

Pengelolaan Dan Optimalisasi Model Sumberdaya Air Tanah Dengan Metode Simulasi (Studi Literatur)

Muhammad Tri Aditya¹

¹ Politeknik Negeri Malang and muhammadtri@polinema.ac.id

ABSTRAK

Pengelolaan aliran air tanah adalah tugas yang menantang di seluruh dunia diakibatkan meningkatnya permintaan air untuk keperluan industri, pertanian, dan domestik serta menyusutnya sumber daya. Berbagai solusi dapat dipertimbangkan untuk mengatasi masalah pengelolaan air tanah, tetapi efektivitas semua solusi dan kombinasinya tidak dapat diverifikasi dengan eksperimen lapangan. Mengingat kemampuan prediktifnya, pemodelan air tanah dengan simulasi seringkali merupakan satu-satunya cara yang layak untuk memberikan masukan bagi keputusan pengelolaan karena model tersebut dapat memperkirakan kemungkinan dampak dari strategi pengelolaan air tertentu. Pemodelan aliran air tanah memerlukan manajemen optimalisasi untuk melakukan estimasi serta memprediksikan pergerakan air tanah pada akuifer. Makalah ini mengulas berbagai metode optimalisasi yang telah digunakan untuk memecahkan masalah perencanaan dan pengelolaan air tanah serta menyajikan tinjauan dari aplikasi pemodelan simulasi untuk pengelolaan sumber daya air tanah. Metode optimalisasi telah digunakan dalam pemodelan air tanah, perencanaan dan pengelolaan sistem air tanah. Metode optimalisasi tersebut meliputi teknik pemrograman matematis seperti pemrograman linier, kuadratik, dinamis, stokastik, non linier, dan algoritma pencarian global seperti algoritma genetika, simulasi annealing, dan pencarian tabu. Model simulasi aliran air tanah telah digunakan oleh banyak peneliti untuk memecahkan masalah yang relatif kompleks dalam pengelolaan air tanah, irigasi, dan drainase. Beberapa peneliti merekomendasikan penggunaan beberapa model untuk mengatasi keterbatasan model tertentu.

Kata Kunci: Pemodelan Air Tanah, Metode Optimalisasi, Pengelolaan, Metode Simulasi.

ABSTRACT

The management of groundwater flows is a challenging task worldwide due to the increasing demand for water for industrial, agricultural, and domestic uses and depleting resources. Various solutions can be considered to address groundwater management problems, but the effectiveness of all keys and their combinations cannot be verified by field experiments. Given its predictive power, groundwater modeling by simulation is often the only viable way to provide input to management decisions because the model can predict the likely impact of a particular water management strategy. Groundwater flow modeling requires optimization management to estimate and predict groundwater movement in aquifers. This paper reviews various optimization methods that have been used to solve groundwater planning and management problems and presents an overview of the application of simulation modeling to groundwater resource management. Optimization methods have been used in groundwater modeling, planning, and managing groundwater systems. The optimization methods include mathematical programming techniques such as linear, quadratic, dynamic, stochastic, and nonlinear programming, and global search algorithms such as genetic algorithms, annealing simulations, and taboo search. Groundwater flow simulation models have been used by many researchers to solve relatively complex problems in groundwater management, irrigation, and drainage. Some researchers recommend using multiple models to overcome the limitations of specific models.

Keywords: Groundwater Modeling, Optimization Methods, Management, Simulation Methods

PENDAHULUAN

Keberlanjutan sumber daya air tanah merupakan isu yang sering dibicarakan di dunia internasional (Fienen & Arshad, 2016) dengan latar belakang meningkatnya permintaan air untuk keperluan industri, pertanian, dan domestik untuk populasi global yang berkembang serta sumber

daya air yang menyusut (Boretti & Rosa, 2019). Namun, air tanah seringkali tidak dikelola secara memadai untuk memastikan keberlanjutan jangka panjangnya (Foster & Garduño, 2013). Faktanya, penipisan dan kontaminasi air tanah lazim terjadi di negara maju dan berkembang (Jia et al, 2020) dan secara lokal menyebabkan dampak sosial ekonomi yang signifikan. Sementara, pengerukan menyebabkan penipisan air tanah, limbah yang tidak diolah atau diolah sebagian, limbah industri, dan bahan kimia pertanian adalah kontributor utama kontaminasi (Yazdan et al, 2020). Mirip dengan penipisan air tanah, naiknya permukaan air tanah juga merupakan masalah pengelolaan air tanah yang serius pada daerah kering dan semi kering di dunia (Mays, 2013).

Perluasan sistem irigasi yang terus-menerus, tidak adanya drainase alami dan buatan, rembesan dari jaringan saluran yang tidak bergaris, perkolasi dari ladang irigasi, dan eksploitasi yang rendah dari air tanah berkualitas buruk merupakan faktor utama yang berkontribusi terhadap masalah permukaan air yang meningkat (Singh, 2016). Berbagai solusi dapat dipertimbangkan untuk mengatasi masalah dalam pengelolaan air tanah, yang melibatkan kuantitas dan masalah terkait kualitas (Jakeman et al, 2016). Tetapi efektivitas semua solusi dan kombinasinya tidak dapat diverifikasi dengan eksperimen lapangan. Selain itu, banyak masalah dan prospek yang terkait dengan opsi pengelolaan air tertentu sering kali tidak dikenali sampai mereka berkembang dengan baik. Model simulasi melalui kemampuan prediktifnya seringkali merupakan satu-satunya cara yang layak untuk memberikan masukan bagi keputusan manajemen.

Model air tanah adalah model matematika berbasis fisik diturunkan dari hukum Darcy dan persamaan kontinuitas (Malenica et al, 2018). Model air tanah digabungkan dengan model pengelolaan untuk membantu pengambilan keputusan dalam perencanaan dan pengelolaan sumber daya air (Janža, 2015). Model-model ini dapat membantu memperkirakan kemungkinan dampak dari strategi pengelolaan air tertentu. Oleh karena itu, hasil studi simulasi kebijakan pengelolaan air yang ada dan yang diusulkan dapat menjadi dasar untuk identifikasi rencana pengelolaan air yang sesuai untuk masa depan (Singh, 2013).

Dalam beberapa tahun terakhir, sejumlah besar model simulasi telah digunakan untuk pengelolaan air tanah oleh para peneliti di seluruh dunia. Keduanya, teknik elemen hingga dan beda hingga telah banyak digunakan dalam pemodelan simulasi air tanah. Hampir semua penelitian sebelumnya menganjurkan verifikasi model sebelum digunakan untuk simulasi. Selama dua dekade terakhir, banyak peneliti telah menggunakan penginderaan jauh dan sistem informasi geografis (GIS) untuk solusi masalah pengelolaan air tanah (Thakur et al, 2017). Makalah ini, menyajikan tinjauan tentang gambaran umum model simulasi air tanah, persamaan dasar yang mengatur model aliran air tanah, penggunaan penginderaan jauh dan GIS dalam pemodelan air tanah, metode optimasi yang telah digunakan untuk memecahkan masalah perencanaan dan pengelolaan air tanah, dan penerapan model simulasi di daerah kering dan semi kering.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode paper review atau studi kepustakaan, yaitu mengulas berbagai penelitian yang memiliki hubungan topik. Penelitian ini ditulis dengan mengumpulkan informasi yang memiliki hubungan dengan subjek atau pokok permasalahan yang menjadi subjek penelitian. Informasi ini dapat diperoleh dari karya-karya terkait penelitian di buku, jurnal, catatan konferensi dan tinjauan literatur untuk menulis yang relevan tentang Pengelolaan dan Optimalisasi Model Sumberdaya Air Tanah Dengan Metode Simulasi (Studi Literatur).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Garis Besar Model Simulasi Air Tanah

Penelitian tentang pengembangan dan penerapan model aliran dan transportasi air tanah telah meningkat secara signifikan selama lima dekade terakhir (Karatzas, 2017). Model simulasi air tanah dapat dibagi secara luas menjadi dua kategori yaitu aliran air tanah dan model transportasi zat terlarut (Saba et al, 2016). Model aliran air tanah menyelesaikan nilai spasial-temporal dari head hidraulik, sedangkan model transpor zat terlarut menyelesaikan nilai spasial-temporal dari konsentrasi zat terlarut. Model simulasi air tanah baik berdasarkan beda hingga atau teknik elemen hingga telah dianjurkan untuk memprediksi tingkat air tanah. Model simulasi pertama untuk mempelajari perilaku dinamis cekungan air tanah dikembangkan oleh Tyson dan Weber pada tahun 1964 menggunakan teknik beda hingga (Okocha & Atakpo, 2013). Kemudian, model ini digunakan oleh sejumlah peneliti misalnya, de Ridder dan Erez pada 1976; Tyagi pada 1986; Tyagi et al, pada 1993.

Sauerwein pada tahun 1967 juga menggunakan teknik beda hingga untuk solusi kondisi aliran dua dimensi keadaan tidak tunak. Pinder dan Cooper pada tahun 1970, Shamir dan Dagan pada tahun 1971 menganggap penampang vertikal dan menggunakan integrasi vertikal untuk mengembangkan persamaan satu dimensi, yang diselesaikan menggunakan pendekatan beda hingga. Model elemen hingga pertama menggunakan fungsi aliran dan konsentrasi sebagai variabel dependen diperkenalkan oleh Lee dan Cheng pada tahun 1974. Namun, Segol dkk, pada 1975, dan Segol dan Pinder pada tahun 1976 ialah pertama kali mengembangkan dan mendemonstrasikan aplikasi lapangan dari model alternatif menggunakan tekanan fluida, komponen kecepatan, dan konsentrasi sebagai variabel dependen. Model yang dikembangkan memiliki performa yang lebih baik dari model sebelumnya (Dey & Prakash, 2020).

Metode beda hingga dan model elemen hingga masing-masing dikembangkan dan digunakan oleh Sondhi et al. pada tahun 1989 dan Rao dan Sarma. pada tahun 199 untuk simulasi aliran air tanah di proyek irigasi kanal besar di India. Kehilangan rembesan dari jaringan kanal dan kehilangan perkolasi dari lahan pertanian diperkirakan sebagai komponen imbuhan, dalam model ini. Meskipun, secara teori, model terdistribusi diharapkan mengungguli rekan-rekan mereka yang disatukan, pada kenyataannya, ada hasil yang beragam. Beven pada 1989 dan Grayson et al. di tahun 1992 menyimpulkan bahwa model terdistribusi berbasis fisik, jika dibandingkan dengan model lumped, seringkali hanya memberikan hasil yang sedikit lebih baik. Pengamatan serupa dilakukan oleh Reed et al. pada tahun 2004, yang melaporkan hasil studi perbandingan antar yang komprehensif dari beberapa model terdistribusi berbasis fisik dan konseptual dan menyimpulkan bahwa model terdistribusi mengungguli model terdistribusi dalam banyak kasus.

Mengingat kesimpulan ini dan besarnya upaya yang diperlukan untuk membuat parameter dan memvalidasi model hidrologi terdistribusi, masuk akal untuk mempertanyakan apakah model terdistribusi dapat digunakan secara efektif dalam penaksiran. Carpenter dan Georgakis's. pada tahun 2006 mempresentasikan hasil inter komparasi model hidrologi lumped versus terdistribusi dan menyimpulkan bahwa model terdistribusi memberikan hasil yang lebih baik daripada model lumped. Mereka menerapkan model di dua daerah aliran sungai studi yang terletak di Dataran Tengah selatan AS dan menggunakan data kualitas operasional untuk menggerakkan model (Carpenter, & Georgakakos, 2006).

Model *MODFLOW* telah digunakan di seluruh dunia karena aksesibilitasnya yang mudah, keramahan pengguna dan keserbagunaannya (Raul, 2012). Palma dan Bentley pada tahun 2007 menggunakan *MODFLOW* untuk mensimulasikan aliran di akuifer Leon Chinandega yang terletak di Nikaragua. Hasil model menunjukkan bahwa pemompaan menyebabkan penurunan aliran dasar, menguras debit sungai. Model DAS berbasis pertanian SWAT dan model air tanah *MODFLOW* dengan rutinitas interaksi akuifer sungai dimodifikasi dan dihubungkan ke dalam model cekungan komprehensif yang dikenal sebagai *SWATMOD* (Quan et al., 2020). Model *SWATMOD* yang dikembangkan, yang mampu mensimulasikan interaksi air permukaan, air tanah, dan akuifer aliran, diterapkan di cekungan Rattlesnake Creek di Kansas selatan-tengah. Model dijalankan untuk periode simulasi historis 40 tahun dan periode prediksi 40 tahun. Sejumlah skenario manajemen hipotetis yang melibatkan pengurangan dan variasi dalam tingkat dan pola penarikan disimulasikan.

Kemudian, model air tanah terdistribusi penuh *MODFLOW* diintegrasikan dengan model *DAS SWAT* yang didistribusikan semu oleh Sophocleous dan Perkins pada tahun 2000 dan diterapkan di Kansas. Budge dan Sharp pada tahun 2009 menurunkan parameter akuifer dari segmen Barton Springs dari Akuifer Edwards dengan memperkenalkan parameter spasial yang bervariasi di *MODFLOW*. Mereka menggunakan algoritma yang dikembangkan untuk menyelidiki heterogenitas akuifer karst dan menyimpulkan bahwa variabilitas spasial dalam akuifer dapat disimpulkan menggunakan analisis korelasi silang. Dengan mengintegrasikan paket *Soil-Water-Atmosphere-Plant (SWAP)* dengan model aliran air tanah *MODFLOW* sedemikian rupa sehingga paket *SWAP* menghitung fluks vertikal untuk *MODFLOW*, sedangkan *MODFLOW* menyediakan kedalaman muka air rata-rata untuk menentukan kondisi batas bawah untuk zona *SWAP*. Mereka menerapkan model terintegrasi untuk mensimulasikan masalah aliran air tanah regional di Distrik Irigasi Hetao, bagian atas lembah Sungai Kuning di Cina Utara.

Hasil dari aplikasi *MODFLOW* lebih baik jika terintegrasi dengan aplikasi software lain. Hal ini terutama karena setiap perangkat lunak bekerja secara sinkron dengan yang lain untuk memecahkan banyak aspek dari masalah pengelolaan air tanah. Model numerik tradisional dengan kondisi batas tertentu mampu menggambarkan struktur kompleks akuifer termasuk prediksi rumit tingkat air tanah. Model aliran air tanah perbedaan hingga tiga dimensi kondisi tunak digunakan untuk mengukur fluks air tanah dan menganalisis hidrodinamika bawah permukaan di daerah tangkapan air Akaki dengan memberikan penekanan khusus pada bidang yang baik yang memasok air ke kota Addis Ababa, Ethiopia. Model tersebut juga dapat digunakan untuk menganalisis interaksi air tanah-air permukaan, pengaruh pemompaan pada lapangan yang baik, dan pola aliran air tanah. Model aliran dan transportasi air tanah juga telah digunakan dalam sejumlah penelitian sebelumnya oleh para peneliti di seluruh dunia (Bastani & Harter, 2020).

Persamaan Yang Mengatur Model Aliran Air Tanah

Sebuah model aliran air tanah yang khas digunakan untuk diskusi. Pertimbangkan aliran tak tunak dua dimensi (2D) dalam akuifer yang tidak homogen, isotropik dan terbatas yang persamaan dapat dinyatakan sebagai berikut (Yeh, 2015):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) = Q + S_0 \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots (1)$$

mengikuti pada kondisi awal dan batas berikut:

$$h(x, y, 0) = f_0(x, y), \quad (x, y) \in \Omega \dots\dots (2)$$

$$h(x, y, t) = f_1(x, y, t), \quad (x, y) \in \partial\Omega_1 \dots\dots (3)$$

$$T \frac{\partial h}{\partial n} = f_2(x, y, t), \quad (x, y) \in \partial\Omega_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

- Dimana:
- $h(x,y,t)$ = tinggi hidrolik
 - $T(x,y)$ = transmitivitas
 - S_0 = koefisien penyimpanan
 - Q = sink atau istilah sumber
 - t = waktu
 - x,y = variabel spasial
 - Ω = daerah aliran
 - $\partial\Omega$ = batas daerah aliran ($\partial\Omega_1 \cup \partial\Omega_2 = \partial\Omega$)
 - $\partial\Omega_1$ and $\partial\Omega_2$ = bagian dari batas
 - $\frac{\partial}{\partial n}$ = turunan normal ke batas, dan
 - f_0, f_1 and f_3 adalah fungsi yang diketahui

Berbagai metode numerik seperti metode beda hingga atau metode elemen hingga telah dikembangkan untuk memecahkan persamaan yang mengatur. Model yang banyak digunakan adalah MODFLOW dikembangkan oleh US Geological Survey (Hughes et al, 2017).

Penggunaan Penginderaan Jauh dan GIS Dalam Pemodelan Air Tanah

Pengelolaan dan pemodelan sumber daya air tanah sangat terhambat oleh kurangnya kualitas data yang baik. Masalahnya sangat serius di daerah kering dan semi kering di mana infrastruktur pengamatan lemah (Hamlat & Guidoum, 2018). Model air tanah regional memerlukan data input terdistribusi, sedangkan pengukuran hidrologi tipikal hanya menyediakan data titik. Dengan tidak adanya data ekstensif yang diperlukan, model-model ini tidak dapat digunakan sebagai alat pendukung keputusan yang andal karena output yang terlalu rendah/melebihi-lebihkan. Sumber-sumber baru untuk input data spasial telah muncul dengan perkembangan terkini dalam penginderaan jauh dan GIS (Steiniger & Hunter, 2013).

Sebuah tinjauan rinci dari aplikasi penginderaan jauh dalam pemodelan air tanah disediakan oleh Brunner et al. (2007). Tinjauan tersebut juga memberikan contoh penggunaannya di Botswana dan Cina. Aspek yang berbeda mengenai penggunaan teknik penginderaan jauh dalam pengelolaan sumber daya air. Sebelumnya, telah disajikan tinjauan penggunaan GIS dalam sumber daya air. Model aliran air tanah adalah alat yang tepat untuk menilai pengaruh aktivitas manusia di masa mendatang terhadap dinamika air tanah. Namun, model memerlukan data berkualitas baik pada pengaturan fisik dan hidrogeologi. Yang fisik mengacu pada topografi, penggunaan lahan, tanah, kanal dan parit drainase, iklim dan kebutuhan tanaman akan air (Xu et al., 2011).

Pengaturan hidrogeologi meliputi sistem akuifer dan kondisi batas, parameter hidraulik utama yang mencirikan setiap lapisan akuifer, dan dinamika tingkat air tanah. Semuanya bervariasi baik dalam ruang dan waktu, sehingga mengadopsi GIS dalam kaitannya dengan model sangat membantu. Menggabungkan teknologi GIS dengan model air tanah berbasis proses dapat memfasilitasi konseptualisasi dan karakterisasi sistem hidrogeologi dan hidrologi, dengan demikian juga merupakan adaptasi yang tepat dari model aliran air tanah ke daerah di bawahnya. studi. Berbagai contoh mengkonfirmasi kesesuaian aplikasi GIS dalam hidrologi air tanah. Kalibrasi model air tanah diperlukan untuk mencapai kecocokan yang erat antara variabel keadaan yang diamati dan yang disimulasikan. Metode trial and error biasanya digunakan untuk menyesuaikan parameter sensitif model selama kalibrasi. Namun, menyesuaikan terlalu banyak parameter selama kalibrasi

akan menghasilkan model air tanah dengan parameter berlebih, yang akan memiliki nilai prediksi yang sangat kecil, model yang menggunakan *GIS* untuk memprediksi pengurangan relatif dalam hasil panen karena genangan air dan salinitas pada skala lapangan dengan memasukkan variabel spasial dan temporal data tanaman, iklim, dan irigasi untuk mensimulasikan hasil panen. Model ini menggunakan data tanah dan air yang biasanya dikumpulkan dalam studi skala lapangan.

Potensi teknik *GIS* dalam pemodelan numerik untuk sumber daya air tanah dengan menggabungkan perangkat lunak *GIS ARCVIEW* dengan model air tanah *MODFLOW* dan menggunakannya di cekungan Maknassy di Tunisia tengah (Ghouili et al., 2017). Studi serupa tentang aplikasi *GIS-MODFLOW* dalam pemodelan air tanah juga dilakukan untuk pemetaan resapan air tanah. Mengembangkan sistem pemodelan berbasis *GIS ArcPRZM-3*, yang dapat digunakan untuk simulasi tunggal spesifik lokasi atau simulasi beberapa sinkronisasi regional yang memerlukan data terdistribusi spasial. Model tersebut diterapkan di Woodruff County, Arkansas, AS untuk mengembangkan peta risiko kesehatan, yang didasarkan pada konsentrasi bentazon terlarut dalam tanah. Penggabungan model simulasi pengelolaan sumber daya air (*MIKE-Basin*) dan model air tanah finite-difference (*ASM*). Modul *GIS GRASS* dibuat untuk mengatasi masalah kepemilikan perangkat lunak *GIS* umum. *GRASS* diintegrasikan dengan model aliran air tanah beda hingga *MODFLOW* (Carrera & Gaskin, 2006).

Hasilnya menunjukkan bahwa model terintegrasi dapat digunakan untuk memecahkan masalah aliran air tanah skala besar. Dengan demikian, modul *GRASS* menyediakan alat untuk pemodelan aliran air tanah bagi pengguna yang tidak mampu membeli perangkat lunak yang tersedia secara komersial. Pada penelitian Mimoun (2011) mengembangkan metodologi dengan menggabungkan *MODFLOW* dan *GIS*. Metodologi yang dikembangkan diterapkan pada sub-cekungan Sungai Banganga, India untuk menggambarkan zona potensi air tanah. Mereka menyimpulkan bahwa model yang dikembangkan sangat membantu untuk evaluasi sumber daya air tanah dan untuk menentukan lokasi struktur pemanenan air hujan di daerah semi kering. *SIG* digunakan untuk pra proses data atau untuk membuat peta data masukan atau hasil model. Pendekatan ini diadopsi oleh sebagian besar aplikasi masa lalu karena memungkinkan penggunaan model fisik yang ada dengan sedikit atau tanpa modifikasi pada perangkat lunak. Menggunakan teknik *GIS* untuk mengidentifikasi semua kemungkinan kombinasi jenis tanah dan vegetasi yang digunakan untuk memperkirakan distribusi areal imbuhan alami untuk model aliran dan transportasi air tanah.

Metode Optimalisasi

Dalam pemodelan dan pengelolaan air tanah, setelah fungsi tujuan dan kendala dirumuskan, sebagian besar dari masalah untuk teknik solusi dikembangkan dalam bidang riset operasi (Gorelick & Zheng, 2015). Teknik pemrograman matematika meliputi pemrograman linier (*LP*), pemrograman kuadrat (*QP*), pemrograman dinamis (*DP*), pemrograman stokastik, dan pemrograman non linier (*NLP*) (Singh, 2014). Jika variabel integer yang terlibat, masalah dapat diselesaikan dengan program linier campuran-integer (*MILP*) atau pemrograman non linier campuran-integer (*MINLP*) (Lee & Leyffer, 2011). Jika masalah Optimasi yang dirumuskan adalah convex, teknik pemrograman matematika seperti *LP* dan *NLP*, menghasilkan optima global. Pemecah dengan antarmuka yang mudah digunakan tersedia seperti Sistem Pemodelan Aljabar Umum (*GAMS*) dan *LINGO* (*Lindo Systems Inc*) (Mousavi, 2014). *GAMS* adalah sistem pemodelan tingkat tinggi untuk pemrograman dan Optimasi matematika. Ini terdiri dari kompiler bahasa dan

rangkaian pemecah kinerja tinggi terintegrasi. *GAMS* disesuaikan untuk aplikasi pemodelan skala besar yang kompleks. Jenis model *GAMS* termasuk *LP*, *MIP* (pemrograman integer campuran), *MINLP*, dan berbagai bentuk *NLP*. *LINGO* adalah alat komprehensif yang dirancang untuk membangun dan menyelesaikan model Optimasi linier, nonlinear (cembung dan non-cembung), kuadrat, dibatasi kuadrat, kerucut orde kedua, stokastik, dan bilangan bulat. Selama dua dekade terakhir, telah terjadi peningkatan yang signifikan dalam pengembangan dan penerapan algoritma evolusioner untuk memecahkan berbagai masalah perencanaan dan pengelolaan sumber daya air.

Algoritma genetik telah digunakan dalam pengelolaan aliran air tanah, desain pemantauan air tanah, dan identifikasi parameter. Simulasi annealing and tab telah digunakan dalam identifikasi struktur parameter. Deb et al (2002) mengembangkan algoritma genetika penyortiran yang tidak didominasi (*NSGA-II*) untuk Optimasi multi objektif. Algoritma pencarian global lainnya termasuk "ant colony", "particle swarm", and "honey bees mating". Keuntungan utama menggunakan algoritma ini adalah bahwa mereka dapat menangani fungsi *non-diferensiabel* dan diskontinu serta variabel integer tetapi dengan mengorbankan sejumlah besar panggilan model. Ketika berhadapan dengan model komputasi yang tinggi, persyaratan komputasi mungkin berlebihan dan mahal. Ada kecenderungan untuk menggabungkan algoritma pencarian global dengan pengoptimalan lokal berbasis gradien. Ada dua cara untuk melakukan ini.

Dalam pendekatan global-lokal *sekuensial*, algoritma pencarian global, seperti *GA* diimplementasikan untuk memberikan solusi hampir global, yang kemudian digunakan sebagai perkiraan awal untuk pengoptimalan lokal berbasis gradien. Menggunakan *GA* dengan beberapa nilai awal meningkatkan kemungkinan menemukan optimal global. Dalam pendekatan global-lokal tertanam, pengoptimalan lokal berbasis gradien disematkan dalam algoritma pencarian global. *GA* digunakan untuk mencari variabel yang rumit. Variabel-variabel ini biasanya berupa bilangan bulat yang sangat sulit untuk di Optimasi dibandingkan dengan variabel kontinu dalam pemrograman matematika. Untuk variabel rumit tetap, pengoptimalan lokal berbasis gradien digunakan untuk mengoptimalkan variabel kontinu. Iterasi diperlukan antara pencarian global dan pengoptimalan lokal untuk konvergensi. Penerapan berbagai metode Optimasi yang digunakan di bidang invers masalah identifikasi parameter, desain eksperimen, dan pengelolaan air tanah.

Invers Problem dari identifikasi parameter

Masalah invers dari identifikasi parameter adalah area penting penelitian dalam pemodelan air tanah. Beberapa peneliti memberikan review dan evaluasi dari berbagai metode yang digunakan untuk memecahkan masalah invers. Ada yang menguraikan persyaratan dan manfaat pemodelan terbalik dan membahas bagaimana atribut ini berlaku untuk masalah lapangan. Untuk tujuan ilustrasi, diasumsikan bahwa koefisien penyimpanan, S_0 , diketahui dan parameter yang akan diidentifikasi adalah transmitivitas terdistribusi spasial, $T(x,y)$. Untuk memastikan solusi yang stabil dan unik dari masalah invers, dimensi $T(x,y)$ harus direduksi dengan tepat. Pengurangan dimensi parameter dicapai dengan parametrisasi. Secara umum, ada tiga cara, yang kemudian diuraikan, untuk mencapai parametrisasi:

a. Metode zonasi

Dalam metode ini, akuifer dibagi menjadi beberapa zona dan nilai parameter konstan digunakan untuk mengkarakterisasikan setiap zona. Distribusi spasial dari transmitivitas kemudian diwakili oleh sejumlah konstanta yang terbatas (nilai

transmitivitas zona). Oleh karena itu, dimensi parametrisasi (parameter dimension) diwakili oleh jumlah zona.

b. Metode interpolasi

Dalam metode ini, $T(x,y)$ didekati dengan fungsi interpolasi. Misalnya, jika elemen hingga digunakan sebagai fungsi interpolasi, daerah aliran akuifer dibagi menjadi beberapa elemen yang dihubungkan oleh node. $T(x,y)$ kemudian didekati dengan kombinasi linear dari fungsi basis. Masalah invers kemudian berusaha mengidentifikasi nilai transmitivitas nodal. Skema interpolasi lainnya termasuk spline, polinomial dan kriging. Metode titik percontohan telah digunakan dalam *geostatistik* untuk interpolasi parameter. Dalam metode ini, $T(x,y)$ *dikriged* menggunakan titik sampel bersama dengan satu set titik pilot yang nilainya ditentukan dengan prosedur inverse.

c. Kombinasi zonasi dan interpolasi

Peneliti mengusulkan *parameterisasi* umum (GP) yang menggabungkan zonasi dan interpolasi. GP adalah skema berbasis interpolasi yang mencakup zonasi. Ini menciptakan distribusi dengan satu set basis poin dan memiliki kemampuan untuk menggabungkan spektrum yang luas dari skema interpolasi. Dalam analisis sebelumnya, pendekatan *deterministik* telah digunakan, yang populer di kalangan praktisi air tanah, untuk mewakili heterogenitas akuifer. Dalam kasus medan acak, konduktivitas hidrolik (K) dapat dianggap log terdistribusi normal. Jika seseorang mengasumsikan $\log K$ menjadi stasioner orde kedua dengan *kovarians eksponensial isotropik*, bidang $\log K$ dapat sepenuhnya *diparameterisasi* oleh tiga parameter statistik yang mendasarinya: mean (μ), varians (σ^2) dan skala korelasi (I).

Penerapan Model Simulasi

Air dan garam adalah elemen kunci yang menentukan keberlanjutan pertanian beririgasi di ekosistem kering dan semi kering. Oleh karena itu, studi keseimbangan air dan garam telah dilakukan di berbagai stasiun penelitian di seluruh dunia (Li et al, 2021). Di daerah kering dan semi kering, penyediaan irigasi sangat penting untuk meningkatkan produksi tanaman. Namun, tanpa pengelolaan yang tepat, pertanian beririgasi dapat merusak lingkungan dan membahayakan kelestariannya (Assouline et al., 2015). Misalnya, selama empat dekade terakhir, sebagian besar daerah irigasi kanal di Negara Bagian Haryana (India) menghadapi kenaikan permukaan air tanah, dan masalah seperti genangan air dan salinisasi tanah muncul (Singh et al., 2010). Model simulasi air tanah dikembangkan dan diterapkan untuk pengelolaan lahan salin yang tergenang air oleh banyak peneliti di seluruh dunia (Singh & Panda., 2013).

Hampir di semua studi sebelumnya, pengurangan resapan dan/atau langkah-langkah peningkatan keilmuan direkomendasikan untuk memerangi masalah genangan air dan salinisasi terkait. Beberapa peneliti menggunakan model aliran tak jenuh satu dimensi untuk mensimulasikan pengelolaan air dalam kondisi *terdrainase* dan tak *terdrainase* (Lo et al., 2016). Sementara yang lain menggunakan model simulasi air tanah untuk memprediksi perilaku dinamis dari muka air tanah dalam menanggapi pemompaan air tanah dan pengisian bersih (Omran, 2016). Model pengelolaan air irigasi terdistribusi *FRAME*, yang merupakan kombinasi dari model aliran tak jenuh *SIWARE* dan model simulasi air tanah *SGMP* digunakan untuk studi simulasi (Jhorar et al., 2009). Model *FRAME* diterapkan pada skala regional di *Sirsa Irrigation Circle* di bagian barat laut Haryana, India, yang menghadapi masalah genangan air dan salinitas yang serius di daerah yang di bawah air asin

yang diairi oleh jaringan kanal. Disimpulkan bahwa model *FRAME* dapat digunakan untuk mempelajari dampak perubahan kebijakan terhadap perilaku air tanah di masa depan, yang merupakan manfaat utama dari model tersebut.

Babajimopoulos dkk pada 2007 menerapkan model matematika *SWBACROS* untuk memperkirakan kontribusi air tanah dangkal terhadap kebutuhan air tanaman jagung. Pengelolaan genangan air dan salinisasi sekunder menimbulkan keprihatinan universal karena implikasinya terhadap ketahanan pangan dan konservasi lingkungan (Singh, 2018). Model hidrologi *deterministik* skala lapangan *DRAINMOD* untuk mensimulasikan aliran air tanah di bawah kondisi muka air tanah yang dangkal dan mereka menemukan bahwa model tersebut cukup berguna untuk mengendalikan kenaikan muka air tanah dan masalah salinitas air tanah.

Beberapa model digunakan untuk mensimulasikan keseimbangan garam dan air dari sistem jenuh dan tidak jenuh (Zhu et al., 2012). Eishoei et al (2019) menggunakan model *SaltMod* di sisi barat Danau hipersalin Urmia, Iran untuk pemodelan salinitas tanah temporal. Aplikasi *SaltMod* telah digunakan sebelumnya, dalam semua penelitian sebelumnya, *SaltMod* diterapkan di area di mana sistem drainase bawah permukaan dipasang (Yao et al., 2014). Model *SGMP* digunakan untuk analisis neraca analisis neraca air tanah di berbagai daerah (Singh, 2013). Dampak perubahan kebijakan potensial pada sumber daya air tanah belum dipelajari dalam aplikasi *SGMP*. Persepsi konvensional menyatakan bahwa solusi terbaik untuk menghadapi ancaman genangan air dan salinitas adalah dengan menjaga aliran garam bersih dari zona akar dan untuk mengontrol permukaan air.

Sebuah model simulasi *SUTRA* digunakan untuk mengatasi masalah genangan air dan salinisasi (Kori et al., 2013). Dua pendekatan untuk mengurangi resapan bersih ke air tanah asin dangkal dari area yang ditanami dengan menggunakan model pengelolaan tanah, air dan air tanah, *SWAGMAN*. Pendekatan pertama menerapkan konsep menanam tanaman yang berakar dalam (tanaman yang mengkonsumsi air dari tanah dan permukaan air yang dangkal) di atas area yang setara dengan pengisian ulang dari satu unit area tanaman untuk menjaga keseimbangan air total. Pendekatan kedua melibatkan pencapaian keseimbangan air pertanian secara keseluruhan untuk kondisi iklim rata-rata dan basah untuk mengetahui pola tanam yang optimal untuk meminimalkan pengisian ulang dari lahan yang ditanami.

Model *SIMGRO* digunakan untuk simulasi aliran air secara terintegrasi pada semua penelitian sebelumnya tanpa mempertimbangkan dampak perubahan iklim. Namun, penelitian dari Querner et al (2012) menggunakan model ini untuk mensimulasikan skenario masa depan yang berbeda dengan mempertimbangkan dampak skenario iklim. Kuantifikasi akurat dari neraca air dan redistribusi air dalam tanah sangat diperlukan untuk simulasi transportasi zat terlarut yang tepat dan untuk pengelolaan pertumbuhan tanaman dan irigasi. Beberapa model tersedia untuk memenuhi tujuan tersebut (misalnya, *SWAP*, *CropSyst*, *Hydrus*, *RZWQM*, dan *MAKRO*). Terlepas dari kesamaan dasar representasi aliran air di zona tak jenuh, model hidrologi yang tampaknya serupa memberikan hasil yang berbeda ketika diterapkan dalam skenario ekologi, iklim, dan agronomi yang sama (Bonfante et al., 2010).

KESIMPULAN

Model simulasi pertama untuk mempelajari perilaku dinamis air tanah diterapkan sekitar lima dekade yang lalu dan menggunakan teknik beda hingga. Kemudian teknik elemen hingga juga telah digunakan dalam pemodelan air tanah bersama dengan teknik beda hingga. Teknik lain yang

digunakan dalam pemodelan air tanah meliputi teknik elemen hingga dengan pendekatan antarmuka difusi. Model simulasi aliran air tanah yang canggih telah digunakan oleh para peneliti untuk memecahkan masalah yang relatif kompleks dalam pengelolaan air tanah, irigasi, dan drainase.

Beberapa peneliti merekomendasikan penggunaan beberapa model untuk mengatasi keterbatasan model tertentu. *GIS* dan teknik penginderaan jauh sangat berguna dalam akuisisi data terdistribusi spasial untuk pemodelan air tanah. Dengan menafsirkan penginderaan jauh, kita bisa mendapatkan data yang lengkap secara spasial meskipun data verifikasi tidak tepat berbeda dengan jumlah terbatas tradisional dari data titik yang lebih tepat. Penerapan penginderaan jauh dengan metode tradisional memberikan potensi yang sangat besar dalam meningkatkan kualitas pekerjaan pemodelan. Teknik penginderaan jauh dan *GIS* sangat berguna di negara-negara berkembang dengan infrastruktur yang lemah dan kelangkaan data dan di mana ada masalah utama sumber daya air. Makalah tinjauan ini menjelaskan pendekatan untuk aplikasi pemodelan simulasi pengelolaan sumber daya air tanah. Tersedia paket perangkat lunak dengan antarmuka pengguna yang ramah. Hal ini memudahkan para praktisi untuk menerapkan Optimasi untuk kalibrasi model dan pengelolaan air tanah.

Cara yang efektif untuk menghubungkan simulasi dengan optimasi adalah dengan menghasilkan matriks respon. Matriks respons dengan dimensi yang jauh lebih kecil dapat langsung dimasukkan ke dalam kumpulan kendala dalam model optimasi. Pendekatan matriks respon didasarkan pada *linearisasi* dan superposisi. Dengan peningkatan drastis dalam daya komputasi selama dua dekade terakhir, algoritme pencarian global seperti algoritme genetika, telah mendapatkan popularitas. Keuntungan utama menggunakan GA adalah dapat menangani fungsi diskontinu dan *non-diferensiabel*.

Namun, kelemahannya adalah GA membutuhkan sejumlah besar model call agar konvergensi terjadi. Untuk model simulasi komputasi yang tinggi, pendekatan ini mungkin menjadi tidak layak. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi komputasi adalah dengan menggabungkan GA dengan pengoptimalan berbasis gradien. Diharapkan kekurangan pada paper review ini dapat diisi dengan kontribusi selanjutnya dan dapat menghasilkan diskusi lebih lanjut tentang subjek yang tercakup dalam paper review ini.

REFERENSI

- Assouline, S., Russo, D., Silber, A., & Or, D. (2015). Balancing water scarcity and quality for sustainable irrigated agriculture. *Water Resources Research*, 51(5), 3419-3436.
- Babajimopoulos, C., Panoras, A., Georgoussis, H., Arampatzis, G., Hatzigiannakis, E., & Papamichail, D. (2007). Contribution to irrigation from shallow water table under field conditions. *Agricultural Water Management*, 92(3), 205-210.
- Bastani, M., & Harter, T. (2020). Effects of upscaling temporal resolution of groundwater flow and transport boundary conditions on the performance of nitrate-transport models at the regional management scale. *Hydrogeology Journal*, 28(4).
- Bonfante, A., Basile, A., Acutis, M., De Mascellis, R., Manna, P., Perego, A., & Terribile, F. (2010). SWAP, CropSyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in Northern Italy. *Agricultural Water Management*, 97(7), 1051-1062.
- Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the world water development report. *NPJ Clean Water*, 2(1), 1-6.

- Brunner, P., Franssen, H. J. H., Kgotlhang, L., Bauer-Gottwein, P., & Kinzelbach, W. (2007). How can remote sensing contribute in groundwater modeling?. *Hydrogeology journal*, 15(1), 5-18.
- Carpenter, T. M., & Georgakakos, K. P. (2006). Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. *Journal of hydrology*, 329(1-2), 174-185.
- Carrera-Hernandez, J. J., & Gaskin, S. J. (2006). The groundwater modeling tool for GRASS (GMTG): open source groundwater flow modeling. *Computers & Geosciences*, 32(3), 339-351.
- Dey, S., & Prakash, O. (2020). Management of saltwater intrusion in coastal aquifers: an overview of recent advances. *Environmental Processes and Management*, 321-344.
- Eishoei, E., Nazarnejad, H., & Miryaghoubzadeh, M. (2019). Temporal soil salinity modeling using SaltMod model in the west side of Urmia hyper saline Lake, Iran. *Catena*, 176, 306-314.
- Fienen, M. N., & Arshad, M. (2016). The international scale of the groundwater issue. In *Integrated groundwater management* (pp. 21-48). Springer, Cham.
- Foster, S., & Garduño, H. (2013). Groundwater-resource governance: are governments and stakeholders responding to the challenge?. *Hydrogeology Journal*, 21(2), 317-320.
- Ghouili, N., Horriche, F. J., Zammouri, M., Benabdallah, S., & Farhat, B. (2017). Coupling WetSpa and MODFLOW for groundwater recharge assessment: case study of the Takelsa multilayer aquifer, northeastern Tunisia. *Geosciences Journal*, 21(5), 791-805.
- Gorelick, S. M., & Zheng, C. (2015). Global change and the groundwater management challenge. *Water Resources Research*, 51(5), 3031-3051.
- Hamlat, A., & Guidoum, A. (2018). Assessment of groundwater quality in a semiarid region of Northwestern Algeria using water quality index (WQI). *Applied Water Science*, 8(8), 1-13.
- Hughes, J. D., Langevin, C. D., & Banta, E. R. (2017). *Documentation for the MODFLOW 6 framework* (No. 6-A57). US Geological Survey.
- Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J. D., Ross, A., Arshad, M., & Hamilton, S. (2016). Integrated groundwater management: an overview of concepts and challenges. *Integrated groundwater management*, 3-20.
- Janža, M. (2015). A decision support system for emergency response to groundwater resource pollution in an urban area (Ljubljana, Slovenia). *Environmental Earth Sciences*, 73(7), 3763-3774.
- Jhorar, R. K., Smit, A. A. M. F. R., & Roest, C. W. J. (2009). Assessment of alternative water management options for irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, 96(6), 975-981.
- Jia, X., Hou, D., Wang, L., O'Connor, D., & Luo, J. (2020). The development of groundwater research in the past 40 years: A burgeoning trend in groundwater depletion and sustainable management. *Journal of Hydrology*, 587, 125006.
- Karatzas, G. P. (2017). Developments on modeling of groundwater flow and contaminant transport. *Water Resources Management*, 31(10), 3235-3244.
- Kori, S. M., Qureshi, A. L., Lashari, B. K., & Memon, N. A. (2013). Optimum strategies of groundwater pumping regime under scavenger tubewells in lower Indus Basin, Sindh, Pakistan. *International Water Technology Journal*, 3(3), 138-145.
- Lee, J., & Leyffer, S. (Eds.). (2011). *Mixed integer nonlinear programming* (Vol. 154). Springer Science & Business Media.

- Li, S., Wu, M., Jia, Z., Luo, W., Fei, L., & Li, J. (2021). Study on drainage strategy of ditch wetland in semi-arid area under the influence of inflow from the upstream irrigation area. *Agricultural Water Management*, 248, 106792.
- Lo, W. C., Sposito, G., Lee, J. W., & Chu, H. (2016). One-dimensional consolidation in unsaturated soils under cyclic loading. *Advances in Water Resources*, 91, 122-137.
- Malenica, L., Gotovac, H., Kamber, G., Simunovic, S., Allu, S., & Divic, V. (2018). Groundwater flow modeling in karst aquifers: Coupling 3d matrix and 1d conduit flow via control volume isogeometric analysis—experimental verification with a 3d physical model. *Water*, 10(12), 1787.
- Mays, L. W. (2013). Groundwater resources sustainability: past, present, and future. *Water Resources Management*, 27(13), 4409-4424.
- Mimoun, D., Gaur, S., & Graillet, D. (2011). Integrated Hydrologic Modeling: Biodiversity and Functions of Alluvial System Facing Severe Droughts Induced by Global Change. In *Conference MODFLOW and More*.
- Mousavi, J. (2014). *Water Resource Systems Analysis and Management*-Amirkabir University of Technology.
- Okocha, F. O., & Atakpo, E. (2013). Groundwater flow modeling at the source of river Ethiopie, Delta state, Nigeria. *Pacific Journal of Science and Technology*, 14(2), 594-600.
- Omran, E. S. E. (2016). A stochastic simulation model to early predict susceptible areas to water table level fluctuations in North Sinai, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 19(2), 235-257.
- Quan, T. Q., Meert, P., Huysmans, M., & Willems, P. (2020). On the importance of river hydrodynamics in simulating groundwater levels and baseflows. *Hydrological Processes*, 34(8), 1754-1767.
- Querner EP, Jansen PC, van den Akker JJH, Kwakernaak C. (2012). Analysing water level strategies to reduce soil subsidence in Dutch peat meadows. *J Hydrol*;446–447:59–69.
- Raul, S. K. (2012). *Simulation-optimization modelling for integrated land and water resources management in the Hirakud canal command* (Doctoral dissertation, IIT Kharagpur).
- Saba, N., Umar, R., & Ahmed, S. (2016). Assessment of groundwater quality of major industrial city of Central Ganga plain, Western Uttar Pradesh, India through mass transport modeling using chloride as contaminant. *Groundwater for Sustainable Development*, 2, 154-168.
- Singh, A. (2013). Groundwater modelling for the assessment of water management alternatives. *Journal of Hydrology*, 481, 220-229.
- Singh, A. (2014). Irrigation planning and management through optimization modelling. *Water resources management*, 28(1), 1-14.
- Singh, A. (2016). Hydrological problems of water resources in irrigated agriculture: A management perspective. *Journal of Hydrology*, 541, 1430-1440.
- Singh, A. (2018). Alternative management options for irrigation-induced salinization and waterlogging under different climatic conditions. *Ecological Indicators*, 90, 184-192.
- Singh, A., & Panda, S. N. (2013). Optimization and simulation modelling for managing the problems of water resources. *Water resources management*, 27(9), 3421-3431.

- Singh, A., Krause, P., Panda, S. N., & Flugel, W. A. (2010). Rising water table: A threat to sustainable agriculture in an irrigated semi-arid region of Haryana, India. *Agricultural Water Management*, 97(10), 1443-1451.
- Steiniger, S., & Hunter, A. J. (2013). The 2012 free and open source GIS software map—A guide to facilitate research, development, and adoption. *Computers, environment and urban systems*, 39, 136-150.
- Thakur, J. K., Singh, S. K., & Ekanthalu, V. S. (2017). Integrating remote sensing, geographic information systems and global positioning system techniques with hydrological modeling. *Applied Water Science*, 7(4), 1595-1608.
- Xu, X., Huang, G., Zhan, H., Qu, Z., & Huang, Q. (2012). Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas. *Journal of Hydrology*, 412, 170-181.
- Yan, S., & Minsker, B. (2011). Applying dynamic surrogate models in noisy genetic algorithms to optimize groundwater remediation designs. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(3), 284-292.
- Yao, R. J., Yang, J. S., Zhang, T. J., Hong, L. Z., Wang, M. W., Yu, S. P., & Wang, X. P. (2014). Studies on soil water and salt balances and scenarios simulation using SaltMod in a coastal reclaimed farming area of eastern China. *Agricultural Water Management*, 131, 115-123.
- Yazdan, M. M., Ahad, M. T., Jahan, I., & Mazumder, M. (2020). Review on the evaluation of the impacts of wastewater disposal in hydraulic fracturing industry in the United States. *Technologies*, 8(4), 67.
- Yeh, W. W. (2015). Optimization methods for groundwater modeling and management. *Hydrogeology Journal*, 23(6), 1051-1065.
- Zhu, Y., Shi, L., Lin, L., Yang, J., & Ye, M. (2012). A fully coupled numerical modeling for regional unsaturated–saturated water flow. *Journal of hydrology*, 475, 188-203.