

TEKNIK PRAKIRAAN DAN SISTEM PERINGATAN DINI CURAH HUJAN DAN BANJIR

Hidayat Pawitan

Laboratorium Hidrometeorologi, Jurusan Geofisika dan Meteorologi

FMIPA IPB, Bogor 16144, hpawitan@indo.net.id

ABSTRACT

Recent environmental hazards due to weather and climate extremes have increased interests and needs of forecasting techniques and early warning system of rainfall and flood events, especially for developed areas to protect existing high economic investments. Such early warning system requires development of reliable prediction techniques. Kalman filter technique has been known for some times and has been introduced in hydrology and water resources fields in the last decades, and in the present paper the technique will be elaborated to model the dynamics of convective rain cells that represent two dimensional rainfall intensity fields. Model formulation and computational procedures will be demonstrated for the case of dense rain gauge network using historical data sets of Alamogordo, New Mexico. Design of necessary early warning system for floods and droughts will also be presented and discussed for possible operational development at local, regional and national levels, especially for food production centers, urban areas and other strategic locations.

Key words: rainfall intensity fields, prediction technique, Kalman filter, early warning system.

ABSTRAK

Bencana lingkungan akhir-akhir ini akibat iklim dan cuaca ekstreme telah meningkatkan interes dan kebutuhan akan teknik prakiraan dan sistem peringatan dini curah hujan dan banjir, khususnya untuk kawasan budidaya guna melindungi investasi bernilai ekonomi tinggi yang ada. Sistem peringatan dini demikian menuntut pengembangan teknik-teknik prediksi yang handal. Teknik Kalman Filter telah cukup lama dikenal dan dikembangkan dalam bidang hidrologi dan rekayasa sumber daya air, dan dalam makalah ini teknik tersebut digunakan untuk membuat model dinamika medan sel-hujan konvektif sebagai sistem medan intensitas hujan dalam ruang dua dimensi. Formulasi model dan prosedur komputasi ditunjukkan menggunakan data dari jejaring penakar hujan rapat daerah aliran sungai Alamogordo, New Mexico. Perancangan sistem peringatan dini untuk kasus banjir dan kekeringan akan diberikan dan dibahas sebagai usulan sistem operasional yang mungkin dikembangkan pada berbagai tingkatan: lokal, regional, dan nasional, yang sangat dibutuhkan khususnya pada daerah sentra produksi pangan, kawasan urban dan daerah strategis lainnya.

Kata kunci: medan intensitas hujan, teknik prediksi, Kalman Filter, sistem peringatan dini.

1 PENDAHULUAN

Kebutuhan akan suatu sistem peringatan dini curah hujan dan banjir telah lama disadari dalam kaitannya dengan kejadian-kejadian ekstrem seperti banjir dan kekeringan maupun bentuk bencana lainnya yang dapat berakibat merugikan, baik secara material maupun korban jiwa. Banjir dan kekeringan merupakan bencana alam lingkungan yang paling sering terjadi dengan dampak berbagai bentuk kerugian yang terus meningkat nilainya sejalan dengan tingkat perkembangan wilayah bersangkutan. Pengembangan suatu sistem peringatan dini untuk banjir dan kekeringan dimungkinkan hanya apabila kita mampu mengembangkan metode prediksi dan prakiraan dari sistem alam yang ada, berdasarkan pemahaman atas watak kejadian banjir dan kekeringan itu sendiri, yaitu dengan mengidentifikasi faktor-faktor kendali yang mencirikan sistem fisik yang berlaku. Oleh karena itu dalam tulisan ini pertama-tama akan diuraikan watak kejadian banjir dan kekeringan dalam konteks Indonesia, sebelum suatu metode adaptif yang dikenal dengan Kalman Filter diperkenalkan sebagai *real-time forecasting and control system*. Metode ini pada awalnya dikembangkan dalam bidang sistem komunikasi dan sistem kendali dalam teknik rekayasa sekitar setengah abad yang lalu (Kalman, 1960), dan dalam bidang hidrologi dan rekayasa sumber daya air diperkenalkan dalam tahun 1980-an (Wood dan O'Connell, 1985; Ngan dan Russell, 1986; dan Pawitan, 1987) dan baru dikenali dan diterima sebagai teknik baku dalam bidang statistika tahun 1980-an dengan formulasi *state-space* (Meinhold and Singpurwalla, 1983). Penerapan teknik prediksi ini akan diilustrasikan dalam suatu prediksi dan simulasi dinamika medan intensitas sel hujan konvektif pada interval waktu 5-menit dari suatu jejaring penakar hujan rapat di Alamogordo-New Mexico.

2 BANJIR, KEKERINGAN, DAN SISTEM HUJAN

2.1 Memahami Watak Banjir, Kekeringan Dan Antisipasinya

Banjir adalah suatu kondisi aliran sungai yang melampaui kapasitas angkut sungai sehingga air meluap melewati tepi sungai tertentu dan menggenangi bantaran banjir. Kebanyakan sungai akan mengalami banjir sebanyak 2 sampai 3 kali setiap tahunnya (Leopold, 1979), sesuai dengan frekuensi kejadian hujan deras di wilayah tangkapannya. Banjir ini akan menimbulkan masalah atau kerugian bilamana bantaran banjir yang berupa dataran rendah yang luas sudah menjadi daerah terbangun dengan nilai sosial-ekonomi tinggi, termasuk untuk daerah produksi pertanian.

Penyebab banjir adalah curah hujan deras yang berlangsung cukup lama dengan cakupan yang meliputi luasan daerah aliran sungai (*basin wide rainfall*), yang menghasilkan limpasan yang tidak tertampung oleh kapasitas angkut sungai. Watak utama dari banjir terutama ditentukan oleh hujan deras (dengan ciri acak) yang mengawalinya serta karakteristik daerah aliran sungainya (ciri deterministik). Ciri hujan deras demikian dicirikan oleh sifat acak, berlangsung dalam waktu relatif singkat, dan sampai saat ini tidak dapat dikendalikan maupun diantisipasi sebelumnya. Sifat ini terbawa pada banjir, yaitu berlangsung dalam waktu yang relatif singkat dan sering tanpa dapat diduga sebelumnya, dengan dampak sosial - ekonomi yang merugikan. Hubungan hujan-limpasan dalam suatu

sistem daerah aliran sungai (DAS) merepresentasikan suatu sistem transformasi hidrologi dari curah hujan yang dicirikan oleh frekuensi tinggi menjadi limpasan yang dicirikan oleh frekuensi rendah, sehingga sistem DAS dikenal sebagai *low pass filter*. Dan dari hubungan sebab-akibat antara hujan dan banjir inilah maka antisipasi banjir setidaknya hanya dapat didekati dari kemampuan kita mengantisipasi kejadian hujan deras, yang diharapkan lebih mungkin terjadi pada tahun-tahun basah, musim hujan maupun musim kering.

Berbeda dengan banjir, maka bencana kekeringan terjadi secara perlahan-lahan, dan seringkali kita baru tersentak akibat dampaknya yang menyengat setelah kekeringan ini mencapai tingkat yang parah. Kekeringan terjadi karena kurangnya curah hujan di suatu daerah untuk suatu selang waktu yang lama, yang mengakibatkan berkurangnya pasokan air di sungai karena debit yang menyusut serta menyusutnya lengas tanah dengan kerusakan pada suatu sistem produksi pertanian. Untuk batasan kekeringan dengan teknik analisis dan hubungannya dengan pertanian dapat diperoleh dalam Hounam et al. (1975).

Dengan proses terjadinya kekeringan yang memakan waktu yang relatif panjang (beberapa minggu sampai beberapa bulan), seharusnya kita mampu memantau dan mendeteksi perkembangan gejala kekeringan ini dan mengantisipasi tindakan yang diperlukan untuk menekan dampak negatifnya.

Antisipasi banjir dan kekeringan ditentukan oleh kemampuan kita memprediksi sifat hujan pada suatu waktu atau musim. Dengan kemampuan modeling hidrologi saat ini, prediksi banjir dapat dilakukan dengan model deterministik untuk sembarang kejadian hujan dengan intensitas tertentu, sehingga kuncinya terletak pada kemampuan prakiraan hujan. Perlu dicatat bahwa evaluasi prakiraan musim hanya layak dilakukan jika data curah hujan wilayah sesungguhnya sudah tercatat. Hal ini mensyaratkan suatu program pengamatan dan monitoring cuaca dan iklim yang memadai.

2.2 Medan Acak Hujan

Iklim dapat dibataskan sebagai statistik dari cuaca untuk suatu jangka waktu tertentu, dan cuaca menyatakan status atmosfer pada sembarang waktu tertentu. Dua unsur utama penciri cuaca adalah suhu dan curah hujan, yang perangnya sangat berbeda. Curah hujan diketahui sebagai unsur cuaca yang paling bervariasi menurut ruang dan waktu dan sangat sulit diprediksi, oleh karenanya menjadi tantangan dan interes untuk dikaji di sini. Ini ditunjukkan misalnya dalam Kawamura et al. (1997) yang memodel *real-time storm tracking*, yang dapat dikembangkan hanya apabila data empiris tersedia dengan memadai yang meliputi eksterior dan interior hujan.

Mekanisme terjadinya hujan dapat dibedakan menjadi dua macam saja, yaitu jenis stratiform dan jenis konvektif (Houze, 1981). Dalam hujan stratiform, gerakan vertikal udara biasanya lemah sehingga butiran hujan akan bergerak jatuh hampir sesaat setelah pembentukannya. Daerah pembentukan hujan jenis ini adalah pada atau dekat puncak dari sistem awan yang meluas secara horizontal mencapai jarak 400 km. Butiran hujan yang terbentuk di lapisan atas akan jatuh perlahan-lahan sementara mereka terus tumbuh dan bergabung membentuk butiran lebih besar menghasilkan hujan dengan intensitas rendah sampai sedang dalam suatu medan yang luas. Hujan konvektif terjadi bilamana gerakan vertikal udara cukup kuat, yaitu ketika terdapat ketidak-setimbangan termodinamika dalam

lapisan atmosfer dengan terbentuknya per-awan-an jenis kumulus dan kumulonimbus. Butiran hujan terbentuk dan mulai tumbuh dekat dasar per-awan-an pada saat pembentukan awan. Gerakan udara ke atas ini akan membawa serta butir-butir air ini sampai mereka menjadi cukup berat untuk kemudian jatuh sebagai hujan dengan intensitas relatif tinggi. Hujan jenis ini sering dicirikan oleh pola yang terpusat dengan dimensi horizontal terbatas, antara 1 sampai 10 km. Mekanisme jenis terakhir ini yang diketahui sebagai sel-hujan konvektif, sering merupakan seluruh atau sebagian terbesar dari hujan yang terjadi di daerah tropis seperti Indonesia. Pemetaan medan intensitas hujan akan menunjukkan suatu medan acak dengan pola khas dan disebut sebagai **medan acak hujan**. Sistem hujan yang meluas sering berbentuk *multi-convective-complex* (MCC) dapat dicirikan oleh struktur sel-konvektif hujan dengan dinamikanya mengikuti daur 'lahir-tumbuh-dewasa-mati'.

2.3 Model Medan Acak Hujan dan Representasi Sistem Hujan

Sistem hujan yang dijelaskan di atas merupakan bagian dari sistem atmosfer, dan perilakunya maupun deskripsinya akan didasarkan pada apa yang terukur di permukaan bumi, yaitu sebagai curah hujan, baik dalam bentuk intensitas maupun jeluk kumulatifnya. Model medan acak hujan demikian dapat dinyatakan sebagai medan intensitas sel-hujan konvektif untuk suatu kejadian hujan ataupun curah hujan pada sembarang interval waktu lebih panjang (hari, dasarian, bulan, musim) sebagai medan acak skalar, di mana pada sembarang titik $\underline{z} = (z_i, z_j)$ dalam ruang dua dimensi dan sembarang waktu t , dinyatakan oleh suatu peubah acak $r(t; \underline{z})$ sebagai sinyal hujan yang menerima rangsangan suatu proses acak homogen $w(t; \underline{z})$ dan dinamika medan acak hujan ini dapat direpresentasikan sebagai proses non-stasioner yang dapat dinyatakan oleh persamaan diferensial stokastik orde-1 berikut

$$\frac{dr(t)}{dt} = H_t r(t) + \underline{w}(t) \dots\dots\dots (2-1)$$

dengan kondisi awal untuk rerata dan ragam dari peubah status $r(t)$ diberikan oleh r_0 dan P_0 .

Keterangan:

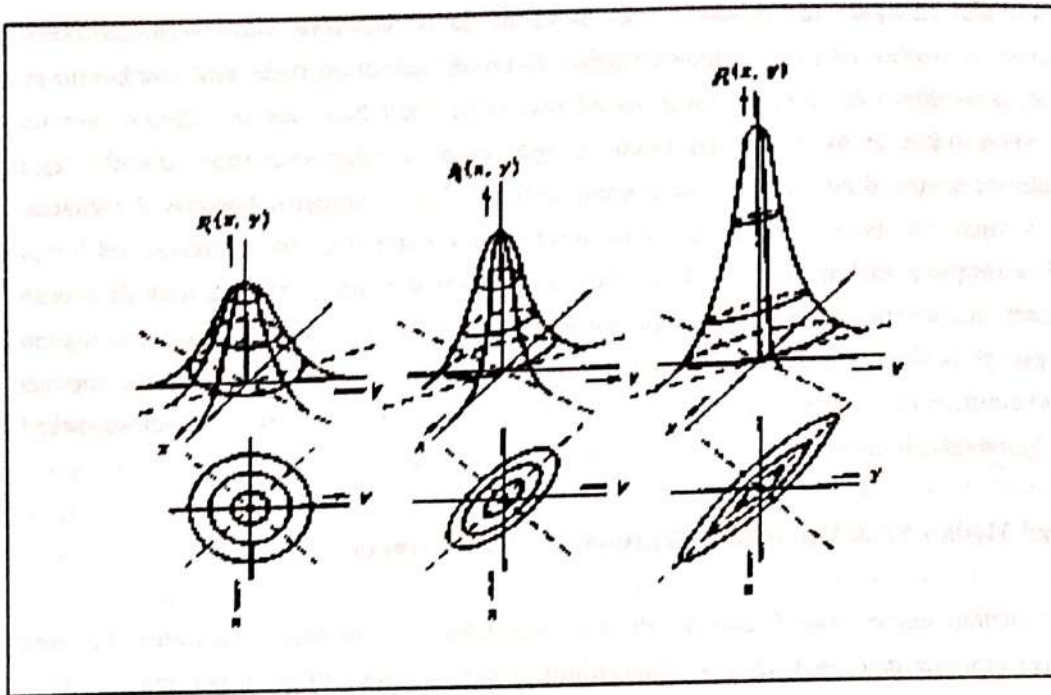
H_t adalah matriks transisi status yang menentukan propagasi medan hujan dari status satu ke lainnya;

$\underline{w}(t)$ adalah vektor galat model.

Medan sinyal hujan $r(t; \underline{z})$ yang merupakan fungsi acak dalam ruang dan waktu, dan dalam penelitian ini dimodel dan dibataskan sebagai sel-hujan konvektif yang dinyatakan mengikuti sebaran Gauss dua dimensi (2-D) yang memiliki bentuk elipsoid. Pada permukaan bumi, intensitas suatu sel-hujan konvektif dapat diamati dari isohyet-isohyet berbentuk elips terpusat di sekitar suatu maksimum. Bentuk dan orientasi dari model sel-hujan konvektif ini ditentukan oleh tiga parameter bentuk sebagaimana dinyatakan oleh persamaan:

$$r(t; \underline{z}) = r_0(t) \cdot \exp\{-a(t)[z_i - u(t)]^2 + b(t)[z_i - u(t)][z_j - v(t)] + c(t)[z_j - v(t)]^2\} \dots\dots\dots (2-2)$$

dengan $r_0(t)$ adalah intensitas hujan pada pusat elipsoid $[u(t), v(t)]$ pada sembarang waktu t , dan $a(t)$, $b(t)$, dan $c(t)$ adalah parameter yang menentukan bentuk dan orientasi sel-hujan pada waktu t . Gambar 2-1 berikut menunjukkan beberapa perspektif dari elipsoid dengan orientasi tetap, tetapi dengan intensitas dan nisbah c/a meningkat.



Gambar 2-1: Perspektif model elipsoid 2-D dengan beberapa bentuk.

Representasi intensitas hujan demikian memiliki enam parameter sebagai peubah status (*state variables*) sistem, yaitu r_0 , u ; v ; a ; b ; dan c . Keenam parameter ini menyatakan vektor status $\underline{x}(t)$, sehingga medan intensitas hujan $r(t; \underline{z})$ setara dengan $r(t; \underline{x})$ yang non-linier dalam $\underline{x}(t)$.

Dalam bentuk diskrit persamaan dinamika status medan hujan yang diberikan oleh (2-1) kemudian dapat dituliskan menjadi

$$\underline{x}(t+1) = H_t \underline{x}(t) + \underline{w}(t) \dots\dots\dots (2-3)$$

yang menyatakan persamaan sistem, dengan $\underline{w}(t)$ adalah vektor galat, tak-berkorelasi, dan menyebar normal dengan ciri

$$\begin{aligned} E[\underline{w}(t)] &= 0, \text{ dan} \\ E[\underline{w}(t) \underline{w}(t)'] &= Q_t \delta_t^s \dots\dots\dots (2-4) \end{aligned}$$

Medan acak hujan ini akan diukur pada sejumlah titik pengamatan $\underline{j} \{i = 1, 2, \dots, N\}$ dan memenuhi hubungan linier berikut

$$\underline{p}(t) = M_t \underline{x}(t) + \underline{v}(t) \dots\dots\dots (2-5)$$

Keterangan:

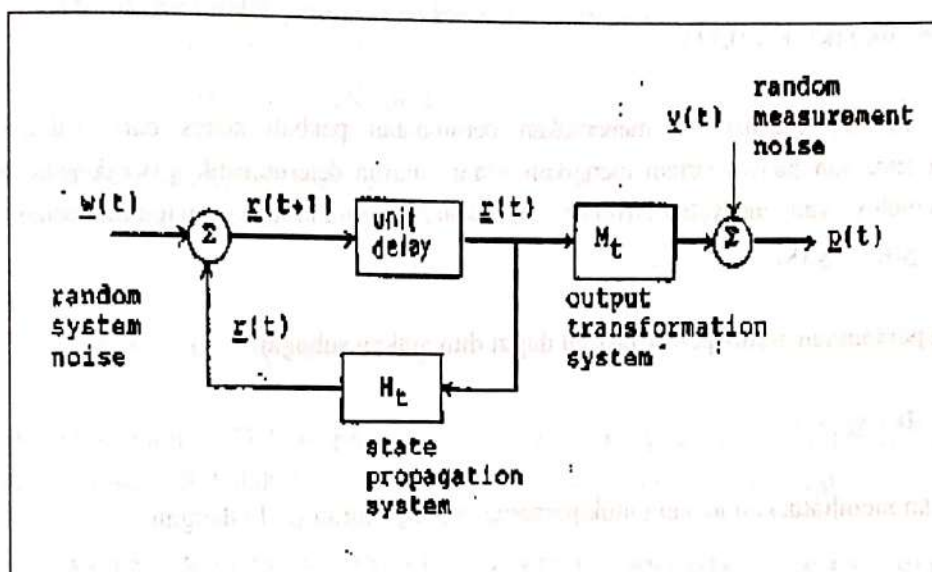
- $\underline{p}(t)$ adalah vektor nilai pengamatan hujan pada waktu t dan N titik pengamatan $\{(x_i, y_i) : i = 1, 2, \dots, N\}$;
- M_t adalah matriks transformasi, dalam kasus ini diberikan oleh matriks identiti, walau secara umum bervariasi menurut waktu;
- $\underline{x}(t)$ adalah vektor status hujan, nilai sinyal hujan yang diharapkan pada waktu t dan titik pengamatan $\{(x_i, y_i) ; i = 1, 2, \dots, N\}$;

$v(t)$ adalah vektor galat pengukuran pada waktu t dan titik pengamatan $\{(x_i, y_i); i = 1, 2, \dots, N\}$; dan

N adalah jumlah titik pengamatan hujan.

Vektor galat pengukuran $v(t; z)$ dicirikan oleh embutan-embutan acak dalam suatu proses yang tidak memiliki hubungan sebab-akibat yang dikenal juga sebagai proses Gauss atau *white noise*, dianggap menyebar normal dengan nilai tengah nil, tak-berkorelasi, dan memiliki matriks kovarians R_t .

Secara skematik sistem dinamika medan hujan dengan sistem pengukurannya dapat digambarkan sebagaimana diberikan oleh Gambar 2-2, yang menyatakan formulasi model diskrit waktu dari suatu sistem hujan 'state-space self-generating' untuk Teknik Kalman Filter.



Gambar 2-2: Model sistem hujan 'state-space self-generating'.

3 TEKNIK KALMAN FILTER

Teknik ini merupakan pengembangan dari model prakiraan statistika-probabilitistik sebelumnya seperti auto-regressive (AR), ARMA dan ARIMA (Pawitan et al., 1995), tetapi dengan menggunakan teknik *recursive* dalam mengintegrasikan informasi/hasil pengamatan terbaru ke dalam model dan dalam pendugaan parameter model, sehingga dapat dicapai sistem adaptif dengan efisiensi komputasi yang tinggi. Ciri dari model prediksi ini adalah digunakannya informasi terakhir untuk meng-*update* prediksi sebelumnya dan melakukan prediksi selanjutnya, sesuai dengan hukum Markov. Penggunaan utama dari teknik prediksi ini adalah pada suatu sistem peringatan dini, sehingga dalam hal ini prediksi cuaca dan iklim perlu dikembangkan menjadi sistem peringatan dini sifat cuaca dan musim jangka pendek sampai menengah, dengan jangkauan waktu prakiraan mulai dari beberapa jam, harian sampai bulanan, triwulanan, dan

musiman. Penjelasan rinci mengenai perumusan teknik ini dapat diperoleh diantaranya dalam Wood and O'Connell (1985).

Model elipsoid untuk medan sel-hujan konvektif yang merupakan fungsi non-linier terhadap vektor status $\underline{x}(t)$ perlu dilinierkan dalam formulasi Extended Kalman Filter (EKF), yaitu pertama dengan melogaritmakan persamaan (2-1), sehingga persamaan pengamatan (2-3) dalam bentuk diskrit menjadi

$$y_{ik} = h_i(k; \underline{x}(k)) + v_{ik} \dots\dots\dots (3-1)$$

dengan y_{ik} adalah logaritma dari nilai pengamatan $p(t; \underline{z})$ pada $t = i$ dan $\underline{z} =$ lokasi stasiun ke- k , dan v_{ik} adalah galat pengukuran bersangkutan. Untuk model non-linier ini, bentuk diskrit persamaan sistem sebagaimana diberikan persamaan (2-1) berubah menjadi

$$\underline{x}(k+1) = \Phi_k \underline{x}(k) + \underline{w}(k+1) \dots\dots\dots (3-2)$$

dengan matriks transisi Φ_k menentukan perambatan peubah status dari waktu-ke-waktu. Sekarang andaikan bahwa sistem mengikuti suatu lintasan deterministik $\underline{x}'(k)$ dengan nilai awal diberikan oleh \underline{x}'_0 yang menyebar $N(0, P_0)$. Bataskan *perturbation* terhadap lintasan acuan

$$\delta \underline{x}(k) = \underline{x}(k) - \underline{x}'(k) \dots\dots\dots (3-3)$$

sehingga persamaan status perturbasi ini dapat dinyatakan sebagai:

$$\delta \underline{x}_{k+1} = \Phi_k \delta \underline{x}_k + v_k \dots\dots\dots (3-4)$$

dan dengan membataskan acuan untuk persamaan pengukuran (3-1) dengan

$$y'(k) = h[k; \underline{x}'(k)]$$

dan perturbasinya dengan: $\delta y_k = y(k) - y'(k)$, dan operasi linierisasi dengan ekspansi Taylor ordo-1, maka diperoleh persamaan linier sebagai berikut

$$\delta y_k = Mk. \delta x_k + v_k \dots\dots\dots (3-5)$$

dengan

$$Mk = \frac{\partial h(k; \underline{x}(k))}{\partial \underline{x}(k)}$$

yang merupakan matriks turunan bagian sepanjang lintasan acuan. Setiap anggota dari Mk hanya merupakan fungsi dari waktu saja.

Dengan memadukan persamaan (3-4) dan (3-5), teori saringan linier dapat digunakan terhadap sistem dinamik sel-hujan konvektif di atas. Prosedur komputasi Kalman Filter untuk dapat dirumuskan sebagai berikut:

Persamaan sistem:

$$\delta x_{k+1} = \Phi_k \delta x_k + v_k$$

Persamaan pengukuran: $\delta y_k = M_k \delta x_k + v_k$

Pendugaan EKF dari δx_{k+1} berdasar pada pengamatan $y(0), y(1), \dots, y(k)$ dapat diperoleh secara rekursif sebagai berikut

$$\delta x[k+1|k] = \Phi_k \delta x[k|k]$$

dengan matriks kovarians:

$$P[k+1|k] = \Phi_k P[k|k] \Phi_k^T + Q_{k+1}$$

Dan parameter *update* setelah pengamatan berikut diperoleh adalah:

$$\delta x[k|k] = \delta x[k|k-1] + N(k) [\delta y_k - M_k \delta x[k|k-1]]$$

$$P[k|k] = P[k|k-1] - N(k) M_k P[k|k-1]$$

dengan

$$N(k) = P[k|k-1] M_k^T [M_k P[k|k-1] M_k^T - R_k]^{-1}$$

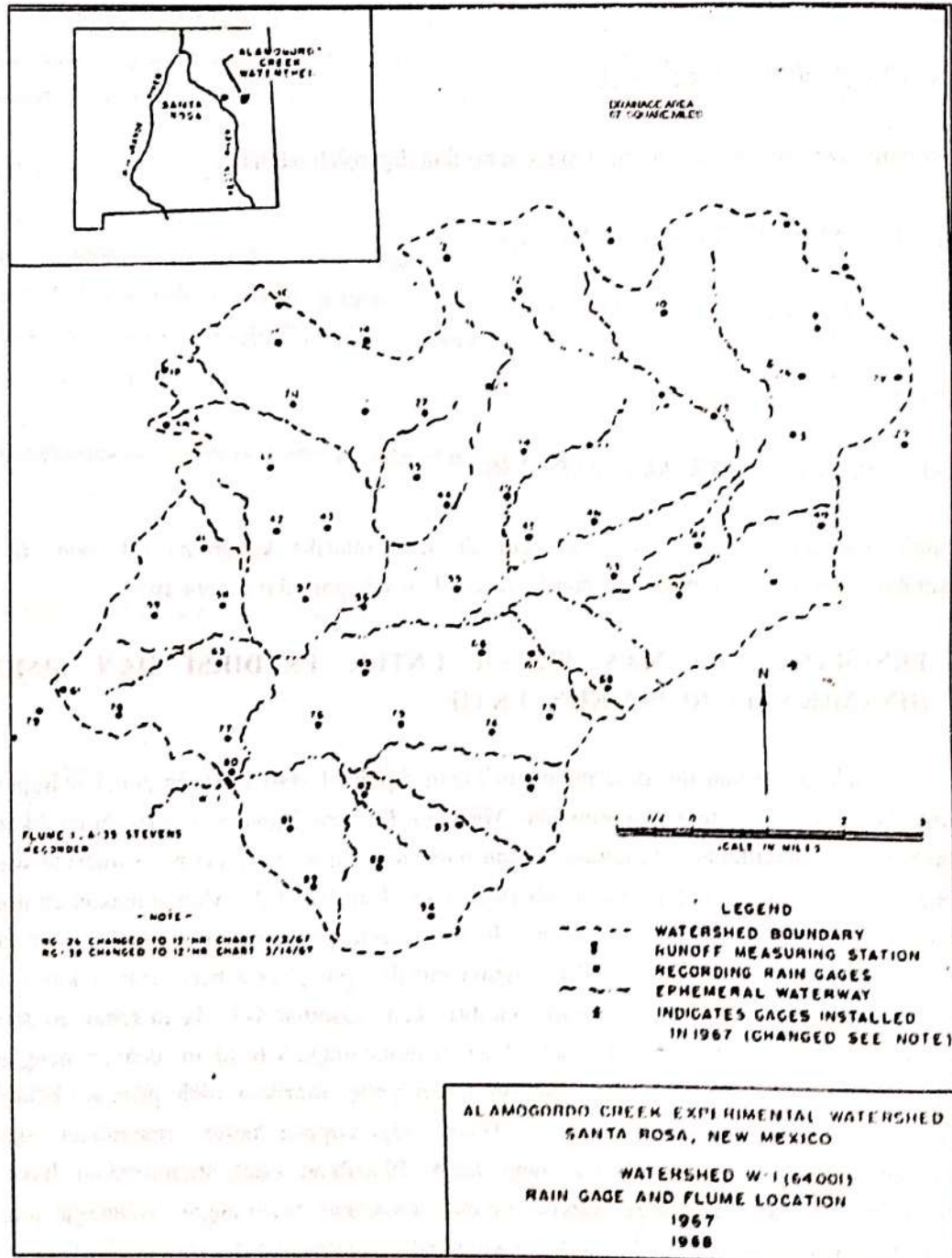
adalah Kalman gain. Dalam prosedur di atas, matriks kovarians Q_k dan R_k harus diketahui/ditetapkan lebih dahulu, dan P_0 ditetapkan sebagai nilai ragam awal.

4 PENERAPAN KALMAN FILTER UNTUK PREDIKSI DAN SIMULASI DINAMIKA SEL HUJAN KONVEKTIF

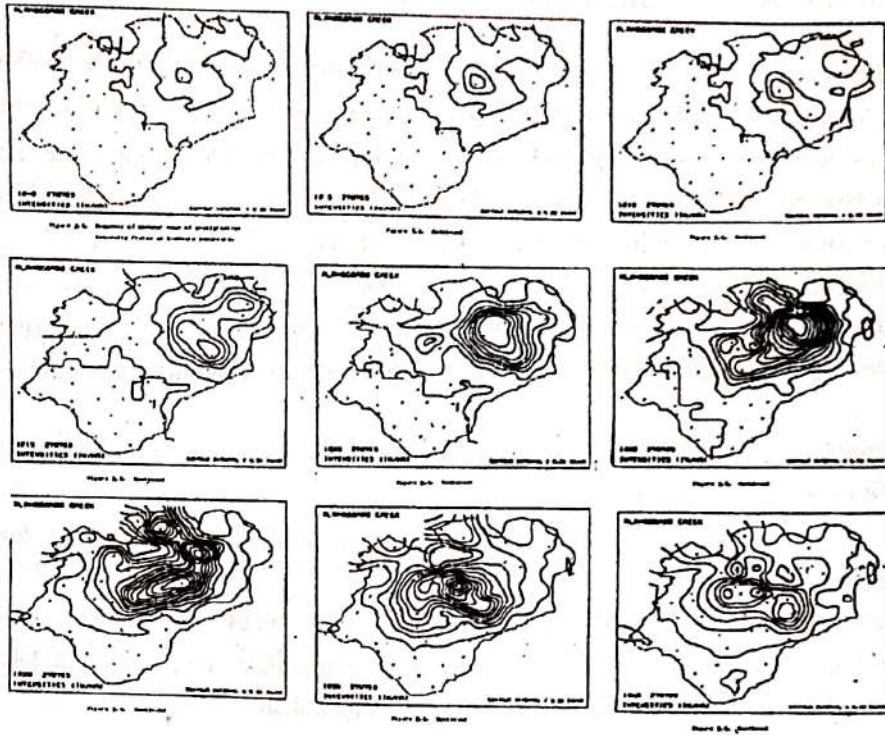
Pada penelitian ini, data intensitas hujan diperoleh dari jaringan penakar hujan rapat untuk daerah aliran sungai eksperimental Alamogordo, New Mexico, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-1. Serentetan peta kontur medan intensitas hujan (*isohyet*) pada interval waktu 5-menitan untuk suatu kejadian hujan diberikan pada Gambar 4-2. Menggunakan contoh data kejadian hujan yang berlangsung selama 40 titik waktu pengamatan berjarak 5-menitan dan diikuti dalam lingkaran dengan 37 titik pengamatan di lapang (grid berukuran 1 km x 1 km), model sel hujan konvektif di atas telah dikalibrasikan. Gambar 4-3 adalah sebagian dari hasil yang diperoleh dari parameter dugaan. Dan membandingkan hasil ini dengan pengamatan, dapat dikatakan bahwa intensitas medan hujan yang dicirikan oleh puncak, bentuk dan orientasi sel-hujan cukup memadai. Akan tetapi, upaya untuk mengulang algoritma menggunakan nilai-nilai parameter yang telah dihasilkan tidak memberikan hasil yang konvergen. Hal ini diduga karena ketidak-mampuan perhitungan sehingga nilai-nilai parameter hasil *up-dating* dan kovariansnya menjadi terlampau besar.

Untuk tujuan simulasi, nilai-nilai permukaan intensitas hujan dapat dibangkitkan dengan menggunakan model yang telah dibangun di atas dengan memasukkan nilai-nilai parameter hasil kalibrasi. Tahap pertama, nilai-nilai vektor status dihitung dari persamaan

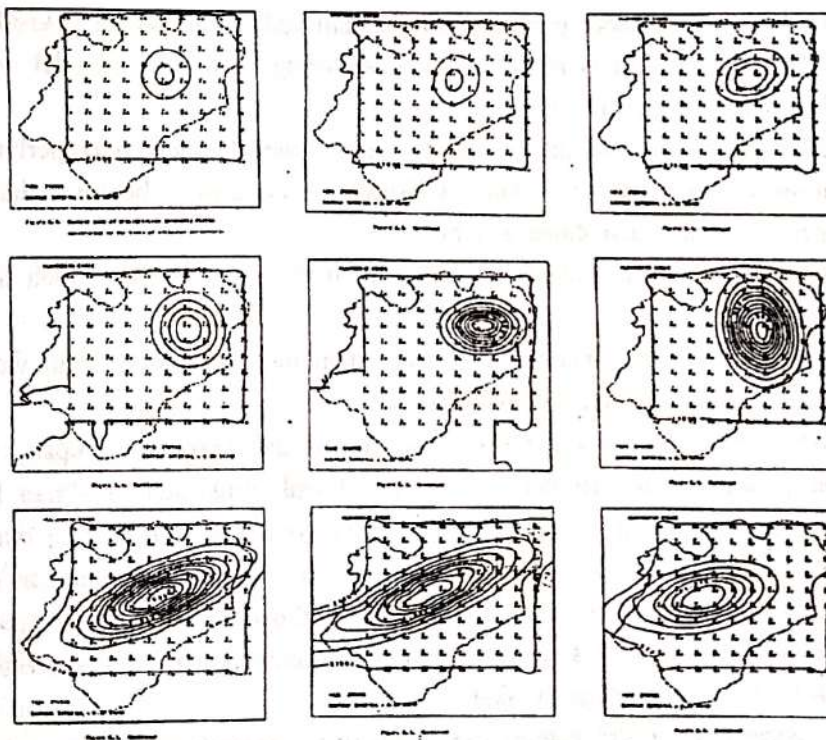
(3-4) dan status berikutnya dibangkitkan memenuhi persamaan (3-2). Tahap dua, nilai-nilai intensitas hujan dihitung menurut pernyataan (3-5). Galat dalam kedua persamaan pembangkit diperoleh dengan menggandakan simpangan baku yang bersangkutan dengan bilangan acak normal baku $N(0,1)$. Dinamika dari sel-hujan konvektif dapat dilacak dari titik pusat sel acuan, dibangkitkan berdasarkan jenis badai yang dipertimbangkan. Untuk badai konvektif, sel-hujan konvektif dapat bergerak secara acak menurut langkah Markov 2-D. Sedangkan untuk tipe badai siklonik, suatu model kinematik deterministik dapat diperkenalkan melintasi suatu daerah aliran sungai tertentu.



Gambar 4-1: Daerah aliran sungai eksperimental di Alamogordo – New Mexico, USA dengan jejaring penakar hujan rapat (Dari Pawitan, 1987).



Gambar 4-2: Rentetan peta kontur intensitas hujan konvektif 5-menitan hasil pengamatan yang menunjukkan dinamika suatu kejadian medan sel-hujan konvektif di DAS Alamogordo.



Gambar 4-3: Rentetan peta kontur intensitas hujan konvektif 5-menitan yang dibangkitkan dari simulasi model elipsoid 2-D untuk kejadian medan sel-hujan konvektif di DAS Alamogordo.

5 PERANCANGAN SISTEM PERINGATAN DINI

Perancangan suatu sistem peringatan dini untuk banjir dan kekeringan, sesuai dengan wataknya, harus dibuat berbeda, walau dapat menggunakan metoda prakiraan yang sama. Perbedaannya adalah dalam hal identifikasi faktor-faktor kendali yang mencirikan parameter-parameter sistem yang dipilih sesuai dengan tujuannya. Berikut dipertimbangkan perancangan suatu sistem peringatan dini untuk banjir (*Flood warning system*) yang dapat berperan sebagai sarana pengambilan keputusan yang cepat dan tepat untuk menghindari dampak dan kerugian yang tidak diharapkan. Sistem demikian akan merupakan suatu "*real-time forecasting and control system*" yang akan meliputi keseluruhan atau sebagian dari aspek berikut:

- (1) spesifikasi dari suatu jejaring "*telemetry raingages*" yang menyangkut kerapatan dan konfigurasi jaringan;
- (2) spesifikasi dan kalibrasi dari suatu model matematik untuk "*real-time forecasting streamflow*" dari data curah hujan;
- (3) spesifikasi dan kalibrasi suatu model matematik untuk "*real-time channel flow routing*", yang menghubungkan data pengukuran aliran sungai dengan hasil model curah hujan – limpasan (*rainfall-runoff*) yang digunakan;
- (4) spesifikasi dan kalibrasi dari model matematik untuk *real-time forecasting* dari satu atau lebih parameter kualitas air;
- (5) spesifikasi suatu kerangka pengambilan keputusan yang mengevaluasi hitungan untung-rugi dan spesifikasi tindakan-tindakan pengendalian untuk perkiraan kuantitas dan kualitas air;
- (6) implementasi dari prosedur prakiraan dan kendali pada suatu sistem mikro-komputer serta *interfacing*-nya dengan jaringan *telemetry*, dan model-model matematik yang digunakan dengan ciri-ciri:
 - model harus adaptif dalam artian bahwa model dapat memperbarui nilai parameter-parameternya dan prakiraan *real-time* begitu data baru diperoleh/dimasukkan dalam sistem;
 - model mampu menunjukkan kesalahan (*error*) yang dihasilkan oleh hasil-hasil prakiraan;
 - model dapat diimplementasikan pada sistem mikro-komputer atau workstation dengan fasilitas storage minimal; dan
 - model harus mampu beroperasi dengan sekuensi data yang terinterupsi.

Dengan pertimbangan-pertimbangan di atas, teknik prakiraan "*Kalman Filtering*" menjanjikan harapan untuk penggunaannya dalam sistem *real-time forecasting and control* sebagai sistem peringatan dini banjir (ataupun kekeringan). Dengan pendekatan ini, suatu sistem peringatan dini banjir (ataupun kekeringan) akan diperlakukan sebagai suatu proses yang dapat direpresentasikan oleh sejumlah parameter sistem sebagai *state variables* dalam suatu representasi *state-space* sebagai berikut:

- persamaan sistem (atau model sistem) yang memerikan proses banjir dengan suatu sistem error yang menggambarkan ketidak-sempurnaan representasi sistem oleh model;
- persamaan pengamatan yang dapat digunakan untuk menduga nilai-nilai masukan maupun luaran dari model dengan pembatasan oleh kesalahan pengukuran.

6 KESIMPULAN DAN SARAN

1. Berdasarkan hubungan sebab-akibat antara hujan dan banjir maka antisipasi banjir hanya dapat didekati dari kemampuan kita dalam mengantisipasi kejadian hujan deras. Dengan kemampuan pemodelan hidrologi saat ini, prediksi banjir dapat dilakukan dengan model deterministik untuk sembarang kejadian hujan dengan intensitas tertentu, sehingga kuncinya terletak pada kemampuan prakiraan hujan.
2. Pada permukaan bumi, medan intensitas hujan dapat dicirikan oleh sel-hujan konvektif yang dapat diamati dari isohyet-isohyet berbentuk elips terpusat di sekitar suatu maksimum. Dinamika medan hujan ini membentuk suatu sistem hujan yang menjadi dasar model prediksi dan prakiraan, seperti menggunakan teknik Kalman filter.
3. Model elipsoid 2-D untuk medan sel-hujan konvektif yang merupakan fungsi non-linier terhadap vektor status $\underline{x}(t)$ dapat diformulasikan dengan Extended Kalman Filter (EKF) dengan hasil memadai.
4. Teknik prakiraan "Kalman Filtering" menjanjikan harapan untuk penggunaannya dalam sistem *real-time forecasting and control* sebagai sistem peringatan dini curah hujan dan banjir, dan diharapkan dapat diuji-cobakan di Indonesia.

DAFTAR RUJUKAN:

- Hounam, CE., JJ. Burgos, MS. Kalik, WC. palmer, and J. Rodda (1975). Drought and Agriculture. WMO Technical Note No. 138.
- Houze, R.A. (1981). Structure of atmospheric precipitation systems: a global overview. Radio Sci., 16(5): 671-689.
- Kalman, R.E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. Trans.ASME, J.Basic Engng., 83: 95-108.
- Kawamura, A., K.Jimno. R.Berndtsson and T. Furukawa (1997). Real-time tracking of convective rainfall properties using a two-dimensional advection-diffusion model. J. Hydrol., Vol. 203(1-4): 109-118.
- Leopold, LB. (1979). Water: a primer. Prentice Hall.
- Meinhold, R.J. and N.D. Singpurwalla (1983). Understanding the Kalman Filter. The American Statistian. Vol. 37(2): 123-127.
- Ngan, P. and S.O. Russell (1986). Example of flow forecasting with Kalman Filter. J.Hydraul. Engng. Vol 116(9):
- Pawitan, Hidayat (1987). Penerapan teknik saringan Kalman dalam pendugaan parameter model dinamik sel-hujan konvektif. Makalah disajikan dalam Seminar "Penerapan Teknik Saringan Kalman", Lab. Fluida dan Hidrodinamika - ITB, Bandung, 20-21 Maret 1987.
- _____, Blantaran de Rozari, dan Irsal Las (1995). Prakiraan iklim: spektrum teknik dan arah pengembangannya. Makalah kontribusi Tim PERHIMPI Pusat untuk disajikan dalam Forum Diskusi Prakiraan Iklim di Wajo - Sulawesi Selatan, 7 Agustus 1995 dan PERHIMPI Cabang Sulawesi Selatan.
- Wood, Eric and O'Connell, PE. (1985). Real-time forecasting. In: Hydrological Forecasting, Edited by: M.G. Anderson and T.P. Burt, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, pp.505-558.