



## SKENARIO *UNCERTAINTY* JUMLAH PENAKAR CURAH HUJAN DI KOTA MAKASSAR

Giarno<sup>1</sup>, Muflihah<sup>2</sup>, Mujahidin<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Paotere Maritime Station, BMKG Makassar

<sup>2</sup>BBMKG Region IV Makassar

<sup>1</sup>[giarno97182@gmail.com](mailto:giarno97182@gmail.com), <sup>2</sup>[muflihah\\_mat@yahoo.co.id](mailto:muflihah_mat@yahoo.co.id), <sup>3</sup>[didin.bmkg@gmail.com](mailto:didin.bmkg@gmail.com)

### ABSTRACT

*The availability of accurate rainfall data becomes very important in various fields. The requirement of measuring rainfall will increase, especially if there is an increase in rainfall due to extreme rainfall, such as floods that occurred in Makassar City in 2019. This study aims to create a scenario of optimal number of rain gauge in Makassar City. Determination of the optimal number of rain gauge uses the coefficient of variation and the degree of error based on recently rainfall data at this location. The results of several error rate scenarios indicate changes in the optimal number of rain gauge to the error scenario. The more accurate the desired data, the number of rain gauge must increase, the long duration of accumulation requires an optimal number of rain gauge. 10 rain station locations are needed for Makassar City with an error rate of 5% and 5 rain gauge locations for an error rate of 10%. Based on the combination between the rain gauge, the addition of rain gauge between Balai IV or Biring Romang and Sudiang is required, as well as an addition also needed between Paotere and Barombong.*

**Keywords:** optimum rain gauge, rainfall, Makassar

### ABSTRAK

Ketersediaan data curah hujan yang akurat sangat penting dalam berbagai bidang. Kebutuhan akan penakar curah hujan akan makin meningkat terutama jika terjadi peningkatan curah hujan akibat hujan ekstrim, seperti banjir yang terjadi di Kota Makassar tahun 2019. Penelitian ini bertujuan membuat skenario jumlah penakar hujan yang optimal di Kota Makassar. Penentuan jumlah *rain gauge* yang optimal menggunakan *coefficient of variation* dan derajat kesalahan berdasarkan data curah hujan pada stasiun yang tersedia. Hasil skenario beberapa tingkat kesalahan menunjukkan adanya perubahan jumlah optimal *rain gauge* terhadap skenario kesalahan. Semakin akurat data yang diinginkan, maka jumlah *rain gauge* harus bertambah banyak, durasi akumulasi yang lama memerlukan jumlah *optimal rain gauge* yang lebih banyak. Diperlukan 10 lokasi stasiun hujan untuk Kota Makassar dengan derajat kesalahan 5% dan 5 lokasi *rain gauge* untuk tingkat kesalahan 10%. Berdasarkan kombinasi antar *rain gauge*, disarankan penambahan *rain gauge* antara Balai IV atau Biring Romang dengan Sudiang, demikian juga tambahan juga diperlukan antara Paotere dan Barombong.

**Kata kunci:** optimum *rain gauge*, curah hujan, Makassar.

### PENDAHULUAN

Jaringan pengamatan stasiun cuaca sangat mempengaruhi akurasi pengamatan. Di dalam penentuan jaringan pengamatan

ini terkait dengan bentuk dan jumlah tempat observasi. Sedangkan permasalahan penentuan jumlah stasiun yang diperlukan merupakan gabungan

antara masalah akurasi yang diinginkan dan biaya (Amorim, dkk., 2012). Analisis lokasi observasi ini berkaitan dengan formulasi dan metode solusinya yang beragam misalnya seputar jumlahnya lokasi pengamatan, bentuknya, hubungan antar lokasi dan peralatan ditempatkan (Daskin, 1995; Church, 2002; Church dan Murray, 2009). Semua masalah lokasi secara normatif memiliki beberapa kesamaan, dan keberagaman secara taksonomi (Brandeau dan Chiu, 1989; Laurini dan Thompson, 1992; Hamacher dan Nickel, 1998). Secara ekonomi adalah menentukan jumlah permintaan dan penawaran yang saling berhubungan terhadap ruang tertentu. Keputusan lokasinya juga menyangkut masalah optimalnya fungsi biaya dan layanan, yang disebut fungsi tujuan. Sementara, fungsi objektif yang paling umum digunakan untuk menunjuk berbagai masalah seperti cakupan, median, nilai pusat dan masalah lain dengan cara mengklasifikasikannya agar sesuai.

Banyak riset yang menfokuskan pada metode untuk mendapatkan jaringan terbaik pada kualitas data air tanah. Prakash dan Singh (2000) menyatakan seleksi lokasi yang optimal untuk memperluas jaringan pengamatan pada monitoring air tanah di India ditekankan dengan meminimalkan variansi kriging dan menentukan dimana nilai error terbesarnya. Cameron dan Hunter (2002) menyajikan sebuah algoritma optimasi monitoring jaringan kualitas air tanah berdasarkan estimator kriging dan variansinya. Tujuan mereka mencari skenario redundansi spasial dan temporal yang digunakan sebagai pembenaran lokasi sampel dan konsekuensinya terhadap reduksi jaringan. Sementara Li dan Hilton (2005) mereduksi densitas sampel spasial jaringan pada kualitas air tanah. Yeh dkk. (2006) menunjukkan kombinasi analisis geostatistik multivariat dengan genetic algorithms hasilnya efektif untuk monitoring kualitas air tanah.

Berbeda dengan optimasi jumlah stasiun cuaca yang jumlahnya tidak terlalu banyak. Penelitian mengenai jumlah stasiun baru dilakukan di pertengahan abad 20. Rycroft (1949) menggunakan data curah hujan tahunan dan variansi jarak untuk menentukan jumlah optimum *rain gauges* di Jonkershook catchment. Rycroft mengembangkan persamaan untuk jumlah *rain gauge* yang optimum. Sementara Ganguli dkk. (1951) menggunakan koefisien variasi jarak pada curah hujan bulanan untuk menentukan jumlah *rain gauge*. Ahuja (1960) juga mengembangkan optimum jumlah *rain gauge* berdasarkan variasi jarak untuk estimasi curah hujan rata-rata sesuai akurasi yang diinginkan yang biasanya dalam bentuk prosentase error.

Periago dkk. (1997) mengembangkan metodologi optimasi untuk jaringan stasiun hujan di Catalonia berdasarkan model *multiple linear regression* (MLR) menggunakan beberapa lokasi yang independen. Residu regresi dianalisis terhadap elevasi lokasi kemudian diinterpolasi menggunakan kriging dan lokasi yang memiliki eror paling besar diestimasi menggunakan MLR. Hasil penelitian ini mengemukakan bahwa beberapa bagian stasiun di negeri Catalonia tidak bagus dalam mengcover pengukuran hujan dan ada usulan stasiun baru. Mereka juga menemukan beberapa kriteria dengan distribusi spasial yang homogen menjadi tidak efektif pada topografi yang kompleks. Pada topik yang sama Pardo-Igúzquiza (1998) meneliti di daerah DAS menggunakan *SA optimization*, dengan menggunakan dua pendekatan yang berbeda: Pertama, menyeleksi sebuah *subgroup station* yang di dalam sebuah grup kemudian ditekankan pengaruhnya terhadap jaringan stasiun. Hasilnya menunjukkan bahwa konfigurasi optimal jaringan untuk observasi bulanan tidak identik dengan harian.

Curah hujan yang dianggap paling representatif di permukaan bumi adalah pengukuran curah hujan yang berasal dari

*rain gauge* (Ciach, 2003; Ciach dkk., 2007). Hasil curah hujan ini sudah bukan potensi hujan lagi, tetapi merupakan air hujan yang benar-benar sampai ke permukaan bumi. Letak dan sebaran *rain gauge* diharapkan dapat mewakili daerah di sekitarnya. Kondisi permukaan bumi tidak homogen menyebabkan World

Meteorological Organisation (WMO) menentukan densitas *rain gauge* yang berbeda-beda agar suatu tempat bisa dikatakan representatif atau dianggap bisa mewakili daerah tertentu. Syarat representatif ini mengacu pada ketentuan Tabel 1 (WMO, 1994).

**Tabel 1.** Kerapatan stasiun *rain gauge* yang direkomendasikan WMO

<i>Surface</i>	<i>Density Minimum (km<sup>2</sup>/station)</i>	
	<i>Non-Recording</i>	<i>Recording</i>
<i>Coastal</i>	900	9.000
<i>Mountains</i>	250	2.500
<i>Interior plains</i>	575	5.750
<i>Hilly</i>	575	5.750
<i>Small Island</i>	25	250
<i>Urban Area</i>	--	10–20
<i>Polar/ Arid</i>	10.000	100.000

*Sumber: WMO (1994)*

Data presipitasi yang diperoleh dari penakar hujan karena dianggap paling akurat (Hu dkk., 2013), tetapi data jenis ini terbatas jumlahnya dan distribusinya tidak merata (Xie dan Arkin, 1997). Di Indonesia sendiri jumlah stasiun penakar curah hujan sangatlah kurang jumlahnya. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, selaku badan yang mengamati data cuaca hanya memiliki jumlah stasiun 186 (Perban BMKG No. 8 Tahun 2019). Jumlah yang jauh dari standar WMO, apalagi jika mempertimbangkan kompleksitas cuaca dan topografinya. Namun demikian selain penakar curah hujan yang dikelola oleh BMKG, terdapat penakar hujan kerja sama dengan instansi lain, yaitu Kementerian Pertanian (Kementan) dan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR).

Daerah sekitar Makassar merupakan daerah yang rawan bencana hidrometeorologi seperti banjir. Tercatat banjir tahun 2019 baru-baru ini merupakan banjir yang paling besar menimpa wilayah ini khususnya dan Provinsi Sulawesi Selatan umumnya. Berdasarkan catatan curah hujan di wilayah ini, tidak semua stasiun hujan mencatat curah hujan ekstrim

pada saat kejadian dan menjadi pertanyaan apakah jumlah stasiun penakar curah hujan di Makassar dan sekitar sudah mencukupi atau belum. Penelitian ini akan mengevaluasi kecukupan alat penakar curah hujan di Makassar dan mengembangkan skenario jumlah yang sesuai dengan uncentaintynya.

## METODE PENELITIAN

Data yang digunakan untuk penelitian ini adalah data curah hujan di Kota Makassar. Penamaan Makassar berasal dari kata mangkasara yang juga merupakan nama salah satu suku yang mendiami wilayah ini. Dari tahun 1971 hingga 1999, kota ini secara resmi menggunakan nama Ujung Pandang yang juga merupakan ibu kota provinsi Sulawesi Selatan. Makassar merupakan kota metropolitan terbesar di kawasan Indonesia Timur dan pada masa lalu pernah menjadi ibu kota Negara Indonesia Timur dan Provinsi Sulawesi. Kota Makassar terletak di pesisir barat daya Pulau Sulawesi yang berbatasan dengan Selat Makassar di sebelah barat, Kabupaten Kepulauan Pangkajene di sebelah utara, Kabupaten Maros di sebelah

timur dan Kabupaten Gowa di sebelah selatan.

Kota Makassar terdiri dari 15 kecamatan dan 153 kelurahan. Pada tahun 2017, kota yang memiliki luas wilayah 199,26 km<sup>2</sup> dan jumlah penduduk sebesar 1.663.479 jiwa dengan kepadatan penduduk 8.348 jiwa/km<sup>2</sup>. Kota Makassar memiliki topografi relatif datar dengan cuaca puncak musim hujan di bulan Desember sampai Pebruari. Datangnya awal musim di tempat ini sebagaimana tempat lain di Indonesia sangat dinamis

(Giarno, dkk., 2012) dan terkadang deteksi pengindraan jauh pun bervariasi (Giarno, dkk., 2018). Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data penakar curah hujan di Makassar yaitu Stasiun Meteorologi Maritim Paotere Makassar, Kantor Balai Besar MKG Wilayah IV, BPP Barombong, Pos Hujan Biring Romang, dan BPP Sudiang. Posisi stasiun ini dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 1.

**Tabel 2.** Lokasi *rain gauge* Makassar

No	Nama	Lintang	Bujur
1.	BPP Barombong	05°12'30.7"	119°23'36.7"
2.	BPP Sudiang	05°05'06.0"	119°31'18.2"
3.	Biring Romang	05°10'32.7"	119°28'45.5"
4.	Balai Wil. IV	05°08'56.0"	119°27'08.0"
5.	STAMAR Paotere	05°06'49.5"	119°25'11.4"



**Gambar 1.** Peta Lokasi okasi *rain gauge* Makassar

Konsep *uncertainty* mengacu pada situasi epistemik yang melibatkan informasi yang tidak sempurna atau tidak diketahui. Ini berlaku untuk hasil observasi maupun prediksi peristiwa masa depan yang tidak diketahui. Ketidakpastian atau *uncertainty* ada dalam banyak bidang misalnya asuransi, filsafat, fisika, statistik, ekonomi, keuangan, psikologi, sosiologi, teknik, metrologi, meteorologi, ekologi dan ilmu informasi. Pengukuran unsur cuaca juga mengandung kesalahan, dimana nilai toleransi ini berbeda-beda untuk tiap parameter cuaca (WMO, 2006).

Perbedaan karakteristik curah hujan akan disajikan menggunakan proporsi kejadian, *mean*, *quantile*, standar deviasi dan *coefficient of variation*. Jumlah stasiun pengamatan hujan biasanya tidak hanya mempertimbangkan factor meteorologis saja, tetapi juga sisi ekonomi dan sumber daya yang tersedia. Penelitian ini hanya focus pada penentuan jumlah optimal stasiun hanya dari aspek statistik variansi antar stasiun saja. Misalkan di suatu wilayah sudah terdapat penakar curah hujan sejumlah  $n$  dan akan dihitung berapa jumlah penakar curah hujan optimal di tempat tersebut, maka digunakan formulasi:

$$N = \left(\frac{Cv}{\varepsilon}\right)^2 \quad (1)$$

dimana  $Cv$  adalah *coefficient of variation*,  $N$  adalah jumlah stasiun yang optimal dan  $\varepsilon$  adalah tingkat kesalahan yang diinginkan. Nilai  $\varepsilon$  ditentukan sendiri, apakah kesalahan yang diinginkan 5%, 10%, dan seterusnya. Formulasi ini banyak diujicobakan pada saat menentukan hujan rancangan banjir periodic (Al-Abadi dan Al-Aboodi, 2014; Adhikary dkk., 2015; Ngene, dkk., 2015).

Sebelum mendapatkan nilai  $Cv$  maka perlu diketahui deskripsi data meliputi ukuran pemusatan dan penyebaran data. Ukuran pemusatan data pada penelitian ini menggunakan nilai rata-rata (*mean*), sedangkan penyebaran data meliputi ragam (*variance*). *Mean* adalah nilai rata-

rata dari beberapa buah data, dimana ditentukan dengan membagi jumlah data dengan banyaknya data. Berdasarkan definisi dari mean, misalkan data pengamatan  $x_i$  dengan panjang data  $N$  maka *mean* atau disimbolkan  $\mu$ , diformulasikan sebagai berikut:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (2)$$

Dalam teori probabilitas dan statistika, varians (*variance*) adalah ukuran seberapa jauh sebuah kumpulan bilangan tersebar. Variansi nol mengindikasikan bahwa semua nilai sama dan nilai varians selalu bernilai non-negatif. Sedangkan varians yang bernilai rendah mengindikasikan bahwa titik data condong sangat dekat dengan nilai rata-rata (nilai ekspektasinya) dan varians yang tinggi mengindikasikan bahwa titik data sangat tersebar. Akar kuadrat dari varians disebut juga simpangan baku. Ukuran penyebaran (*Measures of Dispersion*) atau ukuran keragaman pengamatan dari nilai rata-ratanya disebut simpangan (*deviation/dispersi*). Terdapat beberapa ukuran untuk menentukan dispersi data pengamatan, seperti jangkauan/rentang (*range*), simpangan kuartil (*quartile deviation*), simpangan rata-rata (*mean deviation*), dan simpangan baku (*standard deviation*). Formulasi simpangan baku atau standar deviasi ( $\sigma$ ) adalah:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (3)$$

Sebaran jarak pusat dengan porsi nilai data dihitung menggunakan *quantile*. Sementara koefisien keragaman (*coefficient of variation* atau  $Cv$ ) adalah ukuran yang paling penting dan sering digunakan adalah ukuran penyebaran relatif terhadap standar deviasi. Koefisien variasi ( $CV$ ) adalah ukuran statistik dari dispersi poin data dalam seri data di sekitar rata-rata. Koefisien variasi mewakili rasio standar deviasi terhadap rata-rata, dan ini merupakan statistik yang berguna untuk

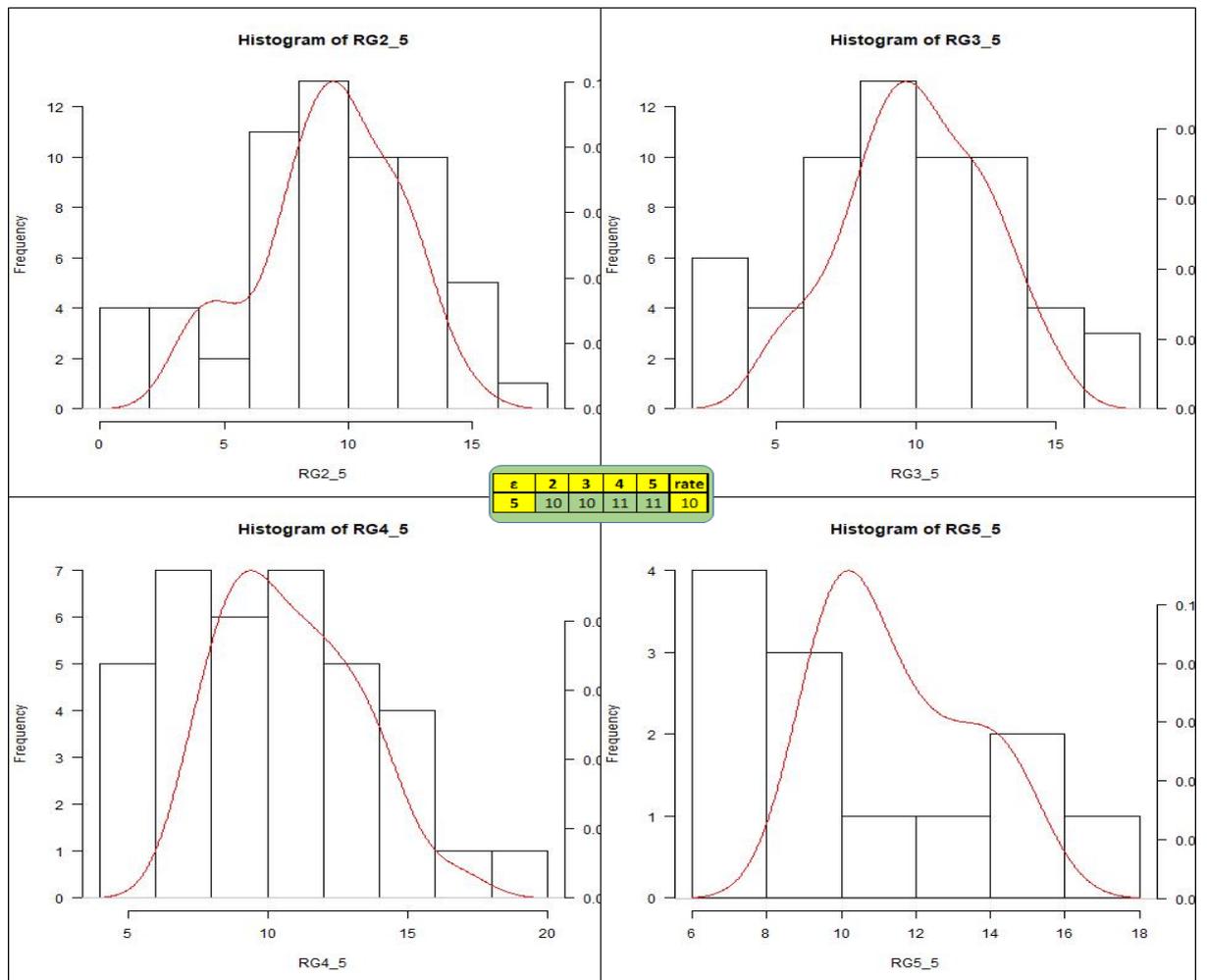
membandingkan tingkat variasi dari satu seri data ke seri lainnya, walaupun rata-rata secara drastis berbeda satu sama lain. Nilai  $Cv$  dirumuskan dengan:

$$Cv = \frac{\sigma}{\mu} \quad (4)$$

Nilai  $Cv$  ini dimasukkan ke dalam Persamaan (1) yang digunakan untuk menentukan jumlah *rain gauge* yang optimal atau  $N$  pada derajat kesalahan tertentu  $\epsilon$ . Pada penelitian ini derajat kesalahan yang akan diujicobakan adalah 0.5%, 1%, 5%, 10%, 15%, 20% dan 25% dan hasilnya akan ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

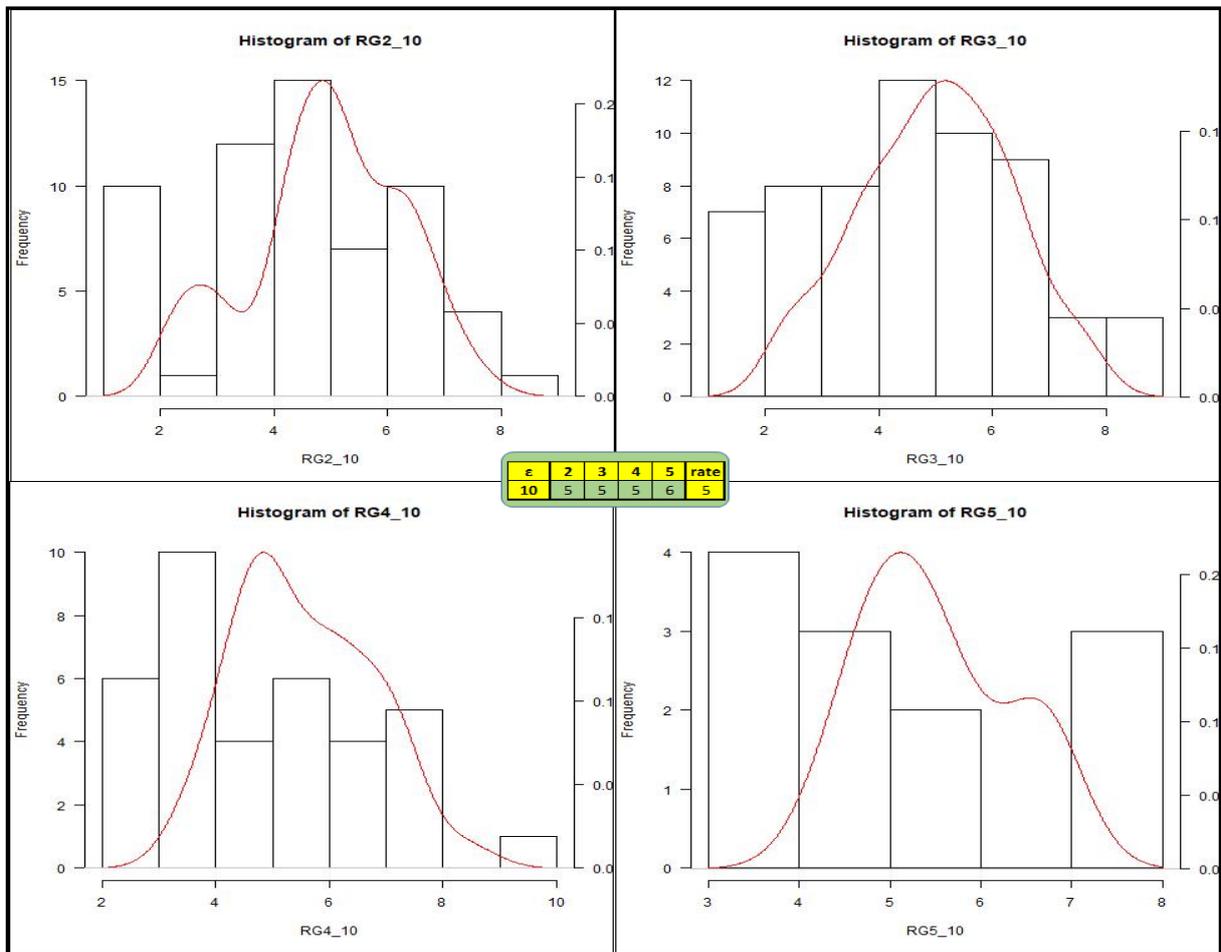
Pencarian jumlah *rain gauge* (RG) optimal dilakukan dengan mengkombinasikan kemungkinan-kemungkinan perhitungan antar stasiun hujan. Adanya kesamaan dan kedekatan jarak juga dijadikan pertimbangan, agar perhitungan tidak terlalu banyak. Kecuali kombinasi 5 stasiun hujan, kombinasi-kombinasi kemungkinan sejumlah stasiun hujan dilakukan lebih dari sekali. Hasilnya ditabulasi dan diklasifikasikan menurut jumlah *rain gauge* yang digunakan untuk kombinasi dan derajat kesalahan yang dipertimbangkan yaitu 5%, 10%, 15%, 20% dan 25%. Grafik densitas histogram digunakan untuk mempermudah analisis sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2



**Gambar 2.** Grafik densitas histogram jumlah *rain gauge* optimal dengan tingkat kesalahan 5% menggunakan data curah hujan bulanan. Gambar searah jarum jam dari kanan atas, kombinasi 2, 3, 4 dan *rain gauge*.

Perhitungan menggunakan kombinasi 2 *rain gauge* sampai 5 buah *rain gauge* hasilnya menunjukkan jumlah optimal *rain gauge* untuk tingkat kesalahan 5% bervariasi, dari 20 buah lokasi sampai hanya 2 lokasi sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2. Perubahan intensitas antar lokasi stasiun hujan sangat mempengaruhi penentuan optimal *rain gauge*. Karakteristik lokasi penakar hujan yang mempengaruhi catatan pengukuran

hujan dapat menyebabkan nilai variansi. Formulasi variansi sangat sensitive terhadap perbedaan nilai yang besar diantara dua buah stasiun sebab perhitungannya menggunakan jumlah kuadrat perbedaan. Akibatnya nilai  $C_v$  ikut tinggi dan mengakibatkan jumlah *rain gauge* optimal meningkat. Rata-rata jumlah optimal *rain gauge* untuk tingkat kesalahan 5% adalah 10 lokasi stasiun hujan.



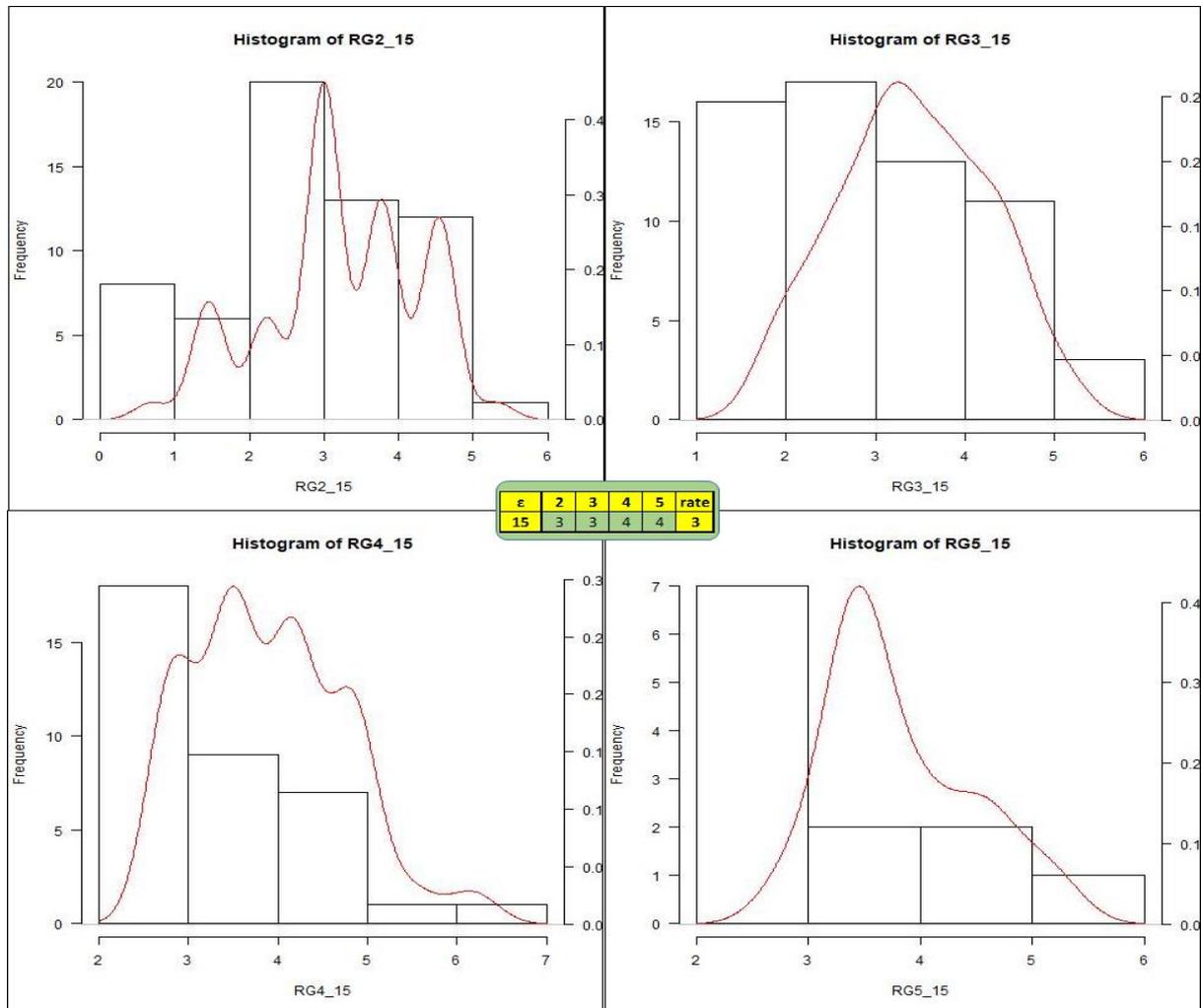
**Gambar 3.** Grafik densitas histogram jumlah *rain gauge* optimal dengan tingkat kesalahan 10% menggunakan data curah hujan bulanan. Gambar searah jarum jam dari kanan atas, kombinasi 2, 3, 4 dan *rain gauge*.

Sama halnya dengan tingkat kesalahan 5%, berdasarkan perhitungan kombinasi 2 *rain gauge* sampai 5 buah *rain gauge* untuk tingkat kesalahan 10% juga nilainya bervariasi, dari 10 buah lokasi sampai hanya satu lokasi sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.

Besarnya pembagi yaitu 10 untuk tingkat kesalahan ini menyebabkan nilai  $C_v$  juga ikut mengecil. Meskipun mungkin ada perubahan intensitas antar lokasi stasiun hujan, namun pembagi 10 cukup memberikan dampak signifikan terhadap hasil jumlah optimal *rain gauge*. Akibat

nilai  $C_v$  yang menurun maka jumlah *rain gauge* optimal juga menurun dibandingkan tingkat kesalahan 5%. Rata-rata jumlah optimal *rain gauge* untuk tingkat

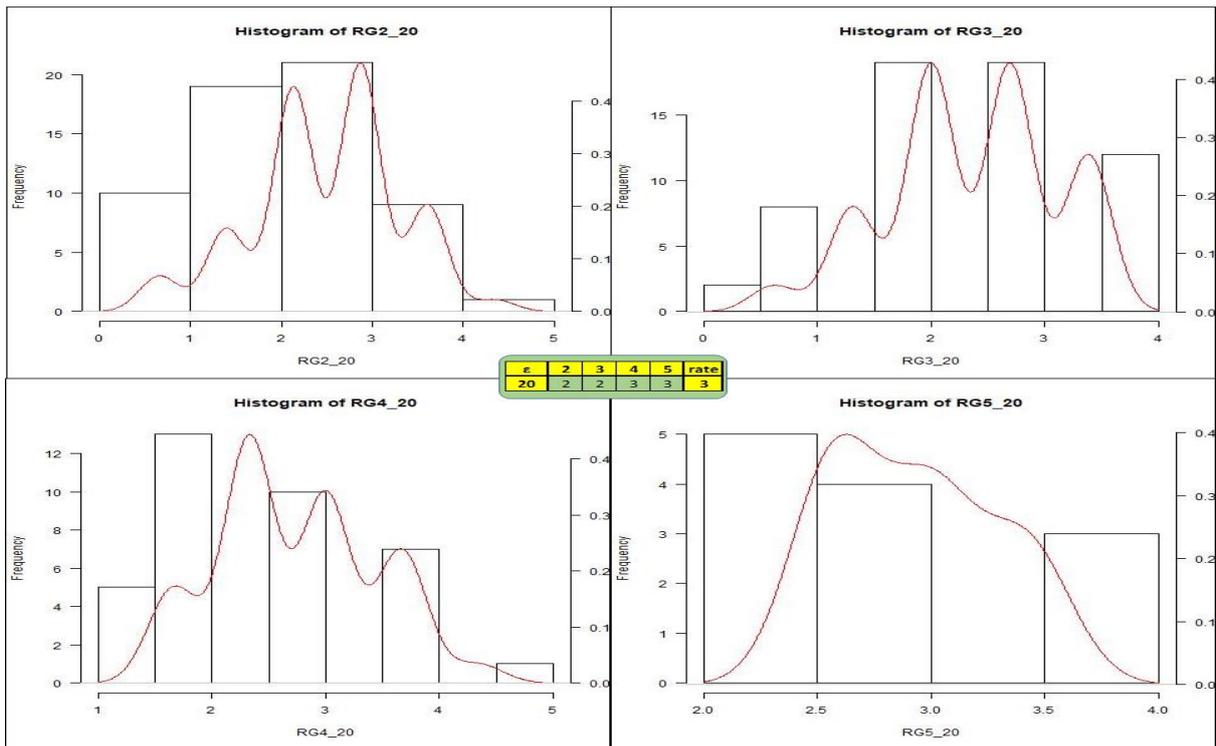
kesalahan 10% adalah 5 lokasi stasiun hujan. Artinya jumlah optimum stasiun hujan yang ada saat ini sudah cukup.



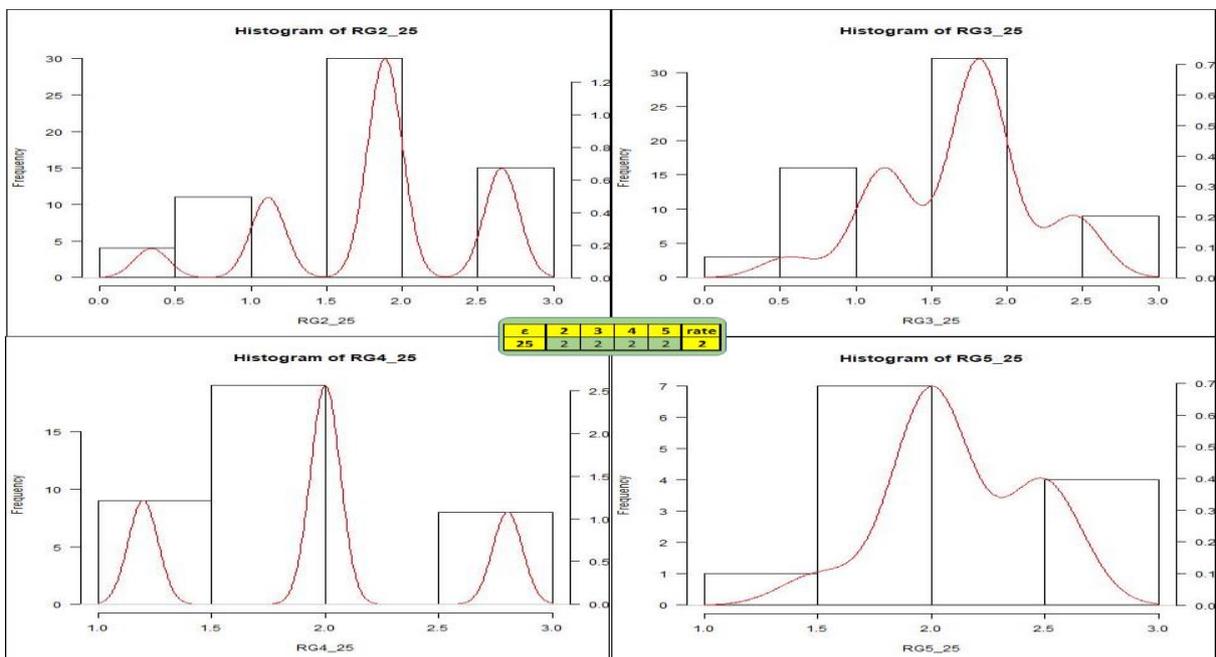
**Gambar 4.** Grafik densitas histogram jumlah *rain gauge* optimal dengan tingkat kesalahan 15% menggunakan data curah hujan bulanan. Gambar searah jarum jam dari kanan atas, kombinasi 2, 3, 4 dan *rain gauge*.

Meningkatnya tingkat kesalahan mengakibatkan jumlah optimal yang dibutuhkan menjadi lebih sedikit. Hampir sama halnya dengan perbandingan tingkat kesalahan 10% terhadap 5%, berdasarkan perhitungan kombinasi 2 *rain gauge* sampai 5 buah *rain gauge* untuk tingkat kesalahan 15% juga nilainya bervariasi, dari 7 buah lokasi sampai hanya satu

lokasi sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4. Nilai pembagi 15 untuk tingkat kesalahan ini menyebabkan nilai  $C_v$  juga ikut mengecil. Rata-rata jumlah optimal *rain gauge* untuk tingkat kesalahan 15% adalah 3 lokasi stasiun hujan. Artinya jumlah optimum stasiun hujan yang ada saat ini sudah lebih dari cukup.



**Gambar 5.** Grafik densitas histogram jumlah *rain gauge* optimal dengan tingkat kesalahan 20% menggunakan data curah hujan bulanan. Gambar searah jarum jam dari kanan atas, kombinasi 2, 3, 4 dan *rain gauge*.



**Gambar 6.** Grafik densitas histogram jumlah *rain gauge* optimal dengan tingkat kesalahan 25% menggunakan data curah hujan bulanan. Gambar searah jarum jam dari kanan atas, kombinasi 2, 3, 4 dan *rain gauge*.

Tingkat kesalahan 20% dan 25% artinya nilai pembagiya adalah 20 dan 25, hal ini sangat berpengaruh terhadap jumlah *rain gauge* optimal. Hasil perhitungan

menunjukkan pada tingkat kesalahan 20% dan 25% meskipun nilainya bervariasi, tetapi menghasilkan jumlah optimal *rain gauge* mengecil. Rata-rata jumlah optimal

*rain gauge* untuk tingkat kesalahan 20% adalah 3, sedangkan pada tingkat kesalahan 25% adalah 2 sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5. Jumlah 2 dan 3 ini artinya jumlah optimum stasiun hujan yang sudah terpasang saat ini sudah lebih dari cukup.

Variabilitas jumlah optimal *rain gauge* juga berubah-ubah terhadap curah hujan bulanan sebagaimana dapat dilihat

pada Tabel 3 – 7. Rata-rata jumlah optimal *rain gauge* dihitung untuk tiap jumlah kombinasi *rain gauge* yang digunakan dan dikelompokkan menurut tingkat kesalahan dan bulan. Jika menghendaki tingkat kesalahan yang rendah maka dibutuhkan jumlah *rain gauge* yang banyak, sedangkan tingkat kesalahan yang besar maka jumlah *rain gauge* hanya sedikit.

**Tabel 3.** Optimal *rain gauge* untuk  $\varepsilon$  5%

Bulan	5%				Rata-rata
	2RG	3RG	4RG	5RG	
1	8	7	7	8	7
2	8	6	7	8	7
3	9	7	8	8	8
4	9	9	9	9	9
5	10	12	12	13	12
6	12	11	11	12	12
7	14	14	14	15	14
8	10	12	15	16	13
9	11	16	17	17	15
10	9	11	11	10	10
11	10	10	9	10	10
12	7	6	6	7	7

Pada tingkat kesalahan 5% minimal 6 atau 7 buah lokasi stasiun hujan. Namun nilai 6 atau 7 hanya muncul sesekali saja, sebab nilai yang sering muncul berkisar 10. Dibandingkan dengan tingkat kesalahan yang lebih besar, terlihat untuk mencapai tingkat kesalahan 5% membutuhkan penambahan *rain gauge* 5 sampai 6 buah dari *rain gauge* yang sudah ada. Dan jumlah ini menurun seiring dengan tingkat kesalahan yang makin besar.

Jumlah optimal *rain gauge* pada bulan – bulan kering di Kota Makassar, yaitu bulan Juni sampai September justru

**Tabel 4.** Optimal *rain gauge* untuk  $\varepsilon$  10%

Bulan	10%				Rata-rata
	2RG	3RG	4RG	5RG	
1	4	3	4	4	4
2	4	3	3	4	4
3	5	4	4	4	4
4	4	4	4	5	4
5	5	6	6	6	6
6	6	5	6	6	6
7	7	7	7	8	7
8	5	6	8	8	7
9	6	8	9	8	8
10	5	6	5	5	5
11	5	5	5	5	5
12	3	3	3	3	3

meningkat sebagaimana pada Tabel 3 – 7. Hal ini dapat diartikan pada saat itu ada perbedaan yang mencolok dari pencatatan di lokasi-lokasi *rain gauge* yang ada. Yang menarik, di bulan – bulan kering maupun basah, jumlah optimal *rain gauge* hamper sama jumlahnya meskipun menggunakan kombinasi 2 buah *rain gauge* atau paling banyak 5 *rain gauge* seperti tampak pada Tabel 3 dan Tabel 4. Sementara untuk tingkat kesalahan di atas 15 % maka perubahan jumlah optimal *rain gauge* antara bulan kering dan basah, tidak terlalu menyolok.

**Tabel 5.** Optimal *rain gauge* untuk  $\varepsilon$  15%

Bulan	15%				Rata-rata
	2RG	3RG	4RG	5RG	
1	3	2	2	3	2
2	3	2	2	3	2
3	3	2	3	3	3

**Tabel 6.** Optimal *rain gauge* untuk  $\varepsilon$  20%

Bulan	20%				Rata-rata
	2RG	3RG	4RG	5RG	
1	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	2

4	3	3	3	3	3	4	2	2	2	2	2
5	3	4	4	4	4	5	2	3	3	3	3
6	4	4	4	4	4	6	3	3	3	3	3
7	5	5	5	5	5	7	3	3	3	4	4
8	3	4	5	5	4	8	3	3	4	4	3
9	4	5	6	6	5	9	3	4	4	4	4
10	3	4	4	3	3	10	2	3	3	3	3
11	3	3	3	3	3	11	3	2	2	3	2
12	2	2	2	2	2	12	2	2	2	2	2

**Tabel 7.** Optimal *rain gauge* untuk  $\varepsilon$  25%

Bulan	25%				Rata-rata
	2RG	3RG	4RG	5RG	
1	2	1	1	2	1
2	2	1	1	2	1
3	2	1	2	2	2
4	2	2	2	2	2
5	2	2	2	3	2
6	2	2	2	2	2
7	3	2	2	3	3
8	2	2	2	3	2
9	2	3	3	3	3
10	2	2	2	2	2
11	2	2	2	2	2
12	1	1	1	1	1

Rata-rata jumlah *rain gauge* yang diperlukan untuk mencapai kesalahan 5% pada bulan Januari sampai Desember adalah 7, 7, 8, 9, 12, 12, 14, 13, 15, 10, 10 dan 7. Meski memiliki pola yang sama, namun tangga kesalahan yang membesar menyebabkan jumlah optimal *rain gauge* mengecil.

Fluktuasi disparitas akumulasi curah hujan tahunan tentu saja lebih besar dibandingkan dengan curah hujan bulanan.

Hal ini mempengaruhi jumlah optimal *rain gauge* yang diperoleh dari perhitungan data tahunan sebagaimana pada Tabel 8. Jumlah *rain gauge* untuk mendapatkan tingkat kesalahan 5% rata-rata 55 stasiun hujan, dan jumlahkan semakin kecil untuk tingkat kesalahan yang lebih besar. Jumlah *rain gauge* yang ada saat ini yaitu 5 buah lokasi, hanya bisa mendekati kesalahan 15%.

**Tabel 8.** Optimal *rain gauge* pada data curah hujan tahunan

RG	5	10	15	20	25
5RG	50	13	6	3	2
4RG	48	12	5	3	2
3RG	65	16	7	4	3
2RG	55	14	6	3	2
Rata2	55	14	6	3	2



Disparitas curah hujan antar stasiun, jumlah *rain gauge* dan tingkat kesalahan yang diinginkan sangat berpengaruh terhadap jumlah *rain gauge* yang optimal. Perbedaan nilai antar curah hujan antar stasiun menyebabkan kuadrat kesalahan makin besar, yang berakibat nilai  $n$  untuk jumlah optimal *rain gauge* juga makin besar. Sementara jumlah *rain gauge* yang diikuti dalam perhitungan memberikan pengaruh terhadap nilai variansi, yang akibatnya meningkatkan nilai  $C_v$  dan tingkat kesalahan sebagai faktor pembagi  $C_v$  tentu sangat menentukan hasil jumlah optimal *rain gauge*.

Hanya saja, meskipun diketahui jumlah optimal *rain gauge* yang kurang, namun perlu diperkirakan juga dimana akan ditempatkan *rain gauge* agar akurasi meningkat. Masih menggunakan persamaan nilai optimal *rain gauge*, perhitungan kombinasi antar *rain gauge* dapat digunakan untuk mengetahui dimanakan letak *rain gauge* perlu ditambahkan. Namun sebelumnya agar kombinasi efisien maka jarak antar stasiun dihitung terlebih dahulu yang hasilnya sebagaimana Tabel 9.

**Tabel 9.** Jarak antar stasiun hujan di Kota Makassar

Lokasi <i>Rain gauge</i>	BPP Barombong	BPP Sudiang	Biring Romang	Balai Wil. IV	Stamar Paotere
BPP Barombong	0 km	19,78 km	10,18 km	9,30 km	10,95 km
BPP Sudiang	19,78 km	0 km	11,14 km	10,49 km	11,74 km
Biring Romang	10,18 km	11,14 km	0 km	4,24 km	9,55 km
Balai Wil. IV	9,30 km	10,49 km	4,24 km	0 km	5,31 km
Stamar Paotere	10,95 km	11,74 km	9,55 km	5,31 km	0 km

Jarak BPP Barombong dengan BPP Sudiang merupakan jarak paling jauh diantara stasiun dua buah stasiun yaitu 19,78 km. Sementara Bawal IV yang terletak di Panaikang dengan Stamar Paotere jaraknya paling dekat yaitu 4,24 km. Jarak semakin dekat artinya catatan curah hujan stasiun harus mendekati stasiun tersebut. Berdasarkan data jarak di Tabel 9 ini, jika berdasarkan standar WMO yang menentukan satu stasiun dapat

mewakili 900 km<sup>2</sup>, atau jika dihitung lingkaran diperoleh jari-jari 17 km. Maka jarak antar stasiun setidaknya 34 km. Namun berdasarkan perhitungan di bagian hasil menunjukkan jumlah stasiun yang ada hanya untuk tingkat kesalahan 10% untuk data bulanan. Sedangkan untuk data curah hujan tahunan, maka tingkat kesalahan yang bisa diharapkan lebih dari 15%.

**Tabel 10.** Optimal *rain gauge* skenario 1

Tahun	Cv	Barombong - Sudiang				
		5	10	15	20	25
2010	4	1	0	0	0	0
2011	11	5	1	1	0	0
2012	9	3	1	0	0	0
2013	47	90	23	10	6	4
2014	19	15	4	2	1	1
2015	4	1	0	0	0	0
2016	23	21	5	2	1	1
2017	44	78	19	9	5	3
2018	69	189	47	21	12	8
2019	71	204	51	23	13	8

**Tabel 11.** Optimal *rain gauge* skenario 2

Tahun	Cv	Biring Romang - Barombong				
		5	10	15	20	25
2010	68	184	46	20	12	7
2011	42	71	18	8	4	3
2012	38	57	14	6	4	2
2013	42	69	17	8	4	3
2014	54	117	29	13	7	5
2015	56	125	31	14	8	5
2016	50	99	25	11	6	4
2017	52	107	27	12	7	4
2018	47	87	22	10	5	3
2019	50	101	25	11	6	4

**Rata-rata** 61 15 7 4 2

Pertimbangan lain selain jarak adalah sifat curah hujan yang tercatat di stasiun. Dua buah stasiun yang sangat berbeda curah hujannya, maka kemungkinan diperlukan jumlah penakar curah hujan yang lebih banyak. Sebaliknya jika curah hujannya hampir mirip maka mungkin

**Tabel 12.** Optimal *rain gauge* skenario 3

Panaikang - Biring Romang						
Tahun	Cv	5	10	15	20	25
2010	19	14	4	2	1	1
2011	7	2	0	0	0	0
2012	1	0	0	0	0	0
2013	2	0	0	0	0	0
2014	1	0	0	0	0	0
2015	3	0	0	0	0	0
2016	4	1	0	0	0	0
2017	2	0	0	0	0	0
2018	2	0	0	0	0	0
2019	6	1	0	0	0	0
<b>Rata-rata</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**Tabel 14.** Optimal *rain gauge* skenario 5

Paotere Barombong						
Tahun	Cv	5	10	15	20	25
2010	63	161	40	18	10	6
2011	41	67	17	7	4	3
2012	32	41	10	5	3	2
2013	33	43	11	5	3	2
2014	55	119	30	13	7	5
2015	47	89	22	10	6	4
2016	41	68	17	8	4	3
2017	47	87	22	10	5	3
2018	47	87	22	10	5	3
2019	55	120	30	13	7	5
<b>Rata-rata</b>	<b>88</b>	<b>22</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>

Berdasarkan jumlah optimal *rain gauge* yang diperoleh dari hasil perhitungan, maka setidaknya ada kelompok stasiun yang jumlah optimal *rain gaugena* hanya 2 untuk akurasi 5%, tetapi ada juga yang jumlah oprimal *rain gaugena* lebih dari 100 buah. Kombinasi Paotere – Panaikang, Paotere – Biring

**Rata-rata** 102 25 11 6 4

cukup diwakili salah satu *rain gauge* saja. Tabel 10 – 17 merupakan optimal *rain gauge* untuk sejumlah kombinasi antara dua buah *rain gauge* untuk mendeteksi kemungkinan-kemungkinan penempatan *rain gauge* yang tepat.

**Tabel 13.** Optimal *rain gauge* skenario 4

Panaikang - Sudiang						
Tahun	Cv	5	10	15	20	25
2010	49	95	24	11	6	4
2011	46	85	21	9	5	3
2012	47	87	22	10	5	3
2013	80	254	63	28	16	10
2014	70	197	49	22	12	8
2015	50	100	25	11	6	4
2016	25	24	6	3	2	1
2017	7	2	0	0	0	0
2018	25	24	6	3	2	1
2019	31	39	10	4	2	2
<b>Rata-rata</b>	<b>91</b>	<b>23</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>

**Tabel 15.** Optimal *rain gauge* skenario 6

Paotere - Biring Romang						
Tahun	Cv	5	10	15	20	25
2010	6	1	0	0	0	0
2011	1	0	0	0	0	0
2012	6	1	0	0	0	0
2013	10	4	1	0	0	0
2014	1	0	0	0	0	0
2015	10	4	1	0	0	0
2016	10	4	1	0	0	0
2017	6	1	0	0	0	0
2018	0	0	0	0	0	0
2019	5	1	0	0	0	0
<b>Rata-rata</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Romang dan Panaikan – Biring Romang menghasilkan jumlah optimal *rain gauge* 2 pada akurasi 5%. Sedangkan kombinasi ketiga stasiun ini yaitu Paotere, Biring Romang dan Panaikang dengan Sudiang dan Barombong menghasilkan jumlah optimal *rain gauge* yang sangat besar.

Tabel 16. Optimal *rain gauge* skenario 7

Tahun	Cv	Paotere - Panaikang				
		5	10	15	20	25
2010	13	7	2	1	0	0
2011	5	1	0	0	0	0
2012	7	2	0	0	0	0
2013	8	2	1	0	0	0
2014	0	0	0	0	0	0
2015	7	2	0	0	0	0
2016	6	1	0	0	0	0
2017	4	1	0	0	0	0
2018	2	0	0	0	0	0
2019	11	5	1	1	0	0
Rata-rata		2	1	0	0	0

Tabel 17. Optimal *rain gauge* skenario 8

Tahun	Cv	Paotere - Sudiang				
		5	10	15	20	25
2010	60	145	36	16	9	6
2011	51	104	26	12	6	4
2012	41	67	17	7	4	3
2013	74	221	55	25	14	9
2014	70	197	49	22	12	8
2015	44	77	19	9	5	3
2016	19	14	4	2	1	1
2017	3	0	0	0	0	0
2018	26	28	7	3	2	1
2019	21	17	4	2	1	1
Rata-rata		87	22	10	5	3

Berdasarkan jumlah optimal *rain gauge* dari kombinasi – kombinasi ini tampaknya stasiun hujan Paotere, Biring Romang dan Panaikang merupakan satu kelompok yang memiliki curah hujan hampir sama. Kombinasi ketiganya menghasilkan tingkat kesalahan yang kecil. Sementara Sudiang merupakan kelompok yang berbeda dengan Barombong, karena kombinasi keduanya menjadikan optimal *rain gauge* cukup besar. Berdasarkan penjelasan ini dapat disimpulkan ada tiga kelompok stasiun hujan, yaitu kelompok pertama adalah Paotere, Biring Romang dan Panaikang. Kemudian kelompok kedua yaitu Barombong dan kelompok ketiga adalah Sudiang. Analisis berdasarkan jaraknya, jarak diantara stasiun kelompok pertama relative dekat, dimana paling jauh adalah sekitar 5 km. Sementara, jarak antar kelompok pertama dan kedua, pertama dan ketiga atau kelompok kedua dan ketiga semuanya lebih dari 5 km.

Berdasarkan analisis di atas, maka penempatan stasiun hujan bisa dilakukan antara kelompok pertama dan kedua atau kelompok pertama dan ketiga. Sebab letak Paotere, Biring Romang dan Panaikang berada diantara Sudiang dan Barombong. Penempatan stasiun hujan baru agar menghasilkan kesalahan lebih kecil, seharusnya berjarak 5 km.

## SIMPULAN

Kebijakan jumlah stasiun hujan yang terpasang adalah kombinasi masalah ekonomi, sumber daya, ilmu meteorologi, statistik dan aplikasinya. Pada penelitian awal yang hanya berdasarkan meteorologi dan statistik memperlihatkan jumlah *rain gauge* optimal berbanding terbalik dengan tingkat kesalahan, jumlah *rain gauge* yang sedikit menyebabkan tingkat kesalahan yang tinggi. Namun demikian, kesimpulan jumlah optimal *rain gauge* yang dapat diperoleh pada penelitian ini antara lain:

- 1) Ditemukan sifat curah hujan yang disparitasnya sedikit diantara Paotere, Biring Romang dan Panaikang yang kemudian disebut **kelompok pertama**. Sifat hujan ini juga berbeda dengan catatan hujan di Sudiang yang masuk dalam **kelompok kedua** dan Barombong sebagai **kelompok ketiga**.
- 2) Berdasarkan data curah hujan bulanan, jumlah *rain gauge* yang optimal pada tingkat kesalahan 5% adalah 10 buah, sementara jika tingkat kesalahan dinaikan menjadi 10 % maka 5 buah sudah cukup. Artinya stasiun yang ada sekarang memiliki tingkat kesalahan 10%.
- 3) Menggunakan durasi curah hujan yang lebih lama, mengakibatkan jumlah

optimal *rain gauge* juga naik. Jumlah *rain gauge* yang optimal untuk data tahunan pada tingkat kesalahan 5% adalah 55 buah, sementara jika tingkat kesalahan dinaikan menjadi 10 % maka 14 buah dan 6 buah untuk tingkat kesalahan 15%. Artinya stasiun yang ada sekarang memiliki tingkat kesalahan lebih dari 15%.

- 4) Penempatan stasiun hujan baru agar tingkat akurasi naik, harus memperhatikan jarak dan kombinasi sifat hujan. Di Kota Makassar, *rain gauge* baru sebaiknya ditempatkan diantara kelompok pertama dan kedua atau kelompok pertama dan ketiga, pada jarak 5 km dari stasiun yang ada.

### REKOMENDASI

Berdasarkan riset ini maka direkomendasi kepada Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah IV untuk menambah jumlah penakar curah hujan atau *rain gauge* di Kota Makassar sebanyak 2 buah, yaitu antara Panaikang dan Sudiang dan satu lagi diantara Paotere dan Barombong.

### DAFTAR PUSTAKA

- Ahuja, P. R. (1960) *Planning of precipitation network for water resources development in India*. WMO flood control series No 15, 106–112.
- Adhikary, S. K., Yilmaz, A. G. dan Muttill, N. (2015) Optimal design of *rain gauge* network in the Middle Yarra River catchment, Australia, *Hydrol. Process*, 29, 2582–2599.
- Al-Abadi, A. M. dan Al-Aboodi, A. H. D. (2014) Optimum Rain-Gauges Network Design of Some Cities in Iraq, *Journal of Babylon University/Engineering Sciences*, 22(4), 946-958.
- Amini, M., Afyuni, M., Khademi, H., Abbaspour, K. C., Schulin, R. (2004) Mapping risk of cadmium and lead contamination to human health in soils of Central Iran, *Science of the Total Environment*, 347: 64– 77.
- Amorim, A. M. T., Goncalves, A. B., Nunes, L. M. dan Sousa, A. J. (2012) Optimizing the location of weather monitoring stations using estimation uncertainty, *International Journal of Climatology*, 32, 941-952.
- Brandeau, M. L. dan Chiu, S.S. (1989) An overview of representative problems in location research. *Management Science* 35, 645–74.
- Cameron, K, Hunter P. (2002) Using spatial models and kriging techniques to optimize long-term ground-water monitoring networks: a case study, *Environmetrics*, 13, 629–656.
- Church, R. L. (2002) Geographical information systems and location science, *Computers and Operations Research*, 29(6): 541– 562.
- Church, R. L. dan Murray, A. T. (2009) *Business Site Selection, Location Analysis and GIS*, Wiley: New York.
- Ciach, G. J. (2003) Local Random Errors in Tipping-Bucket *Rain gauge* Measurements, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, 752-759.
- Ciach, G. J., Krajewski, W. F. dan Villarini, G. (2007) Product-Error-Driven Uncertainty Model for Probabilistic Quantitative Precipitation Estimation with NEXRAD Data, *Journal of Hydrology*, 8, 1325–1347.
- Daskin, M. S. (1995) *Network and Discrete Location—Models, Algorithms and Applications*, Wiley: New York.

- Ganguli, M. K., Rangarajan, R. dan Panchang, G. M. (1951) Accuracy of mean rainfall estimates – Data of Damodar catchment, *Journal of Irrigation and Power*, 8.
- Giarno, Zadrach L. D. dan Mustofa, M. A (2012) Kajian awal musim hujan and awal musim kemarau di Indonesia, *Jurnal Meteorologi and Geofisika*, 1, 1–8
- Giarno Hadi, M. P., Suprayogi, S. dan Murti, S. H. (2018) Distribution of Accuracy of TRMM Daily Rainfall in Makassar Strait, *Forum Geografi*, 32, 38-52
- Hamacher, H. dan Nickel, S. (1998) Classification of location models, *Location Science*, 6, 229– 242.
- Hu, Q.F., Yang, D.W., Wang, Y.T. dan Yang, H.B. (2013) Accuracy and Spatio-Temporal Variation of High Resolution Satellite Rainfall Estimate over the Ganjiang River Basin, *China Technology and Science*, 56, 853–865.
- Laurini, R. dan Thompson, D. (1992) *Fundamentals of Spatial Information Systems*, Academic Press, London.
- Li, Y. dan Hilton, A. B. (2005) Reducing spatial sampling in long-term groundwater monitoring networks using ant colony optimization, *International Journal of Computational Intelligence Research*, 1(1), 19– 28.
- Ngene, B. U., Agunwamba, J. C., Nwachukwu, B. A. dan Okoro, B. C. (2015) The Challenges to Nigerian Raingauge Network Improvement, *Res. J. Environ. Earth Sci.*, 7(4), 68-74.
- Pardo-Igúzquiza E. (1998) Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing, *Journal of Hidrology*, 210, 206– 220.
- Periago, M. C., Lana, X., Fernández Mills, G. dan Serra, C. (1997) Optimization of the pluviometric network of Catalonia (North-East Spain) for climatological studies, *International Journal of Climatology*, 18, 183–198.
- Prakash, M. R. dan Singh, V. S. (2000) Network design for groundwater monitoring—a case study, *Environmental Geology*, 39, 628–632.
- Rycroft, H.B. (1949) Random Sampling of rainfall, *J. South African Forestry Assoc.* 18.
- Xie, P.P. dan Arkin, P.A. (1997) Analyses of Global Monthly Precipitation Using Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Predictions, *Journal of Climatology*, 9, 840–858.
- Yeh, M. S., Lin, Y. P. dan Chang, L. C. (2006) Designing an optimal multivariate geostatistical groundwater quality monitoring network using factorial kriging and genetic algorithms, *Environmental Geology*, 50, 101– 121.
- WMO (1994) *Guide to Hydrological Practices: Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting, and Other Applications*, WMO-No.168.
- WMO (2006) *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, WMO-No.8.