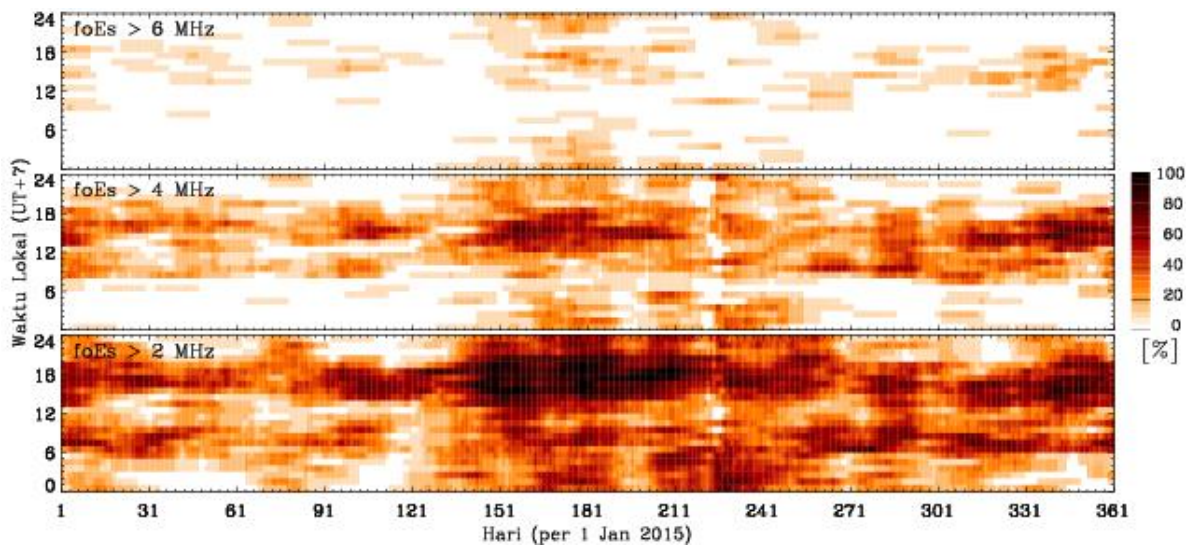
Data kedua yang digunakan dalam studi adalah peta temporal persentase kemunculan lapisan E-Sporadis di atas Sumedang yang tahun 2014-2015 yang sebagian telah dipublikasikan sebelumnya oleh Priyatikanto *et al.* (2016). Peta tersebut (Gambar 2-1 dan 2-2) dibangun berdasarkan data pengamatan ionosfer menggunakan ionosonda IPS71 di Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer

LAPAN Sumedang (6,913° LS; 107,838° BT) sepanjang 2014-2015. Persentase kemunculan (P) lapisan E-Sporadis didefinisikan sebagai jumlah kemunculan lapisan E-Sporadis pada waktu tertentu dibagi dengan jumlah pengukuran yang ada. Baik jumlah kemunculan maupun jumlah pengukuran dihitung menggunakan metode *k-th nearest neighbor* (Silvermann, 1996) dengan $k = 7$ hari. Nilai P dihitung untuk setiap jam serta dihitung dengan mempertimbangkan frekuensi ambang f_r sebesar 2, 4, dan 6 MHz.

Kemunculan lapisan E-Sporadis pada siang hari terjadi karena akumulasi ion pada ketinggian 90–120 km sebagai dampak dari dinamika mesofer dan termosfer bawah, misalnya pergeseran vertikal (*vertical drift*). Di sisi lain, pengendapan ion logam dari hujan meteor dapat berkontribusi dalam pembentukan lapisan E-Sporadis pada malam hari. Karena itu, analisis lebih dalam akan dilakukan terhadap kemunculan lapisan E-Sporadis di atas Sumedang pada malam hari (18.00 hingga 06.00 waktu lokal).



Gambar 2-1: Persentase kemunculan lapisan E-Sporadis (P) di atas Sumedang tahun 2014 dengan frekuensi kritis lebih dari 2 MHz (bawah), 4 MHz (tengah), dan 6 MHz (atas). Kemunculan E-Sporadis pada malam hari dianalisis dalam studi ini



Gambar 2-2: Persentase kemunculan lapisan E-Sporadis di atas Sumedang tahun 2015 (Priyatikanto *et al.*, 2016)

3 PEMODELAN FLUKS HUJAN METEOR

Pendekatan yang digunakan untuk memahami pengaruh kejadian hujan meteor terhadap ionosfer regional adalah analisis kemunculan lapisan E-Sporadis dengan beragam frekuensi kritis saat terjadi peningkatan aktivitas hujan meteor. Untuk keperluan tersebut, pemetaan aktivitas hujan meteor pada domain ruang dan waktu perlu dilakukan.

Aktivitas hujan meteor diparameterisasi oleh fluks meteor yang mengalami variasi mengikuti persamaan (Jenniskens, 1994):

$$F = F_{\max} \times 10^{-B(\lambda_{\text{Sun}} - \lambda_{\max})}, \quad (3-1)$$

Dengan F_{\max} menyatakan fluks maksimum hujan meteor yang terjadi ketika bujur ekliptika Matahari (λ_{Sun}) bernilai λ_{\max} . Konstanta B menyatakan laju peningkatan dan penurunan aktivitas hujan meteor. Beberapa hujan meteor memiliki laju peningkatan yang tidak simetris dengan laju penurunannya sehingga didefinisikan dua konstanta yang berbeda, misalnya B_+ saat $\lambda_{\text{Sun}} < \lambda_{\max}$ dan B_- saat $\lambda_{\text{Sun}} > \lambda_{\max}$.

Konstanta B tidak secara eksplisit diberikan oleh Brown *et al.* (2008) sehingga dihitung berdasarkan waktu awal dan akhir hujan meteor yang direpresentasikan oleh λ_{sta} dan λ_{end} .

Pada $\lambda_{\text{Sun}} = \lambda_{\text{sta}}$ dan $\lambda_{\text{Sun}} = \lambda_{\text{end}}$, fluks meteor dianggap bernilai 1 sehingga berlaku persamaan:

$$B_+ = \frac{\log F_{\max}}{|\lambda_{\text{sta}} - \lambda_{\text{Sun}}|}, \quad (3-2)$$

$$B_- = \frac{\log F_{\max}}{|\lambda_{\text{end}} - \lambda_{\text{Sun}}|}, \quad (3-3)$$

Setelah B_+ dan B_- ditentukan, fluks hujan meteor sepanjang tahun dapat dimodelkan dengan menggunakan Persamaan 3-1. Fluks tersebut merupakan fluks meteor yang teramati ketika arah pancaran berada di zenit pengamat. Bila arah pancaran berada pada jarak zenit (ζ) tertentu, maka fluks yang teramati adalah:

$$F_{\text{obs}} = F \cos \zeta \quad (3-4)$$

Dalam hal ini, ζ berubah sepanjang waktu mengikuti rotasi dan revolusi Bumi dan pergeseran arah pancaran meteor sesuai dengan besarnya $\Delta \alpha$ dan $\Delta \delta$ (Tabel 2-1).

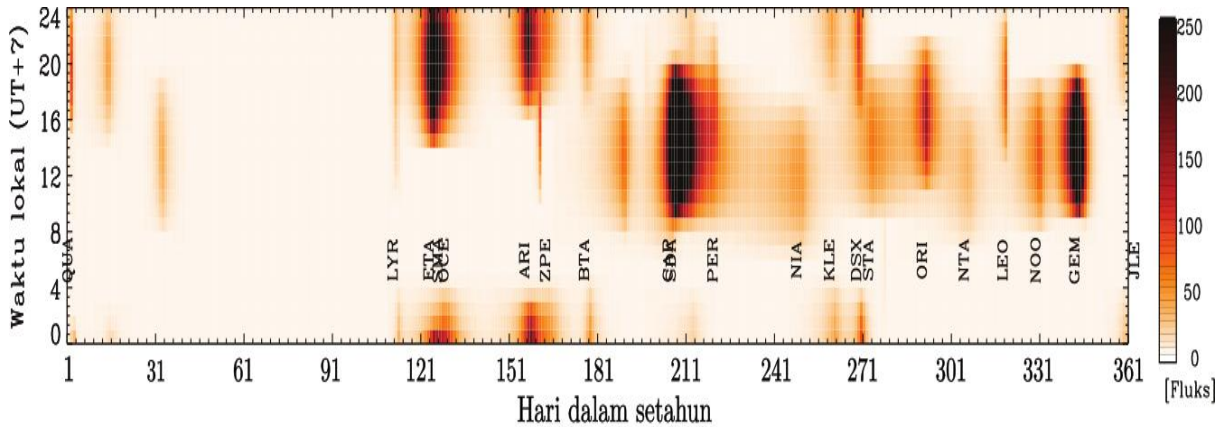
4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Model Fluks Hujan Meteor

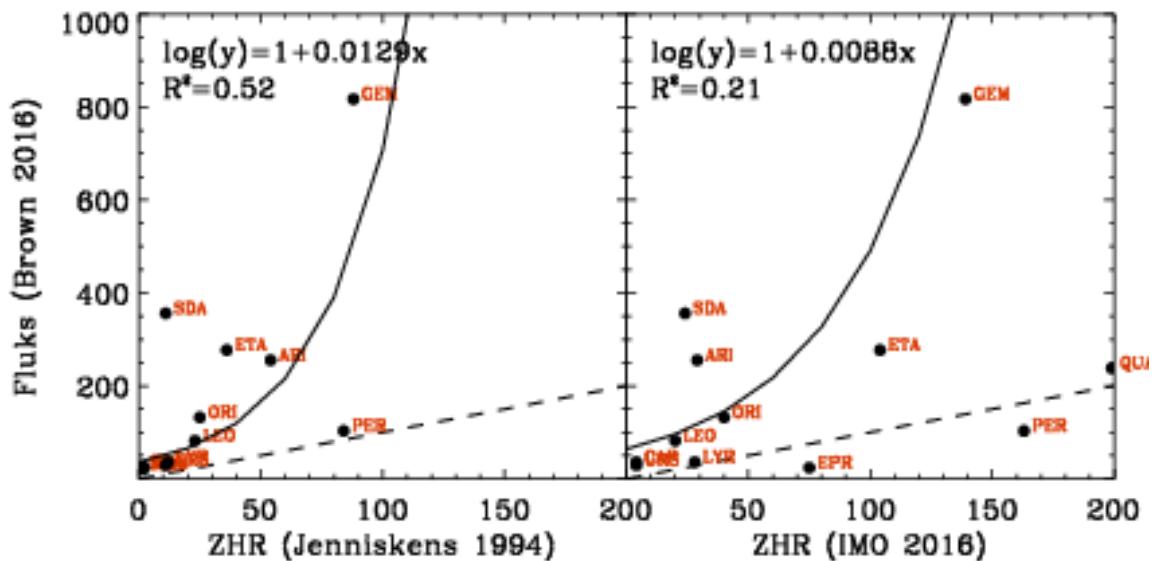
Gambar 4-1 menunjukkan peta temporal hasil pemodelan fluks hujan meteor sepanjang tahun berdasarkan

data yang dirangkum dalam Tabel 2-1. Waktu kejadian serta perkiraan intensitas dari hujan meteor dapat dibaca dari peta tersebut. Untuk mengetahui validitasnya, fluks puncak dari peta tersebut dibandingkan dengan intensitas meteor (ZHR) dari katalog Jenniskens (1994) serta hasil pengamatan *International Meteor Organization (IMO) Video Meteor Network* (Molau et al., 2013, 2014 a,b,e,d,g,c,f,h). Gambar 4-2 menunjukkan perbandingan tersebut. Tampak bahwa fluks meteor dalam katalog Brown et al. (2008) cenderung lebih tinggi dari ZHR dari pengamatan visual (Jenniskens,

1994) dan video (IMO-VMN). *Geminids (GEM)*, η *Aquariids (ETA)*, *Southern δ Aquariids (SDA)*, *Daytime Arietids (ARI)*, dan *Orionids (ORI)* adalah hujan meteor dengan fluks radio jauh melebihi ZHR pada jendela visual. Hujan meteor *Geminids (GEM)* adalah kasus yang paling mencolok karena fluks radio sekitar delapan kali lipat ZHR visual atau sekitar lima kali lipat ZHR video. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti perbedaan sensitivitas pengamatan, variasi tahunan dari fluks hujan meteor, serta perlunya transformasi dari fluks meteor menjadi ZHR.



Gambar 4-1: Hasil pemodelan fluks relatif hujan meteor tahunan berdasarkan fluks relatif dari katalog Brown et al. (2008)



Gambar 4-2: Fluks relatif hujan meteor dalam katalog Brown et al. (2008) dibandingkan dengan ZHR dari katalog Jenniskens (1994) dan hasil pengamatan *International Meteor Organization Video Meteor Network*. Garis putus-putus menandai korespondensi satu-satu ($y = x$), sedangkan garis tegas merupakan hasil *least-square fitting*

Pada Gambar 4-2, fungsi logaritmik dicocokkan dengan data. Hasilnya adalah:

$$\log F = 1 + 0,0129 \times ZHR_1, \quad (4-1)$$

$$\log F = 1 + 0,0088 \times ZHR_2, \quad (4-2)$$

dengan F menyatakan fluks meteor pada katalog Brown *et al.* (2008), sedangkan ZHR_1 dan ZHR_2 berturut-turut menyatakan ZHR dari Jenniskens (1994) dan IMO-VMN. Bila diperhatikan, korelasi fluks tidak terlalu baik karena hanya memiliki koefisien determinasi berturut-turut sebesar $R^2 = 0,52$ dan $R^2 = 0,21$. Terlepas dari perbedaan fluks tersebut, waktu kejadian hujan meteor telah diketahui dengan baik. Dengan demikian peta temporal dapat digunakan sebagai acuan dalam analisis lebih lanjut, sementara tingkat aktivitas hujan meteor perlu memperhatikan mode pengamatan yang digunakan.

4.2 Hujan Meteor dan Kemunculan Lapisan E-Sporadis

Langkah sederhana yang diambil untuk mengetahui pengaruh hujan meteor terhadap ionosfer adalah dengan menyandingkan presentase kemunculan E-Sporadis (P) dengan fluks hujan meteor yang berubah sepanjang waktu. Dengan mengasumsikan bahwa deposit ion dari meteor bertahan dalam waktu yang cukup lama (>1 jam), maka presentase kemunculan E-Sporadis direpresentasikan oleh nilai rerata P dalam satu malam.

Gambar 4-3 dan Gambar 4-4 menunjukkan plot P dengan frekuensi ambang tertentu disandingkan dengan fluks relatif hujan meteor sepanjang tahun. Presentase kemunculan E-Sporadis memiliki pola musiman yang tampak jelas (Priyatikanto *et al.*, 2016). Pada pertengahan tahun (Mei hingga September), nilai P lebih tinggi dari waktu lain. Pola semacam ini juga terjadi pada ionosfer di lintang menengah dan dikenal sebagai *summer maximum*

(Pietrella and Bianchi, 2009; Haldoupis *et al.*, 2007). Peningkatan nilai P juga terjadi pada Desember-Januari dan April sebagaimana telah dikemukakan sebelumnya. Hal ini terjadi, baik untuk $foEs > 2$ MHz, $foEs > 4$ MHz, maupun untuk $foEs > 6$ MHz. Namun, puncak dari P menurun dengan bertambahnya frekuensi ambang.

Variasi musiman dari kemunculan E-Sporadis dan juga frekuensi kritis dari lapisan ini telah menjadi bahasan oleh sejumlah peneliti karena fenomena ini tidak dapat dijelaskan dengan mekanisme *wind shear* dalam pembentukan lapisan E-Sporadis (Mathews, 1998). Shalimov *et al.* (1999) mengaitkan pola musiman lapisan E-Sporadis dengan *planetary wave* yang mengalami variasi periodik setiap 2 hari (*quasi 2 day planetary wave*). Amplitudo rerata dari gelombang ini juga mengalami peningkatan pada musim panas. Akan tetapi, mekanisme ini dinilai tidak berkontribusi secara signifikan dalam pembentukan lapisan E-Sporadis (Haldoupis *et al.*, 2007). Variasi musiman dari fluks meteor yang masuk ke atmosfer Bumi dianggap lebih berpengaruh dalam peningkatan kemunculan dan frekuensi kritis lapisan E-Sporadis pada saat musim panas. Haldoupis *et al.* (2007) secara meyakinkan menunjukkan adanya korelasi yang baik antara frekuensi kritis lapisan E-Sporadis di lintang menengah dan fluks harian meteor yang teramati dengan radar SKYIMET 33 MHz pada rentang waktu November 1991 hingga Agustus 2001.

Untuk kasus dinamika ionosfer di atas Sumedang, fluks hujan meteor tidak secara langsung berkorelasi dengan persentase kemunculan lapisan E-Sporadis. Akan tetapi, terdapat kecocokan antara waktu kejadian hujan meteor dan peningkatan nilai P sebagaimana dapat diamati pada Gambar 4-3 dan 4-4. Kesesuaian ini tampak paling jelas untuk E-Sporadis dengan frekuensi kritis $foEs > 6$ MHz. Di antara sejumlah hujan meteor tahunan yang telah dimodelkan,

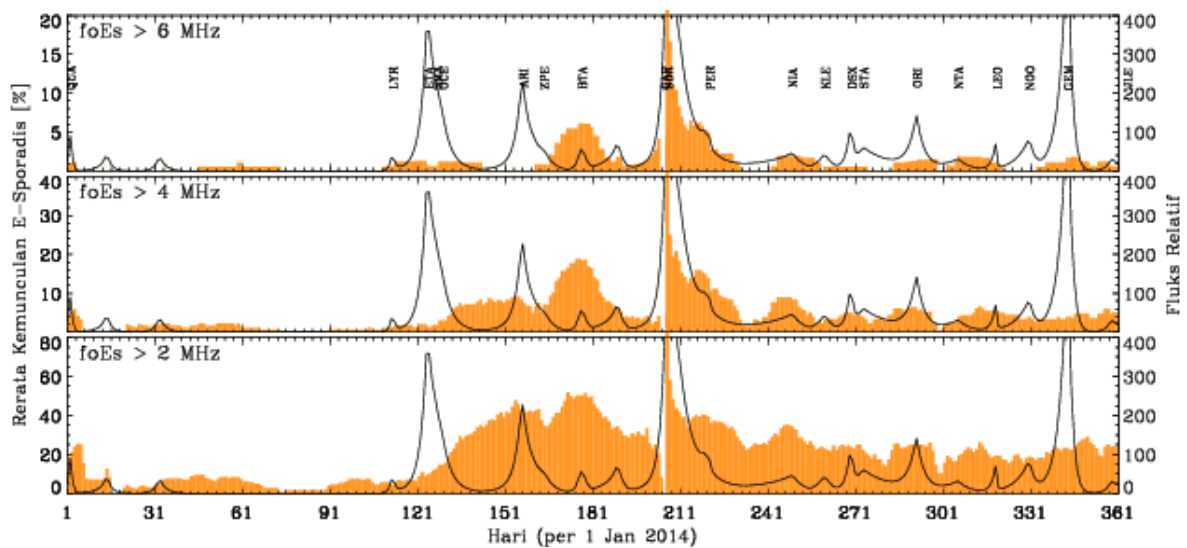
BTA, SDA, PER, dan NIA merupakan kejadian hujan meteor yang berimpit dengan peningkatan persentase kemunculan E-Sporadis (maksimum lokal). Di sisi lain, ETA, ORI, dan LEO merupakan hujan meteor tahunan dengan fluks tinggi, tetapi kejadiannya tidak diikuti dengan peningkatan nilai P . Kelompok pertama dapat dikatakan berdampak pada ionosfer di atas Sumedang.

Gambar 4-5 dan 4-6 menunjukkan analisis lebih detail yang dilakukan pada beberapa hujan meteor dalam kaitannya

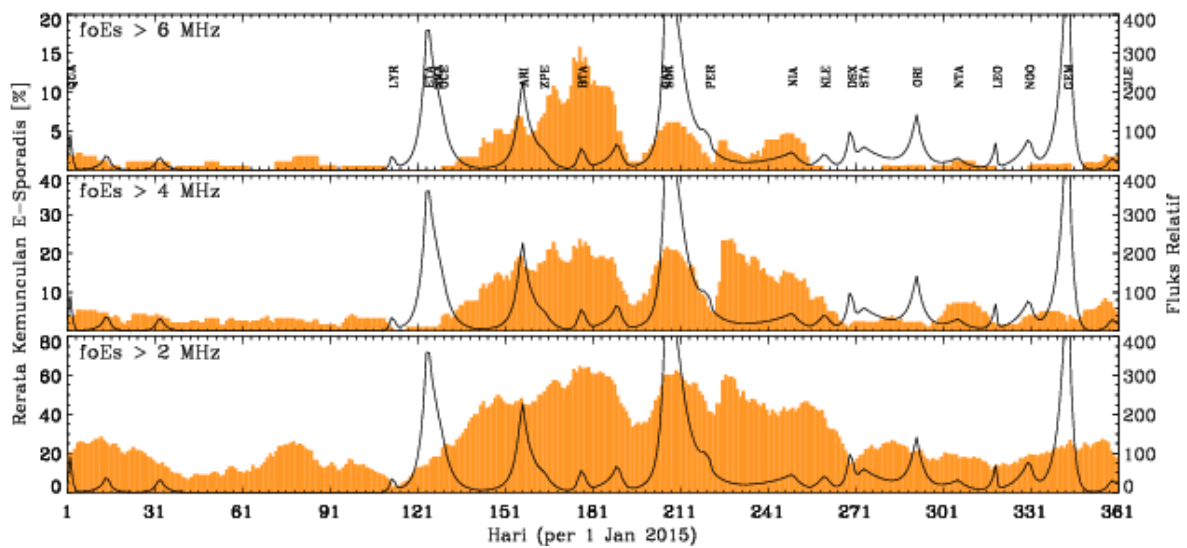
dengan peningkatan nilai P rata-rata. Regresi linier dilakukan dengan mengasumsikan adanya hubungan antara fluks hujan meteor (F) dan nilai P sesuai dengan persamaan:

$$P = a + bF, \tag{4-3}$$

dengan a dan b menyatakan koefisien korelasi antara F dan P . Koefisien determinasi (R^2) juga dihitung untuk menilai baik atau tidaknya korelasi tersebut.



Gambar 4-3: Presentase rata-rata kemunculan lapisan E-Sporadis pada malam hari tahun 2014 (area berwarna jingga). Fluks relatif hujan meteor tahunan juga digambarkan sebagai garis berwarna merah

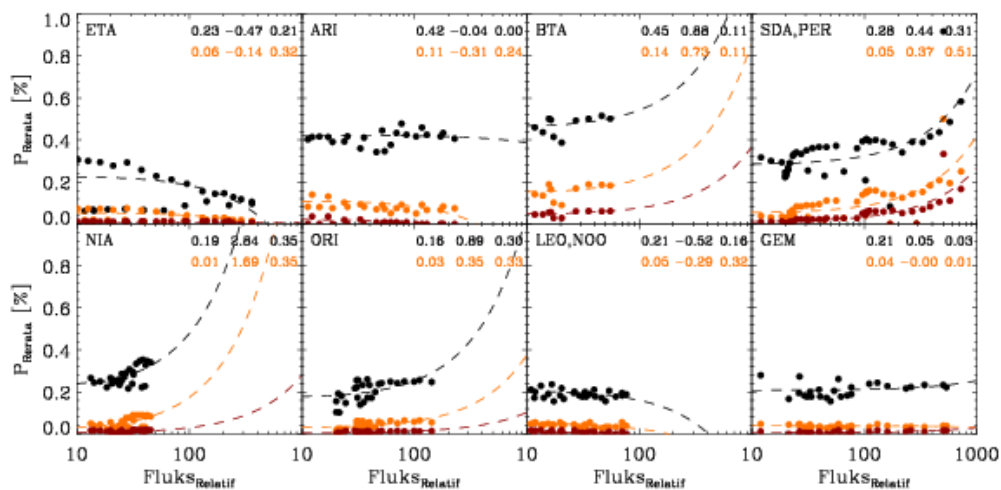


Gambar 4-4: Sama seperti Gambar 4-3, tetapi untuk data E-Sporadis tahun 2015

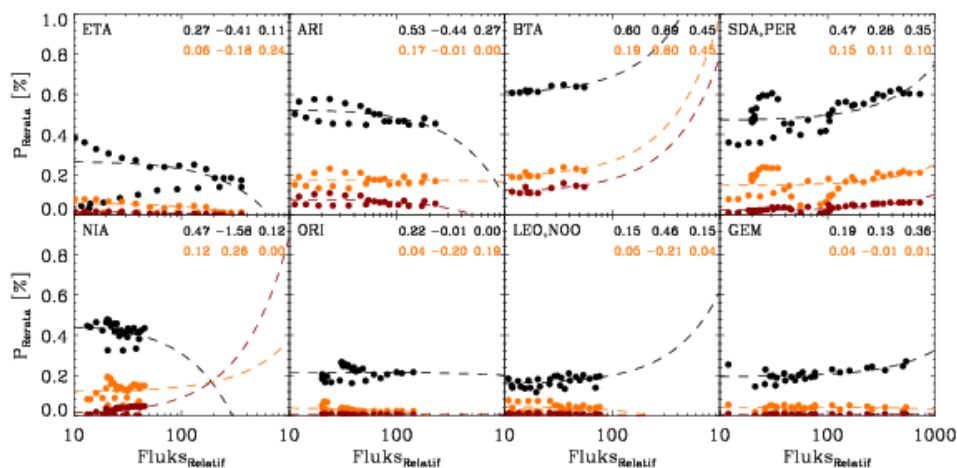
Sebagaimana diduga sebelumnya, fluks hujan meteor seperti ETA, ARI, ORI, dan LEO memiliki korelasi hampir nol atau bahkan negatif. Hal ini menunjukkan bahwa hujan meteor tersebut tidak menyebabkan peningkatan persentase kemunculan E-Sporadis. Sebaliknya, fluks hujan meteor BTA, SDA, PER, NIA, dan GEM memiliki korelasi positif terhadap P . Nilai koefisien korelasi dan koefisien determinasi juga bervariasi terhadap frekuensi ambang yang digunakan.

Bila mengacu pada parameter hujan meteor yang terangkum dalam Tabel 2-1, kelompok yang berkorelasi positif memiliki kecepatan geosentris relatif rendah ($v_G < 50$ km/s). Sebaliknya,

kelompok yang berkorelasi negatif cenderung memiliki kecepatan geosentris lebih tinggi ($v_G > 50$ km/s). Sebagaimana dimodelkan oleh Vondrak *et al.* (2008) dan juga didiskusikan dalam Pellinen-Wannberg *et al.* (2014), ketinggian ablasi serta laju produksi ion dari meteor bergantung pada massa, kerapatan, kecepatan, dan sudut datang dari meteor. Karena itu, besarnya deposit ion logam di lapisan E bergantung pada faktor tersebut. Meteor yang masuk ke atmosfer Bumi dengan kecepatan tinggi cenderung mengalami ablasi pada ketinggian lebih rendah. Meteor dengan kerapatan tinggi juga mengalami ablasi pada ketinggian rendah.



Gambar 4-5: Hubungan antara fluks relatif beberapa hujan dan persentase rata-rata kemunculan E-Sporadis (P) tahun 2014 dengan $foEs < 2$ MHz (hitam), $foEs < 4$ MHz (jingga), dan $foEs < 6$ MHz (merah bata). Kode hujan meteor dituliskan di sebelah kiri atas panel. Garis putus-putus merupakan hasil regresi dengan koefisien a , $1000b$, dan R^2 (Persamaan 4-3)



Gambar 4-6: Sama seperti Gambar 4-5, tetapi untuk data E-Sporadis tahun 2015

5 KESIMPULAN

Dalam studi ini, telah dibuat peta temporal kejadian hujan meteor tahunan berdasarkan hasil pengamatan visual dan radio yang telah dirangkum dalam katalog. Di antara 42 hujan meteor utama, terdapat beberapa hujan meteor yang memiliki indikasi berdampak pada kemunculan lapisan E-Sporadis di atas Sumedang, Jawa Barat. Hujan meteor tersebut di antaranya adalah BTA, SDA, PER, NIA, dan GEM. Di sisi lain, terdapat beberapa hujan meteor dengan fluks tinggi, tetapi tidak secara jelas menimbulkan dampak berupa peningkatan persentase kemunculan lapisan E-Sporadis. Kecepatan geosentris hujan meteor yang relatif tinggi diperkirakan memicu ablasi tidak pada ketinggian lapisan E.

Meski demikian, pengamatan ionosfer di atas Sumedang menunjukkan bahwa variasi musiman lebih dominan dibandingkan fluktuasi persentase kemunculan lapisan E-Sporadis yang berasosiasi dengan hujan meteor. Persentase kemunculan E-Sporadis mencapai maksimum pada pertengahan tahun sebagaimana *summer maximum* yang terjadi di daerah lintang menengah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada penelaah yang telah memberikan masukan perbaikan terhadap artikel ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Brown, P., R. J., Weryk, D. K., Wong, and J. Jones, 2008. *The Canadian Meteor Orbit Radar meteor stream catalog*. Earth Moon Planet, 102, 209-219.
- Cepelcha, Z., J., Borovicka, W. G., Elford, D. O., Revelle, R. L., Hawkes, V., Porubcan, and M. Simek, 1998. *Meteor phenomena and bodies*. Space Science Review, 84, 327.
- Correia, J., A. C., Aikin, J. M., Grebowsky, and J. P., Burrows, 2010. *Metal Concentrations in the Upper Atmosphere During Meteor Showers*. Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 909-917.
- Correia, J., A. C., Aikin, J. M., Grebowsky, W., D., Pesnell, and J. P., Burrows, 2008. *Seasonal Variations of Magnesium Atoms in the Mesosphere-Thermosphere*. Geophysical Research Letters, 35, L06103.
- Haldoupis, C., D., Pancheva, W., Singer, C., Meek, and J., MacDougall, 2007. *An Explanation for the Seasonal Dependence of Midlatitude Sporadic E Layers*. Journal of Geophysical Research, 112, A06315.
- Jenniskens, P., 1994. *Meteor Stream Activity. I. The Annual Streams*. Astronomy and Astrophysics, 287, 990-1013.
- Jenniskens, P., 2006. *Meteor Showers and Their Parent Comets*. Cambridge University Press.
- Jenniskens, P., P., Gural, L., Dynneson, B., Grigsby, K., Newman, M., Borden, M., Koop, and D., Holman, 2011. *CAMS, Cameras for Allsky Meteor Surveillance to Establish Minor Meteor Showers*. Icarus, 216, 40-61.
- Jenniskens, P., Q., N'enon, J., Albers, P., Gural, B., Haberman, D., Holman, R. M., A. B., Grigsby, D., Samuels, and C., Johannink, 2016. *The established meteor showers as observed by CAMS*. Icarus, 266, 331-354.
- Ma, Y., Y., He, P., Xu, and H., Zhao, 2008. *Observation and Research on Strong Meteor Showers and their Catastrophic Space Weather Events*. Chinese Astronomy and Astrophysics, 32, 186-196.
- Mathews, J. D., 1998. *Sporadic E., Current Views and Recent Progress*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 60, 413-435.
- McNeil, W. J., R. A., Dressler, and E., Murad, 2001. *Impact of a Major Meteor Storm on Earths Ionosphere, A Modeling Study*. Journal of Geophysical Research, 106, 10447.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, 2013. *Results of the IMO Video Meteor Network - September 2013*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 41, 207.

- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, 2014a. *Results of the IMO Video Meteor Network - November 2013*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 25.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, 2014b. *Results of the IMO Video Meteor Network - October 2013*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 20.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, and A., Igaz, 2014c. *Results of the IMO Video Meteor Network - April 2014*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 145.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, and A., Igaz, 2014d. *Results of the IMO Video Meteor Network - December 2013*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 76.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, and A., Igaz, 2014e. *Results of the IMO Video Meteor Network-January 2014*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 83.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, and A., Igaz, 2014f. *Results of the IMO Video Meteor Network - June 2014*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 201.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, R., Goncalves, and A., Igaz, 2014g. *Results of the IMO Video Meteor Network-May 2014*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 150.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, R., Goncalves, A., Igaz, C., Saraiva, M., Maciewski, and M., Maslov, 2014h. *Results of the IMO Video Meteor Network-August 2014*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 239.
- Pellinen-Wannberg, A., K., I., Haggstrom, J., D., C., Sanchez, J., M., C., Plane, and A., Westman, 2014. *Strong E Region Ionization Caused by the 1767 Trail During the 2002 Leonids*. Journal of Geophysical Research, Space Physics, 119, 7880.
- Pietrella, M., and C., Bianchi, 2009. *Occurrence of Sporadic-e Layer Over the Ionospheric Station of Rome, Analysis of Data for Thirty-two Years*. Advances in Space Research, 44, 72.
- Priyatikanto, R., F., Mumtahana, and M., Tarigan, 2016. *Variasi Diurnal dan Musiman Kemunculan Lapisan E-Sporadis di atas Sumedang tahun 2015*. Jurnal Sains Dirgantara, 13, 113-122.
- Rusnadi, I. E., N., Ristanti, and T., Djamaluddin, 2002. *Pola Frekuensi Kritis dan Ketinggian Lapisan E-Sporadis di atas Biak pada saat Terjadi Hujan Meteor*. Warta LAPAN, 2, 159.
- Shalimov, S., C., Haldoupis, M., Voiculescu, and K., Schlegel, 1999. *Mid-latitude E Region Plasma Accumulation Driven by Planetary Wave Horizontal Wind Shears*. Journal of Geophysical Research, 104, 28207.
- Silvermann, B., 1996. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman & Hall.
- Vondrak, T., J. M. C.m Plane, S.m Broadley, and D., Janches, 2008. *A Chemical Model of Meteoric Ablation*. Journal of Atmospheric Chemistry and Physics, 8, 7015.