

PENILAIAN DAN PERHITUNGAN IMBUHAN AIR TANAH ALAMI PADA CEKUNGAN AIR TANAH UMBULAN

Heni Rengganis¹⁾ dan Irma Kusumawati²⁾

^{1,2)} Pusat Litbang Sumber Daya Air, Jl.Ir.H. Juanda No 193 Bandung

¹ Email: henirengganis@yahoo.com

Diterima: Maret 2011; Disetujui: 2011

ABSTRAK

Indikasi perubahan penggunaan lahan di wilayah CAT Umbulan dan sekitarnya, telah terdeteksi beberapa tahun belakangan ini. Makin padatnya areal terbangun di pusat kota dan juga maraknya pertanian rakyat di bagian perbukitan sampai ke arah lereng Pegunungan Tengger, menyebabkan sering terjadinya banjir pada musim hujan yang beberapa tahun sebelumnya tidak pernah terjadi. Berkaitan dengan rencana pemanfaatan mata air Umbulan yang berada di wilayah penelitian untuk penyediaan air bersih di beberapa kota dan kabupaten di Jawa Timur, maka telah dilakukan perhitungan imbuhan yang diperkirakan akan mempengaruhi debit mata air tersebut. Perhitungan dilakukan dengan analisis menggunakan model simulasi hujan-limpasan model NAM, yang merupakan bagian dari sistem pemodelan MIKE 11. Hasil perhitungan proses simulasi model NAM di CAT Umbulan memberikan angka imbuhan air tanah pada DAS Rejoso sebesar 633 mm, DAS Petung 568,7 mm dan DAS Gembong 655,8 mm. Selanjutnya, semua hasil analisis yang diperoleh bisa digunakan dalam pemodelan kondisi air tanah, dan hasil akhir dari kegiatan ini bisa digunakan untuk memberikan masukan dan usulan pengelolaan dan pengembangan air tanah yang berkaitan dengan pengaturan tata ruang daerah.

Kata kunci: imbuhan, air tanah, daerah aliran sungai, cekungan air tanah, mata air

ABSTRACT

Indication of land use changes in Umbulan groundwater basin and its surroundings, was detected a few years ago. Floods occurred in recent years due to densely population urban areas and communities based on farming in the hilly area on Tengger mountain slope. Related with the proposed utilization of Umbulan spring for clean water supply for some cities and districts in East Java, calculation was carried out to estimate the groundwater recharge. The calculation was done by using NAM rainfall runoff simulation model as part of the MIKE 11 model system. The calculation results of NAM simulation model process of some catchments of groundwater recharge rate within the Umbulan groundwater basin are: Rejoso catchment, 633 mm, Petung catchment, 568.7 mm, and Gembong catchment, 655.8 mm. All of the analysis results can be used in the calculation of water availability potency in a groundwater basin, and the final results then are used for input and proposal of groundwater management and development related to regional spatial planning.

Keywords: recharge, groundwater, catchment area, groundwater basin, springs

PENDAHULUAN

Daerah imbuhan air tanah mempunyai karakteristik hidrogeologi tertentu yang berfungsi sebagai daerah resapan alamiah, perlu dipelihara dan dilestarikan keberadaannya, karena merupakan daerah pengisian air tanah pada suatu cekungan air tanah. Perubahan penggunaan lahan di daerah imbuhan sangat berpengaruh terhadap besaran imbuhan air tanah yang akhirnya berpengaruh pula terhadap kesinambungan fungsi imbuhan air tanah di daerah tersebut.

Secara sederhana proses imbuhan adalah masuknya air pada zone jenuh atau bisa diartikan pula sebagai pengisian kembali air ke dalam suatu lapisan akuifer pada suatu cekungan air tanah,

yang menyebabkan naiknya muka air tanah. Imbuhan terjadi dari atas, air berinfiltrasi dan mengalir ke bawah. Imbuhan dapat juga terjadi sebagai aliran lateral dari danau atau sungai yang sebagian mengalir melalui zone jenuh. Pada beberapa kejadian imbuhan dapat menyumbang aliran air tanah dalam akuifer terkekang.

Di daerah perkotaan di Indonesia, pada umumnya telah banyak ditemukan permukaan yang kedap seperti tanah yang tertutup oleh atap, semen, jalan aspal yang semuanya dengan sengaja dibangun, sehingga menjadi jauh lebih kedap dari pada kondisi permukaan tanah yang asli. Kondisi ini kemudian akan menyebabkan aliran permukaan bertambah dan kejadian ini dapat mengakibatkan bahaya banjir, dan peningkatan

bahaya longsor serta sedimentasi. Sejumlah upaya telah banyak dilakukan untuk mengembalikan lagi aliran, melalui permukaan porous dan mengalirkan aliran air dari atap ke dalam tanah, yang disebut dengan imbuhan air tanah buatan (*groundwater artificial recharge*). Sampai saat ini, implementasi upaya-upaya ini telah banyak dilakukan di sebagian kota-kota besar di Indonesia, tetapi masih belum bisa kembali ke kondisi semula.

Jumlah imbuhan air ke dalam lapisan tanah belum bisa diperoleh secara langsung dari hasil pengukuran di lapangan. Pada pengukuran imbuhan secara langsung sering terjadi kesalahan, oleh karena itu masih banyak ketidak pastian dalam memperkirakan besar imbuhan. Pada beberapa penelitian terdahulu, penentuan kecepatan imbuhan dari hasil pengukuran, sedikitnya satu parameter tertentu yang dapat digunakan; selanjutnya parameter ini dapat dipakai untuk penentuan dan perhitungan imbuhan dalam suatu cekungan air tanah. Besar imbuhan ini tergantung dan berkaitan dengan ketersediaan air, yang sangat tergantung pada pengaruh dari masukan dalam bentuk curah hujan dan kehilangan air kembali ke atmosfer akibat dari evaporasi dan transpirasi.

Perhitungan imbuhan air tanah yang akan dilakukan, adalah untuk mengetahui perkiraan secara kuantitatif tentang jumlah imbuhan ke dalam suatu akuifer di suatu cekungan. Perhitungan ini sering menemui berbagai kesulitan sehubungan dengan faktor-faktor yang terkait, seperti kondisi hidrometeorologi dan sifat fisik tanah serta karakteristik hidrauliknya. Beberapa parameter yang berpengaruh terhadap resapan air ke dalam tanah yaitu kelulusan air pada batuan, curah hujan, tanah penutup, kemiringan lereng, dan letak muka air tanah dalam akuifer tidak terkekang.

Penilaian dan perhitungan jumlah imbuhan air tanah dapat dilakukan dengan berbagai metode. Pemilihan dan penentuan metode perhitungan ini berkaitan dengan kondisi ketersediaan data yang akan digunakan, karena metode analisis untuk penilaian dan perhitungan imbuhan air tanah ini, akan ditemui banyak kendala. Oleh karena itu dianjurkan agar dicoba sebanyak mungkin cara yang digunakan dalam penelitian, sehingga hasil setiap cara dapat dibandingkan dengan cara yang lain. Metode yang telah tersedia untuk menilai dan menghitung besaran imbuhan air tanah secara langsung adalah dari data hujan dan model NAM.

Pemilihan dari metode perlu juga berpedoman kepada tersedianya data dan berbagai kemungkinan untuk mendapatkan data pengganti.

Cara termudah dalam menghitung luas daerah imbuhan yang berkaitan dengan debit mata air yakni dengan menggunakan grafik dengan metode Todd (grafik hubungan antara luas daerah imbuhan, imbuhan rata-rata tahunan dan debit mata air). Pada tulisan ini penentuan imbuhan air tanah adalah dengan menggunakan *model simulasi hujan limpasan* model NAM yang merupakan bagian dari sistem pemodelan MIKE 11.

Penentuan imbuhan air tanah di CAT Umbulan ini sangat penting untuk perencanaan pemanfaatan mata air Umbulan, untuk air bersih penduduk kota dan kabupaten Surabaya, Sidoarjo, Gresik dan Pasuruan. Perencanaan tata ruang yang sesuai dengan kondisi sumber air di daerah ini, salah satunya adalah informasi pengelolaan tata guna lahan dan ruang yang sangat berguna dalam pengelolaan selanjutnya, agar tidak terjadi permasalahan yang timbul di masa yang akan datang.

Tujuan penelitian ini adalah menghitung besar imbuhan air tanah alami pada beberapa DAS yang terdapat pada cekungan air tanah, yang selanjutnya digunakan sebagai data masukan dalam pemodelan air tanah dalam rangka pemanfaatan, pengelolaan dan pengembangan air tanah yang akan datang.

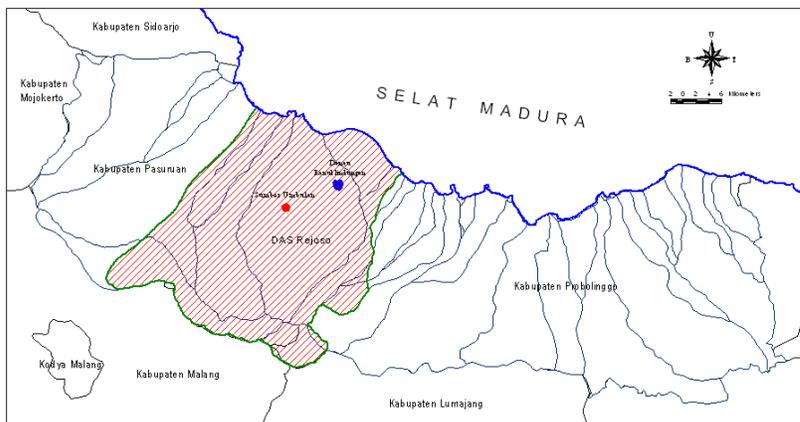
Lokasi kegiatan penelitian adalah pada cekungan air tanah Umbulan, yang meliputi Kabupaten dan Kota Pasuruan, serta merupakan bagian dari daerah cekungan air tanah Pasuruan, seperti ditampilkan pada Gambar 1. Lokasi ini berbatasan dengan Selat Madura (di sebelah Utara), DAS Welang (di sebelah Barat), Kabupaten Malang (di sebelah Selatan), dan Kabupaten Probolinggo (di sebelah Timur).

METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam perhitungan imbuhan air tanah adalah melalui penentuan besar limpasan dengan menggunakan *Model simulasi hujan limpasan* model NAM yang merupakan bagian dari sistem pemodelan MIKE 11.

Data masukan model simulasi NAM

Data masukan yang dibutuhkan oleh model NAM terdiri dari data meteorologi, data debit aliran sungai untuk kalibrasi dan validasi model, kondisi awal pada tampungan air permukaan,



Gambar 1 Peta wilayah penelitian

tampungan air bawah tanah dan tampungan zone perakaran, serta parameter pendukung model *NAM*. Masukan data kondisi awal dari DAS tersebut berupa kandungan air relatif pada tampungan air permukaan dan tampungan perakaran, aliran atas permukaan (*overland flow*) dan aliran antara. Masing-masing unsur aliran tersebut mempunyai sifat khas dan kecepatannya sangat bervariasi, masing-masing tergantung pada sifat masing-masing DAS, jenis tanah, sifat tanaman dan sebagainya.

Data masukan parameter-parameter model *NAM* terdiri dari 9 parameter yang mewakili zone permukaan (*surface zone*), zone perakaran (*rootzone*) dan zone air tanah (*groundwater zone*). Nilai dari masing-masing parameter ini secara otomatis dimasukkan secara terpisah. Oleh karena tidak diketahui nilai pasti yang akan dimasukkan pada parameter tersebut, maka digunakan nilai *default* sebagai nilai awal. Nilai batas bawah dan batas atas yang diizinkan dijadikan acuan untuk memasukkan nilai terkecil dan terbesar yang memungkinkan pada area tersebut. Parameter-parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Model kalibrasi simulasi *NAM*

Parameter dan variabel model *NAM* mewakili nilai rata-rata untuk semua daerah tangkapan air sehingga disebut dengan *lumped model*. Data-data hasil pengukuran terdahulu sedapat mungkin menjadi data masukan model *NAM* untuk merefleksikan keadaan daerah studi yang bersangkutan, tetapi ada beberapa parameter yang tidak tersedia datanya di lapangan. Oleh karena itu, parameter-parameter yang tidak tersedia tersebut dihasilkan dari model kalibrasi berdasarkan data-data hidrologi yang tersedia.

Proses kalibrasi, debit tersimulasi dibandingkan dengan debit terobservasi sampai didapat kesalahan yang paling kecil antara debit tersimulasi dan debit terobservasi. Kesalahan tersebut dihitung berdasarkan koefisien determinasi atau koefisien *Nash-Sutcliffe* sebagai berikut:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [q_{obs,i} - q_{sim,i}]^2}{\sum_{i=1}^N [q_{obs,i} - \bar{q}_{obs}]^2} \dots\dots\dots(1)$$

Tabel 1 Spesifikasi parameter model *NAM*

Parameter Model	Notasi	Satuan	Batas Bawah	Batas Atas
Kandungan air tampungan air permukaan maksimum	U_{max}	mm	10	20
Kandungan air tampungan perakaran maksimum	L_{max}	mm	100	300
Koefisien limpasan aliran permukaan	$CQOF$	-	0,1	1
Waktu konstan pada aliran antara	$CKIF$	jam	200	1000
Waktu konstan pada aliran <i>routing</i> permukaan	CK_{12}	jam	10	50
Nilai batas zone perakaran pada aliran permukaan	TOF	-	0	0,99
Nilai batas zone perakaran pada aliran antara	TIF	-	0	0,99
Nilai batas zone perakaran pada imbuhan (<i>recharge</i>) air tanah	TG	-	0	0,99
Waktu konstan pada aliran dasar (<i>baseflow</i>)	CK_{BF}	jam	1000	4000

di mana $Q_{sim,i}$ adalah debit simulasi pada saat i , $Q_{obs,i}$ adalah debit observasi pada saat i , dan Q_{obs} adalah debit observasi rata-rata. Untuk menghasilkan kalibrasi yang baik diperlukan nilai **kesalahan R^2 mendekati 1**.

Model kalibrasi dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya kesalahan pada data masukan dan kesalahan yang diakibatkan oleh nilai-nilai parameter yang tidak optimal. Untuk meminimalkan kesalahan, pilihan terakhir adalah yang paling memungkinkan, yakni mengganti nilai pada parameter model *NAM* sehingga didapat kesalahan yang paling minimal (R^2 diusahakan mendekati 1). Pada penelitian ini dilakukan analisis KAR (Kesalahan Absolut Rata-rata). Persamaan untuk menghitung KAR adalah persamaan yang dikemukakan oleh Adidarma, Hadihardaja dan Legowo (2004), yaitu :

Kesalahan Absolut Rata-rata (KAR):

$$KAR = \frac{1}{n} \sum \frac{Abs(Q_{sim} - Q_{obs})}{Q_{obs}} \dots\dots\dots(2)$$

di mana Q_{sim} adalah debit tersimulasi, Q_{obs} adalah debit terobservasi dan n adalah banyaknya data.

Keluaran (output) model simulasi NAM

Keluaran yang dihasilkan dari model simulasi ini terdiri dari dua bagian, yakni tabel ringkasan hasil perhitungan model dan grafik plot hasil model kalibrasi. Tabel tersebut merupakan nilai tahunan dari debit tersimulasi dan debit terobservasi beserta persentase simpangan yang dihasilkan. Keluaran lainnya yakni curah hujan tahunan, evapotranspirasi potensial, evapotranspirasi aktual, fluks kapiler, imbuhan, pemompaan, irigasi dan limpasan daerah aliran sungai yang dibagi menjadi aliran permukaan, aliran antara dan aliran dasar.

Grafik plot model kalibrasi memuat hasil kalibrasi antara debit terobservasi dan debit tersimulasi pada suatu DAS dengan runtut waktu yang telah ditentukan sebelumnya. Nilai debit tersimulasi tersebut dapat dilihat pada *file* yang berbeda. Debit tersimulasi tersebut bisa dibangkitkan secara harian atau bulanan sesuai dengan tipe data curah hujan yang dimasukkan.

TINJAUAN PUSTAKA

Perhitungan imbuhan air tanah dilakukan untuk mengetahui perkiraan secara kuantitatif tentang jumlah imbuhan ke dalam suatu akuifer di suatu cekungan. Dalam kondisi alami, sebuah akuifer berada dalam keseimbangan hidrodinamik. Beberapa parameter yang berpengaruh terhadap resapan air ke dalam tanah yaitu kelulusan air

pada batuan, curah hujan, tanah penutup, kemiringan lereng dan muka air tanah dalam akuifer tidak terkekang.

Secara teknis dalam menentukan daerah imbuhan perlu diketahui dengan mengenali ciri-ciri umum dan khusus, agar pengelolaan daerah imbuhan cepat dan tepat melalui kegiatan penataan. Ciri umum yang mudah dikenali adalah daerah imbuhan air tanah mempunyai arah aliran secara vertikal ke bawah, air meresap ke dalam tanah sampai ke permukaan air tanah, (Pusat Lingkungan Geologi 2007). Ciri lain dari daerah ini adalah kedudukan muka freatiknya yang relatif dalam, sehingga air dari permukaan akan masuk lebih dalam ke akuifer. Daerah ini merupakan daerah dengan singkapan batuan yang lolos air (permeabilitas tinggi) dengan kondisi tidak jenuh. Salah satu ciri terpenting daerah resapan ini di lapangan adalah letaknya yang berada di bagian atas (hulu) dari pemunculan mata air alami.

Penilaian dan perhitungan jumlah imbuhan air tanah dapat dilakukan dengan berbagai metode, antara lain persentase curah hujan, neraca khlorida dan hidrograf sumur, dan sebagainya. Pada pengkajian sumber air tanah, selalu berkaitan dengan besaran imbuhan, baik kondisi saat ini maupun imbuhan pada waktu yang akan datang atau perbedaannya. Beberapa metode perhitungan besaran imbuhan dibahas berikut ini:

1 Laju Infiltrasi

Kapasitas infiltrasi pada tanah adalah laju infiltrasi maksimum yang terjadi pada lahan (Binnie & Partners,1983). Estimasi imbuhan (*RC*) dapat dihitung berdasarkan laju infiltrasi (*IR*), tetapi banyak faktor yang akan menyulitkan seperti:

- 1) *IR* pada awalnya tinggi tetapi secara berangsur akan berkurang secara eksponensial sampai pada akhirnya menjadi jauh lebih rendah setelah beberapa hari terjadi perendaman (Davis & de Wiest, 1969). Pada saat awal kemungkinan akan sangat tinggi, sampai mencapai beberapa ratus mm/hari dan mungkin bertahan dalam waktu yang panjang selama musim hujan, seperti terjadi pada tanah tegalan yang tidak digenangi.
- 2) *IR* akan lebih rendah dan kurang bervariasi di daerah persawahan yang berair.
- 3) Pada kondisi tanah yang berat, pada awal musim hujan mungkin terjadi imbuhan sangat cepat melalui rekahan tanah.

Sebagai contoh nilai *IR* akhir yang pernah diukur di Indonesia ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil Uji laju Infiltrasi di Indonesia

Sifat	Tekstur	Kondisi	IR mm/hari
sangat cepat	pasir, pasir berlempung	diairi	20 – 80
		tidak diairi	> 100
cepat	lempung berpasir	diairi	10 – 20
		tidak diairi	20 - 100
sedang	lempung, lempung liat	diairi	5 - 10
		tidak diairi	10 - 50
lambat	liat berdebu, liat	diairi	< 5
		tidak diairi	5 - 20

Sumber: *Binnie & Partners, 1983.*

Pada umumnya, jelas bahwa laju infiltrasi tanah tidak akan sama dengan imbuan di areal dengan tumbuhan alami, areal perkampungan dan areal tegalan. Seluruh curah hujan yang jatuh ke permukaan tanah (curah hujan dikurangi evapotranspirasi) akan meresap ke dalam tanah. Di daerah persawahan dengan sistem irigasi, *IR* adalah faktor kendali selama masa tanam padi. Untuk daerah tersebut, imbuan dapat dihitung sebagai berikut:

$$RC = \text{Jumlah hari padi tumbuh} \times IR \text{ tanah yang diairi} \times \text{areal jenis tanah} \dots \dots \dots (3)$$

2 Keseimbangan Khlorida (*Binnie & Partners, 1983*).

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menghitung estimasi imbuan secara cepat adalah melalui keseimbangan kandungan khlorida. Diasumsikan bahwa khlorida yang terdapat dalam air hujan terkonsentrasi setelah terjadi evapotranspirasi dan dihitung sebagai berikut (*Binnie & Partners, 1983*):

$$RC = RF \times Cl^- \text{ dalam curah hujan} \dots \dots \dots (4)$$

RC, imbuan
RF, curah hujan (mm/tahun)
Cl⁻, pada contoh air sumur

Jika *RF* adalah dalam mm/tahun, maka *RC* akan memakai satuan yang sama; dan dapat dikonversikan menjadi m³/tahun dengan perkalian terhadap luas singkapan akuifer. Parameter khlorida digunakan karena ion Cl⁻ merupakan ion yang paling stabil, tetapi merupakan sumber kesalahan yang mungkin terjadi pada estimasi, di antaranya dalam cara pengambilan contoh air. Metode ini tidak terlalu tepat untuk digunakan pada daerah yang terpengaruh air laut, yang memang sudah ada, seperti pada daerah pantai. Tetapi sangat berguna jika dipakai untuk perhitungan perkiraan besaran

imbuan di daerah volkanik baru atau daerah batu gamping. Sumber kesalahan besar terjadi jika mengestimasi jumlah air hujan yang hilang bukan karena evapotranspirasi, tetapi karena limpasan permukaan air hujan badai dan limpasan di bawah permukaan/*interflow*. Pada persamaan di atas, jumlah curah hujan (*RF*) harus dikurangi dengan jumlah limpasan air hujan yang demikian.

Pada daerah batugamping *karst*, limpasan permukaan air hujan badai mungkin nol, tetapi pada daerah-daerah lain perlu dibuat estimasi dari data aliran sungai. Apabila tidak tersedia data aliran, maka estimasi untuk pulau Jawa adalah bahwa limpasan permukaan air hujan badai dan limpasan di bawah permukaan adalah sebesar 30% dari curah hujan di daerah pengaliran sungai. Oleh sebab itu, pada persamaan di atas digunakan 0,7 *RF* dan bukan *RF*. Analisis khlorida perlu dilakukan untuk mendapatkan contoh curah hujan dari daerah singkapan. Dalam setahun, kandungan Cl⁻ akan berbeda dan tergantung musim. Dalam menentukan nilai Cl⁻ rata-rata perlu mengambil contoh setiap 2 sampai 4 minggu selama musim hujan.

3 Hidrograf sumur

Kenaikan tinggi muka air tanah sebagai akibat infiltrasi selama musim hujan dapat digunakan untuk menghitung besaran imbuan sebagai berikut (*Guideline BP 11*):

$$RC \text{ (m}^3\text{/tahun)} = A \times h_w \times S_y \dots \dots \dots (5)$$

A, luas permukaan akuifer pada singkapan (m²)
h_w, kenaikan tinggi muka air tanah rata-rata dalam sumur gali dan sumur observasi pada akuifer tidak terkekang (m/tahun)
S_y, lepasan jenis (specific yield) (%)

Pada penerapan metode estimasi imbuan dari hidrograf sumur, umumnya terdapat beberapa sumber kesalahan terutama pada

pilihan nilai debit spesifik. Berbagai cara pengkajian agar dapat memberikan hasil yang tepat, misalnya untuk daerah yang sempit, merupakan estimasi umum yang tidak akan menggambarkan daerah yang luas. Nilai S_y bisa diperoleh dari hasil uji pompa jangka panjang. Berdasarkan hidrograf sumur, perlu untuk mendapatkan data curah hujan yang terisolasi, yang mungkin ada kaitan dengan kenaikan tinggi muka air tanah tertentu dalam sumur dangkal di sekitarnya. Data tersebut sebagai debit yang

teridentifikasi paling jelas selama musim kering atau mendekati awal musim hujan. Cara perhitungan ini akan mengasumsikan bahwa tidak terdapat limpasan permukaan dan defisit kelembaban tanah tetapi bahwa seluruh curah hujan terserap dengan sangat cepat ke dalam muka air tanah. Asumsi ini tidak berlaku untuk tanah rekahan. Sumber kesalahan lain adalah karena alat duga curah hujan berada beberapa kilometer dari sumur bor.

Tabel 3 Nilai *specific yield*

NO	Material	S_y (%)
1	Kerikil	30
2	Pasir kasar dan kerikil berpasir	25
3	Pasir sedang	20
4	Pasir halus dan batu pasir yang agak rekat	10
5	Tanah lempung dan kerikil liat	5
6	<i>Argillaceous</i> atau batuan sedimen berbutir halus (lempungan) mis. Serpih.	3-5
7	Kapur, batugamping atau lava bercelah sedikit (kecil)	2-3

Sumber: *Binnie & Partners, 1983.*

Metode perhitungan lainnya masih banyak, tetapi tidak dituliskan pada makalah ini di antaranya *Groundwater storage & Baseflow Analysis, Aquifer vertical leakage, Soil moisture balance, Cacthment water balance* dan *Lysimeters*. Penerapan dan penggunaan metode perhitungan ini perlu disesuaikan dengan kondisi ketersediaan data yang akan digunakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis dan perhitungan imbuhan di cekungan air tanah Umbulan dan evaluasi beberapa kegiatan, dibahas berikut ini.

1 Perubahan penggunaan lahan di wilayah Pasuruan

Daerah *recharge* merupakan daerah yang sangat penting untuk mensuplai air tanah bagi daerah sekitarnya, karena itu perlu diadakan pelestarian atau dilakukan konservasi di daerah tersebut. Daerah dataran rendah, merupakan daerah yang cenderung lebih cepat berkembang dibandingkan daerah yang memiliki topografi lebih tinggi, namun sekarang juga ikut mengalami perkembangan.

Penggunaan lahan di daerah dataran ini dari tahun ke tahun mengalami perubahan yang mengarah menjadi daerah pusat kota, pemukiman, perkantoran, dan wilayah industri. Perkembangan ini merupakan gejala wajar dari perkembangan kota. Topografi yang berbentuk dataran ini dapat berfungsi sebagai daerah *discharge* karena frekuensi pengambilan air tanah yang relatif besar oleh sebab di daerah ini perkembangan penduduk tumbuh pesat.

Daerah transisi, yaitu daerah antara topografi dataran tinggi dan dataran rendah, dapat berfungsi sebagai daerah *recharge* meskipun dalam jumlah yang relatif kecil, karena daerah ini masih memiliki kemampuan untuk meresapkan air (infiltrasi) yang relatif lebih tinggi daripada daerah dataran (yang sudah tidak memiliki daerah resapan akibat pesatnya pembangunan). Daerah ini juga belum mengalami perubahan tataguna lahan yang cukup signifikan, namun akhir-akhir ini tidak demikian lagi.

Daerah dataran tinggi, terletak di lereng gunung. Daerah lereng gunung ini dapat berfungsi sebagai daerah *recharge* yang cukup potensial, karena di daerah ini tataguna lahan masih didominasi oleh hutan dan tidak ada perubahan

lahan yang cukup signifikan sehingga air tanah lebih banyak meresap daripada mengalir sebagai *run off*. Namun saat ini banyak terjadi perubahan tata guna lahan yang terus berkembang dari tahun ke tahun.

Indikasi perubahan penggunaan lahan di wilayah Pasuruan telah terdeteksi beberapa tahun belakangan ini, di samping makin padatnya areal terbangun di pusat kota dan sekitarnya, juga maraknya pertanian rakyat di bagian perbukitan sampai ke arah lereng Pegunungan Tengger, sehingga sering terjadi banjir pada musim hujan, yang beberapa tahun yang lalu tidak pernah terjadi.

Kabupaten Pasuruan merupakan daerah dengan kondisi morfologi yang cukup beragam dari wilayah pantai, dataran rendah, perbukitan dan wilayah pegunungan. Berdasarkan peta penggunaan lahan Kabupaten Pasuruan tahun 1990, areal ini masih didominasi oleh lahan tidak terbangun dengan pembagiannya sebagai berikut:

lahan terbangun sebesar 15026,9 ha (10,19%) dari luas wilayah, sedangkan lahan tidak terbangun sebesar 132375 ha (89,81%).

Perkembangan lahan terbangun di Kabupaten Pasuruan, dalam kurun waktu 13 (tiga belas) tahun mengalami perubahan terutama pada wilayah yang mempunyai akses yang cukup baik terhadap jaringan jalan, maupun kondisi sosial budaya masyarakat yang mendukung. Hal ini terlihat dari konsentrasi lahan terbangun yang ada, lebih mengarah ke arah Barat dari Kabupaten Pasuruan (BAPPEDA Kab. Pasuruan, 2003).

Pada Tabel 4 tersaji beberapa pengurangan luas lahan sawah irigasi teknis maupun kawasan hutan. Lahan sawah irigasi teknis berubah menjadi lahan terbangun. Kawasan hutan berubah menjadi lahan terbangun, kegiatan budidaya pertanian yang dilakukan masyarakat di sekitar hutan, maupun yang mendirikan pemukiman dan pabrik di areal tersebut.

Tabel 4 Penggunaan lahan di Kabupaten Pasuruan tahun 1990 dan 2003 (km²)

No.	Jenis Penggunaan	Tahun		Perubahan		Keterangan
		1990	2003	+	-	
1	Hutan	27664,00	6858,50		20805,50	Perubahan fungsi menjadi belukar, tegalan, perkebunan/kebun maupun permukiman
2	Semak Belukar	-	12959,69	12959,69		
3	Cadas	-	11,47	11,47		
4	Lautan Pasir	-	276,16	276,16		
5	Kebun/Perkebunan	8860,20	14765,47	5905,27		
6	Tegalan	43377,20	46917,40	3540,20		
7	Sawah	47266,30	36706,66		10559,64	Berubah fungsi menjadi lahan terbangun
8	Hutan Bakau	-	107,99	107,99		
9	Tambak	3436,30	4056,35	620,05		
10	Rawa	-	270,36	270,36		
11	Danau	230,10	201,02		29,08	Berubah menjadi tegalan
12	Pemukiman	13013,20	17318,06	4304,86		
13	Industri	-	1664,83	1664,83		
14	Kawasan Militer	-	188,50	188,50		
15	Kawasan Wisata	-	624,65	624,65		
16	Peternakan	-	26,81	26,81		
17	Penambangan	-	196,01	196,01		
18	Tanah Rusak	1540,50	-		1540,50	
19	Lain-lain	2013,70	4251,57	2237,87		
	Jumlah luas lahan	147401,50	147401,50	32934,72	32934,72	

Sumber : Bappeda Kabupaten Pasuruan, 2003

Perubahan tata guna lahan yang terjadi di beberapa DAS mengakibatkan perubahan distribusi debit menurut waktu, demikian pula

dengan koefisien limpasan dan BFI (*Base Flow Index*). Di beberapa DAS seperti DAS Rejoso, penggunaan lahan yang sebelumnya

diperuntukkan untuk sawah irigasi teknis berubah menjadi tegalan, sehingga menyebabkan debit pada Sungai Rejoso dan koefisien limpasannya meningkat dan ada kecenderungan terjadinya penurunan BFI. Pada DAS Welang, Purwodadi, terjadi hal yang serupa, yakni kenaikan debit pada Sungai Welang, Purwodadi, dan kenaikan koefisien limpasan serta kecenderungan penurunan BFI tahunan dari tahun ke tahun.

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu yang dilaksanakan oleh Pusat Lingkungan Geologi, pada tahun 2006, menjelaskan bahwa daerah imbuhan air tanah selalu mempunyai karakteristik hidrogeologi tertentu yang berfungsi sebagai daerah resapan alamiah. Pemanfaatan air tanah di daerah resapan, tidak untuk dikembangkan bagi berbagai peruntukan, kecuali untuk keperluan rumah tangga, sedangkan untuk keperluan lain dapat dipertimbangkan setelah dilakukan kajian teknis hidrogeologi. Peruntukan lahan diupayakan untuk perkebunan atau hutan. Hasil kajian daerah resapan di Kab Pasuruan, terletak di bagian Selatan dan Barat wilayah Kabupaten Pasuruan, menempati daerah tubuh dan puncak gunungapi yang ditutupi oleh batuan vulkanik tua dan muda yang merupakan hasil kegiatan gunung Arjuno, gunung Welirang, gunung Penanggungan dan pegunungan Tengger yang berupa lava, breksi vulkanik, tuf, aglomerat dan lahar. Penyebaran zone ini di bagian Barat kabupaten Pasuruan menempati daerah tubuh dan puncak gunung Penanggungan, gunung Welirang dan gunung Arjuno, memanjang dari Utara ke Selatan yaitu mulai desa Wonosunyo kecamatan Gempol, kemudian berlanjut ke Selatan mulai desa Sukoreno, Lumbangrejo, Prigen, Pencalukan, Ledug, Dayurejo dan Jatiarjo wilayah kecamatan Prigen. Selanjutnya ke bagian selatan yaitu wilayah kecamatan Purwosari dan Purwodadi bagian Barat. Selanjutnya ke bagian Timur meliputi seluruh kecamatan Tutur, Puspo dan Tosari dan kecamatan Lumbang.

Morfologi daerah ini berupa pegunungan, daerah ini berfungsi sebagai daerah resapan, sehingga areal ini perlu dijaga kelestariannya, khususnya terhadap perubahan fungsi lahan.

2 Pemodelan hujan limpasan dengan NAM

Model simulasi hujan-limpasan merupakan model hidrologi untuk memperkirakan besarnya hidrograf debit dengan data masukan meteorologi untuk model simulasi yaitu data curah hujan dan evapotranspirasi potensial.

- 1) Data curah hujan yang menjadi masukan adalah data curah hujan harian tahun 1980 - 2006. Data tersebut diakumulasikan sehingga curah hujan yang dihitung dengan

menggunakan model NAM adalah volume curah hujan.

- 2) Data evapotranspirasi yang menjadi data masukan adalah data evapotranspirasi bulanan yang dihitung berdasarkan data iklim bulanan tahun 1976 - 2006 dengan menggunakan metode Penman-Monteith pada program CropWat 4 Windows 4.3.
- 3) Data masukan debit aliran sungai adalah data debit harian tahun 1992 - 2006 dari Sungai Rejoso, Sungai Welang, Sungai Petung, dan Sungai Gembong. Data debit terobservasi tersebut akan menjadi acuan pada kalibrasi debit tersimulasi yang dihasilkan model.

3 Pengolahan data

Sejumlah 3 buah DAS yang sepenuhnya berada pada wilayah penelitian ini, adalah DAS Rejoso, DAS Petung dan DAS Gembong, 7 (tujuh) DAS yang lain sebagian wilayahnya berada pada CAT Umbulan dan terdapat wilayah Pegunungan Tengger pada bagian Selatannya. Curah hujan di wilayah penelitian dihitung berdasarkan data isohet curah hujan tahunan regional Propinsi Jawa Timur dapat dilihat pada Tabel 5.

Data debit yang digunakan berasal dari data pengamatan pengukuran debit masing-masing sungai yang berada pada DAS tersebut di atas. Di dalam model NAM, proses hujan-limpasan digambarkan dengan perhitungan kontinyu kandungan air pada empat tampungan yang berbeda di mana setiap tampungan mewakili elemen fisik yang berbeda dari suatu daerah aliran sungai. Keempat tampungan itu adalah tampungan salju (*snow storage*), tampungan permukaan (*surface storage*), tampungan zone perakaran (*rootzone storage*) dan tampungan air tanah (*groundwater storage*).

Data evapotranspirasi bulanan berasal dari data klimatologi bulanan stasiun klimatologi P3GI (Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia), Pasuruan, tahun 1976 sampai tahun 2006. Data klimatologi bulanan tersebut diolah menjadi evapotranspirasi bulanan dengan menggunakan metode Penman-Monteith pada program CropWat 4 Windows 4.3. Data evapotranspirasi bulanan tersebut disajikan pada Tabel 6.

4 Kalibrasi model

Aplikasi model pada MIKE 11 untuk perkiraan hujan-limpasan dapat dibagi menjadi dua tahap. Tahap pertama adalah proses kalibrasi untuk menentukan nilai optimum dari parameter-parameter model NAM. Tahap kedua adalah perhitungan debit tersimulasi dengan menggunakan nilai parameter model yang telah diperkirakan sebelumnya selama proses kalibrasi.

Nilai kondisi awal (*initial condition*) berupa rasio kandungan air pada tampungan permukaan (U/U_{max}), rasio kandungan air pada tampungan zone perakaran (L/L_{max}), aliran atas permukaan (*overland flow*), aliran antara (*interflow*) dan nilai aliran dasar (*baseflow*) serta *lower baseflow*, dimasukkan sedapat mungkin sesuai dengan kondisi DAS yang akan dimodelkan seperti yang terdapat pada Tabel 7. Hasil dari proses kalibrasi adalah nilai parameter model NAM seperti pada

Tabel 8. Hasil plot grafik hasil perhitungan debit tersimulasi dapat dilihat pada keluaran visual yang dihasilkan oleh MIKE 11 pada gambar 2,3 dan gambar 4. Kalibrasi data debit Sungai Rejoso dimulai 1 Januari 2002 hingga 31 Desember 2006. Data ini dipilih karena terdapat keseragaman pola debit yang terjadi untuk mempermudah dalam proses kalibrasi.

Tabel 5 Curah hujan tahunan dan data debit pada CAT Umbulan

NO	DAS	Luas (km ²)	Curah hujan (mm/tahun)	Q _{rata2} (l/s)	Perioda
1	Rejoso/ Rejoso-Winongan	201,70	1646,78	1261	1992 - 2006
2	Petung/Petung-Gondangwetan	159,87	1752,79	154	2002 - 2006
3	Sungai Gembong	40,79	1308,78	162	2002 - 2006
4	Sungai Welang - Desa Dhompo	467,00	1948,50	727	2002 - 2006
5	Sungai Welang - Purwodadi	103,00	1617,79	371	1992 - 2006

Sumber: hasil pengolahan data (2008)

Tabel 6 Data evapotranspirasi potensial stasiun klimatologi P3GI Pasuruan

Tahun	Eto (mm/hari)											
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agu	Sep	Okt	Nop	Des
1976	4,38	4,67	4,41	5,33	5,25	5,22	5,33	5,48	5,42	5,38	4,66	4,28
1977	3,60	3,68	4,39	5,07	5,24	4,79	5,20	4,47	5,54	5,84	5,33	3,51
1978	3,65	4,29	4,45	5,01	4,88	4,37	4,83	5,36	5,48	5,09	4,44	3,57
1979	3,98	4,26	4,71	5,17	4,63	5,06	5,26	5,33	5,41	5,36	4,74	3,70
1980	3,62	3,92	4,96	4,84	5,17	5,08	5,11	5,59	5,53	5,42	4,61	3,50
1981	3,65	4,16	4,82	4,92	4,93	5,01	4,81	5,38	5,51	5,43	4,14	3,53
1982	3,41	3,95	4,59	5,12	5,19	4,94	5,02	5,29	5,20	5,30	4,93	3,86
1983	4,07	4,25	4,55	4,31	4,48	4,95	5,17	5,44	5,71	5,20	4,38	3,72
1984	3,53	3,71	4,28	4,89	5,01	5,00	5,18	5,44	5,00	5,20	4,69	3,18
1985	4,15	3,87	4,70	4,87	5,09	4,96	4,89	5,39	5,66	5,57	4,57	3,41
1986	3,26	4,06	4,29	4,96	5,44	4,57	5,11	5,58	5,55	5,59	4,79	3,96
1987	3,32	3,85	4,92	5,43	5,27	4,96	4,91	5,73	5,91	6,35	5,72	3,49
1988	3,89	4,58	4,42	5,40	5,21	5,34	5,57	5,79	6,03	5,62	4,31	3,65
1989	4,29	4,15	4,73	5,00	5,18	4,70	5,25	5,53	5,90	5,79	4,99	4,11
1990	3,68	4,64	4,80	5,56	5,22	5,06	5,21	5,38	5,74	5,79	5,71	3,27
1991	3,49	4,01	4,91	4,35	5,44	5,22	5,27	5,43	5,66	5,56	4,56	3,48
1992	4,19	4,48	5,19	5,51	5,28	5,10	5,11	5,35	5,50	5,28	4,60	3,66
1993	3,70	4,49	4,90	4,96	5,20	4,89	5,19	5,35	5,76	5,87	4,90	4,00
1994	3,71	4,24	4,10	5,28	5,53	5,20	5,19	5,32	5,36	5,43	5,02	3,66
1995	3,83	3,96	4,17	4,90	5,34	5,07	5,15	5,71	5,78	5,54	4,34	3,40
1996	3,95	3,93	4,86	5,48	5,46	5,32	5,39	5,50	5,89	5,46	4,60	3,68
1997	3,87	4,07	5,42	5,26	5,40	5,27	5,27	5,47	5,69	5,75	5,28	4,01
1998	4,45	4,39	4,50	5,08	5,07	4,85	4,92	5,64	5,46	5,06	4,14	3,69
1999	3,80	4,43	4,43	4,71	5,14	5,21	5,32	5,60	5,78	5,18	4,05	3,49
2000	3,68	3,94	4,63	4,87	4,98	4,94	5,33	5,50	5,70	4,66	4,01	3,81
2001	3,88	4,36	4,57	5,01	5,38	4,93	5,05	5,43	5,75	4,77	4,50	3,51
2002	4,06	4,16	4,89	5,24	5,39	5,38	5,18	5,30	5,67	5,52	4,79	3,91
2003	4,17	4,13	4,98	5,45	4,90	5,16	5,23	5,51	5,73	5,27	4,33	3,14

2004	3,83	3,92	4,12	5,57	4,97	5,09	5,12	5,41	5,53	5,58	4,56	3,20
2005	4,27	4,27	4,51	4,89	5,29	4,94	5,11	5,31	5,55	4,88	4,78	2,74
2006	3,57	3,87	3,83	4,81	4,55	5,06	5,17	5,44	5,64	5,41	5,03	3,70
Rata ₂	3,84	4,15	4,62	5,07	5,15	5,02	5,16	5,43	5,61	5,42	4,69	3,61

Keterangan: Eto, evapotranspirasi potensial

Tabel 7 Kondisi awal data masukan model NAM

Kondisi awal	Notasi	Satuan	DAS Rejoso	DAS Petung	DAS Gembong
Luas DAS	A	km ²	201,7	158,87	40,97
Rasio kandungan air pada tampungan permukaan	U/U_{max}	-	0,99	1	1
Rasio kandungan air pada tampungan zone perakaran	L/L_{max}	-	0,99	1	1
Aliran atas permukaan	QOF	mm/jam	5	0,2	0,3
Aliran antara	QIF	mm/jam	2	0,1	0,2
Aliran dasar	BF	mm/jam	12	0,6	0,7
Lower baseflow	BF-Low	mm/jam	7	0	0,7

Pada kalibrasi simulasi *run off* dan observasi Sungai Rejoso, dilakukan analisis perbandingan kelurusan (*linear*) antara simulasi *run off* dan observasi. Dari perbandingan tersebut didapatkan $R^2 = 0,3157$ (garis tren berwarna hitam). Garis tren berwarna merah muda menunjukkan hasil kalibrasi yang terbaik dengan nilai R^2 mendekati 1.

Proses kalibrasi pada DAS lainnya, yaitu DAS Petung dan Gembong dilakukan seperti pada DAS Rejoso dan dibahas berikut ini. Kalibrasi data debit Sungai Petung dimulai pada 25 Maret 2002 hingga 31 Desember 2006 dan Sungai Gembong dimulai pada 1 Januari 2002 hingga 31 Desember 2006. sesuai dengan ketersediaan data. Hasil proses kalibrasi, berupa parameter model disajikan pada Tabel 8.

Kalibrasi simulasi *run off* dan observasi Sungai Petung dan Gembong diperoleh dari perbandingan tersebut yakni $R^2 = 0,4004$ (Sungai Petung) dan $R^2 = 0,4848$ (Sungai Gembong). Hasil kalibrasi simulasi *run off* pada Sungai Petung masih cukup jauh dibandingkan dengan hasil kalibrasi yang ideal. Hal ini disebabkan oleh karena proses kalibrasi yang telah dilaksanakan mendapat kesulitan, yakni tidak dapat mengkalibrasi debit-debit puncak yang terjadi pada Sungai Petung, tetapi di sisi lain dapat mengkalibrasi debit rata-rata yang terjadi pada Sungai Petung.

Kalibrasi debit Sungai Gembong cukup memadai, walaupun demikian terdapat kesulitan pada MIKE 11 dalam mengkalibrasi debit puncak dan debit rata-rata sekaligus

Kalibrasi simulasi *run off* dan observasi dari beberapa DAS dihitung nilai KAR-nya, kemudian dipilih hasil percobaan dengan nilai KAR terkecil dari beberapa percobaan terbaik yang dilakukan seperti tertera pada Tabel 9.

Hasil kalibrasi yang dipilih memiliki nilai KAR terkecil di antara percobaan-percobaan terbaik yang dilakukan dan nilai R^2 hasil kalibrasi masing-masing DAS masih tergolong kecil. Nilai KAR tersebut masih di bawah 50% sehingga hasil kalibrasi dapat digunakan untuk proses perhitungan selanjutnya. Dalam melakukan kalibrasi dilakukan penyaringan (*screening*) manual pada data debit observasi yang ada karena terdapat beberapa data yang diragukan.

5 Imbuan air tanah Umbulan

Hasil perhitungan proses komputer model simulasi NAM, diperoleh nilai imbuan air tanah pada cekungan air tanah Umbulan, di antaranya pada DAS Rejoso, DAS Petung dan DAS Gembong, disajikan pada Tabel 10. Perhitungan debit simulasi dan perbandingan dengan debit observasi serta parameter lain yang diperoleh adalah curah hujan tahunan, evapotranspirasi potensial tahunan, evapotranspirasi aktual, imbuan air tanah tahunan, aliran atas permukaan, aliran antara (*interflow*) dan aliran dasar tahunan.

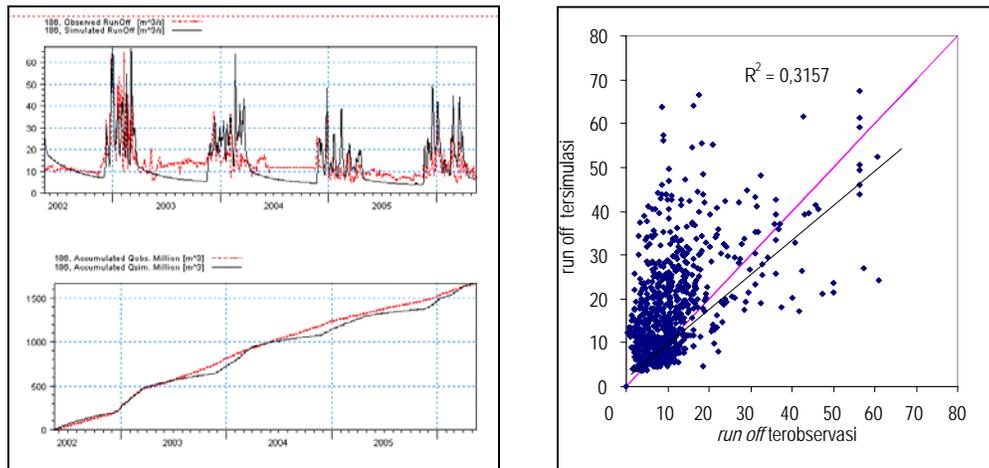
Besaran imbuan air tanah pada DAS Rejoso adalah 633 mm. Kondisi DAS ini sangat berkaitan dengan penggunaan lahan yang ada pada saat ini. Penggunaan lahan pada DAS Rejoso didominasi oleh sawah irigasi dan tegalan. Keberadaan hutan dan semak belukar hanya sebagian kecil dari wilayah DAS Rejoso.

Kondisi hidrogeologi DAS Rejoso didominasi oleh akuifer produktif tinggi dengan penyebaran luas

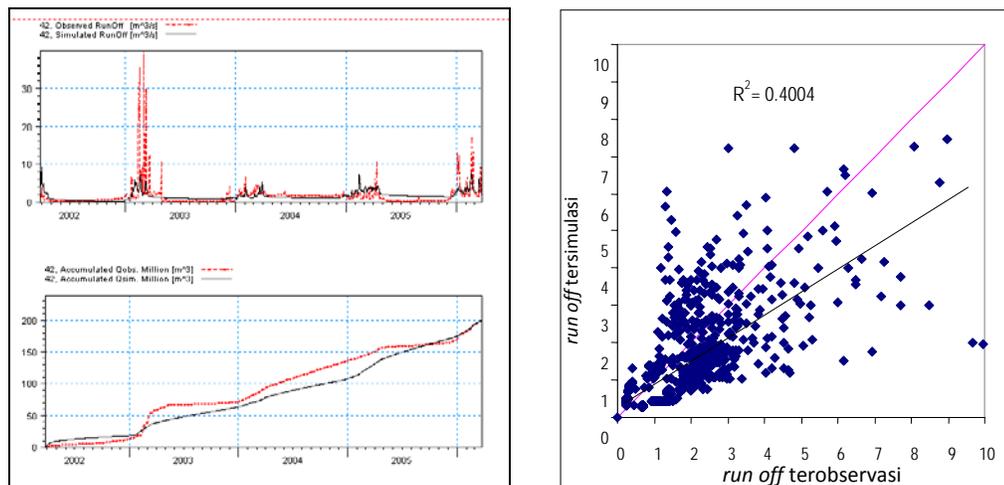
dan kisaran kedalaman muka air tanah sangat beragam dengan debit serahan sumur lebih dari 5 l/s.

Tabel 8 Nilai parameter model hasil kalibrasi

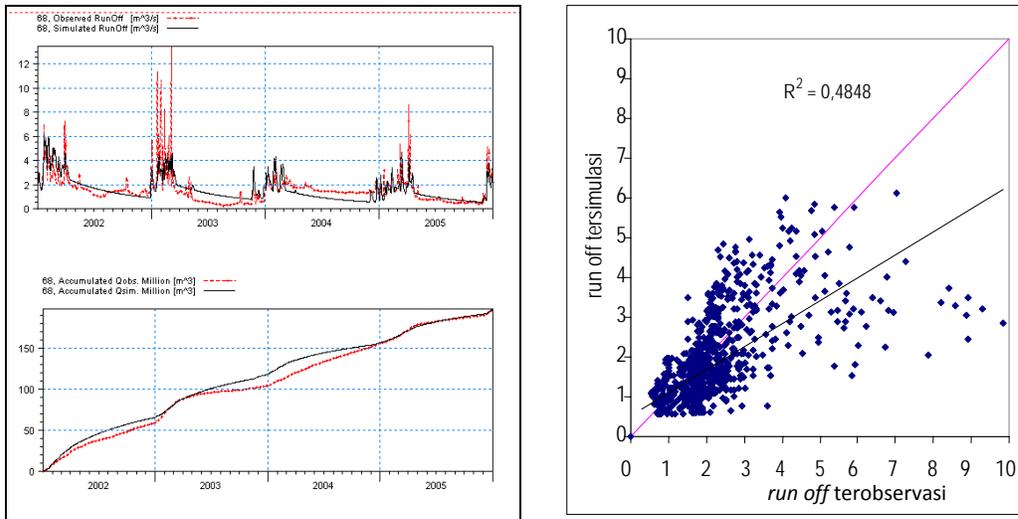
Parameter Model	Notasi	Satuan	DAS Rejoso	DAS Petung	DAS Gembong
Kandungan air tampungan air permukaan maksimum	U_{max}	mm	20	18,5	18,2
Kandungan air tampungan perakaran maksimum	L_{max}	mm	50	283	54
Koefisien limpasan aliran permukaan	$CQOF$	-	0,5	0,103	0,166
Waktu konstan pada aliran antara	$CKIF1$	jam	200	886,1	243,1
Waktu konstan pada penelusuran aliran permukaan	CK_{12}	jam	50	22,4	23,4
Nilai batas zone perakaran pada aliran permukaan	TOF	-	0,5	0,958	0,466
Nilai batas zone perakaran pada aliran antara	TIF	-	0,5	0,554	0,487
Nilai batas zone perakaran pada imbunan air tanah	TG	-	0,5	0,488	0,691
Waktu konstan pada aliran dasar	CK_{BF}	jam	2000	1019	3949



Gambar 2 Hasil kalibrasi *run off* tersimulasi dan *run off* terobservasi Sungai Rejoso



Gambar 3 Hasil kalibrasi *run off* tersimulasi dan *run off* terobservasi Sungai Petung



Gambar 4 Hasil kalibrasi *Run off* tersimulasi dan *run off* terobservasi Sungai Gembong

Tabel 9 Hasil perhitungan R^2 dan KAR

DAS	Percobaan No.	R^2	KAR (%)
Rejoso	135	0,3123	41,83
	146	0,2339	36,91
	186	0,3157	35,40
Gembong	17	0,4732	50,75
	18	0,4812	41,44
	29	0,4842	39,82
	30	0,4707	41,29
	68	0,4848	39,82
Petung	42	0,4004	43,04
	94	0,3985	44,20
	98	0,3801	45,29

Curah hujan tahunan pada DAS Rejoso adalah 1800 mm dengan evapotranspirasi tahunan sebesar 1150 mm. Dua per tiga wilayah DAS Rejoso termasuk dalam wilayah formasi batuan gunung api Kuartir Tengah yang didominasi oleh litologi kerikil. Dilihat dari geomorfologinya, wilayah DAS Rejoso terdiri dari satuan morfologi dataran terdenudasi, satuan kaki gunung api dan satuan kerucut gunung api

Nilai imbuhan air tanah pada DAS Petung adalah 568,7 mm. Penggunaan lahan pada DAS Petung seperti halnya pada DAS Rejoso, didominasi oleh sawah irigasi dan tegalan. Keberadaan sawah tadah hujan, semak belukar dan empang hanya sebagian kecil dari wilayah DAS Petung. Seperti halnya pada DAS Rejoso, kondisi hidrogeologi DAS Petung didominasi oleh akuifer produktif tinggi dengan penyebaran luas dan kisaran kedalaman muka air tanah sangat beragam dengan debit serahan sumur lebih dari 5 l/s. Curah hujan

tahunan pada DAS Petung adalah 1300 mm dengan evapotranspirasi tahunan sebesar 1150 mm.

Sebagian besar DAS Petung termasuk dalam wilayah formasi batuan gunung api Kuartir Tengah yang didominasi oleh litologi lempung pasiran atau lanau pasiran. Kondisi geomorfologi DAS Petung hampir serupa dengan DAS Rejoso, yakni terdiri dari satuan morfologi dataran terdenudasi, satuan kaki gunung api dan satuan kerucut gunung api. DAS Gembong banyak didominasi oleh sawah irigasi sehingga pada Tabel 10 dapat dilihat hasil perhitungan proses komputer model simulasi NAM DAS Gembong mendapatkan nilai imbuhan air tanah sebesar 655,8 mm. Kondisi hidrogeologi DAS Gembong didominasi oleh akuifer produktif tinggi, dengan penyebaran luas dan kisaran kedalaman muka air tanah dekat atau di atas muka tanah dengan debit serahan sumur lebih dari 5-10 l/s. Curah hujan tahunan pada DAS Petung adalah

1300 mm dengan evapotranspirasi tahunan mm. DAS Gembong termasuk dalam wilayah formasi batuan gunung api Kuartir Tengah yang didominasi oleh litologi kerikil dan lempung pasiran atau lanau pasiran. Kondisi geologi pada DAS Gembong terdiri dari tuf pasiran, tuf batu apung, breksi tufan dan tuf halus. Curah hujan tahunan pada DAS Gembong adalah 1300 mm dengan evapotranspirasi tahunan sebesar 1050 mm. Dari tabel di atas berdasarkan hasil kalibrasi sementara dapat dilihat hasil perhitungan debit tersimulasi dan perbandingannya dengan debit terobservasi. Parameter lain yang dapat dilihat adalah curah hujan tahunan, evapotranspirasi potensial tahunan, evapotranspirasi aktual, imbuhan air tanah tahunan, aliran atas permukaan, aliran antara (*interflow*) dan aliran dasar tahunannya.

Nippon Koei pada tahun 1986, telah melakukan pemodelan air tanah, untuk tujuan menirukan kondisi air tanah di Pasuruan-Probolinggo. Simulasi kondisi *air tanah zone jenuh* untuk daerah Pasuruan-Probolinggo ini menggunakan nilai imbuhan hasil perhitungan. Nilai imbuhan dan evapotranspirasi yang digunakan dalam analisis pemodelan air tanah dengan nilai imbuhan (*recharge*) sebesar berturut-turut 519 mm, 601 mm, 522 mm dan 608 mm, dan angka evapotranspirasi berturut-turut 940 mm, 981 mm, 998 mm dan 1155 mm.

Besaran nilai-nilai imbuhan ini tidak menyimpang jauh dengan nilai imbuhan yang telah diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan program NAM-MIKE 11, yakni 633 mm, 568,7 mm dan 655,8 mm serta angka evapotranspirasi tahunan sebesar 1150 mm.

Metode perhitungan yang lainnya untuk menentukan besar imbuhan yaitu dengan menggunakan data hidrograf sumur (persamaan NO. 5) akan dibahas berikut ini. Besaran imbuhan rata-rata tahunan dihitung dengan perkalian antara luas daerah imbuhan (m^2) dengan fluktuasi muka air tanah tahunan ($m/tahun$) dan lepasan jenis (S_y) dalam %. Luas daerah imbuhan ditentukan dari perhitungan dengan menggunakan grafik metode Todd (grafik hubungan antara luas daerah imbuhan, imbuhan rata-rata tahunan dan debit mata air). Nilai ini telah dihitung dalam penelitian Hidrogeologi Umbulan pada tahun 2008, yaitu luas daerah imbuhan yang berkaitan dengan debit mata air Umbulan. Debit rata-rata *head pond* mata air Umbulan sebesar 3900 liter/s (tahun 2008) dan asumsi besaran imbuhan adalah 500-600 mm. Berdasarkan pembacaan grafik Todd tersebut didapatkan luas daerah imbuhan yang berpengaruh terhadap debit mata air adalah 200-250 km^2 . Parameter lainnya yaitu fluktuasi muka air tanah rata-rata dari data muka air sumur

sebesar 1150 dangkal di daerah penelitian, digunakan dari hasil pemantauan muka air tanah adalah sebesar 1m/tahun. Fluktuasi muka air tanah ini bisa diperoleh juga berdasarkan data hidrograf muka air sumur berdasarkan grafik korelasi antara curah hujan dan muka air tanah serta presipitasi. Tetapi dalam hal ini diperlukan data curah hujan yang panjang dan kotinu, yang mungkin ada kaitan dengan data tersebut adalah debit yang teridentifikasi jelas selama musim kering atau mendekati awal musim hujan. Nilai S_y diperoleh dari hasil uji pompa sumur-sumur bor yang dipantau dalam jangka panjang, tetapi pada perhitungan ini nilai S_y diambil dari Tabel 3 yaitu 30 %, dengan asumsi material di lahan areal penelitian adalah berupa pasir.

Semua nilai dari parameter yang diperoleh tersebut di atas, kemudian digunakan dalam perhitungan besaran imbuhan dan hasilnya adalah sebesar 60-75 juta $m^3/tahun$. Oleh karena itu untuk mempertahankan debit mata air Umbulan sebesar 4 m^3/s , jumlah air yang harus menjadi imbuhan air tanah adalah harus lebih besar dari 75 juta $m^3/tahun$. Curah hujan rata-rata tahunan di daerah penelitian adalah 1600 mm, nilai ini cukup besar dan bisa menjadi imbuhan langsung dari resapan air hujan setempat. Di daerah hulu sebagian dari imbuhan yang meresap ke dalam air tanah bebas dan sebagian lagi akan mengimbuh air tanah terkekang. Potensi sumber air untuk imbuhan air tanah yang berasal dari air hujan bisa mencapai 400 juta $m^3/tahun$, melebihi besar imbuhan yang perlu dipertahankan. Oleh karena itu, agar seluruh air hujan dapat meresap langsung dan jumlahnya maksimal, penutup lahan yang harus dipertahankan dan nilai lepasan jenis (S_y) melebihi 20%, artinya daerah imbuhan harus poros (pasir dan kerikil). Kawasan lahan terbangun di daerah imbuhan perlu penataan kembali dan peruntukan lahan diupayakan untuk perkebunan pohon keras atau hutan.

Fluktuasi muka air tanah yang dalam hal ini dipresentasikan sebagai penurunan muka air tanah tidak diizinkan lagi mencapai 1 m/tahun, agar besaran imbuhan air tanah melebihi nilai 60-75 juta $m^3/tahun$. Adapun fluktuasi muka air tanah ini, selain dipengaruhi oleh curah hujan dan jenis penutup lahan, juga berkaitan dengan pengambilan air tanah yang bersumber dari sumur-sumur bor di sekitarnya, terutama di daerah imbuhan dan di daerah hilir mata air Umbulan. Hasil evaluasi diatas terdeteksi, bahwa pengambilan air tanah pada kondisi tahun 2008, sudah berlebih, artinya sudah melampaui dari besar imbuhan. Salah satu antipasi yang perlu dilakukan adalah pembatasan pengambilan air tanah di sekitar lokasi mata air Umbulan. Selain

Tabel 10 Hasil perhitungan model simulasi NAM pada DAS Rejoso, DAS Petung dan DAS Gembong

Catchment: Rejoso 186, Area= 201,70 km ²													
Period	Q-Obs	Q-sim	%diff	Rainfall	PotEvap	ActEvap	CapFlux	Recharge	Pumping	Irrig.	OF	IF	BF
2002 /5/16 - 2003 /5/16	2591.9	2632.1	-1.6	2139.5	1140.8	507.1	0.0	740.0	0.0	0.0	730.7	211.9	1689.5
2003 /5/16 - 2004 /5/16	2272.8	2233.1	1.7	2203.2	1085.5	470.8	0.0	735.8	0.0	0.0	726.8	295.1	1211.2
2004 /5/16 - 2005 /5/16	1786.7	1601.1	10.4	1559.5	1102.1	479.5	0.0	431.9	0.0	0.0	401.6	237.3	962.2
2005 /5/16 - 2006 /5/16	1594.2	1779.1	-11.6	2134.5	1039.2	605.0	0.0	624.3	0.0	0.0	615.3	285.6	878.2
2006 /5/16 - 2006 /5/16	2.8	2.7	6.8	0.0	2.9	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6
2002 /5/16 - 2006 /5/16	8248.4	8248.1	0.0	8036.8	4370.5	2063.4	0.0	2532.0	0.0	0.0	2474.4	1029.9	4743.7

Catchment: Gembong 68, Area= 40,97 km ²													
Period	Q-Obs	Q-sim	%diff	Rainfall	PotEvap	ActEvap	CapFlux	Recharge	Pumping	Irrig.	OF	IF	BF
2002 /1/1 - 2003 /1/1	1462.9	1606.6	-9.8	1653.5	1188.3	491.9	0.0	843.2	0.0	0.0	166.0	148.2	1292.4
2003 /1/1 - 2004 /1/1	1077.3	1274.5	-18.3	1452.0	1158.4	486.2	0.0	671.0	0.0	0.0	139.3	165.1	970.1
2004 /1/1 - 2005 /1/1	1247.4	934.0	25.1	1020.0	1136.1	371.9	0.0	447.5	0.0	0.0	91.7	116.3	725.9
2005 /1/1 - 2006 /1/1	997.3	970.8	2.7	1629.5	1128.2	655.2	0.0	648.8	0.0	0.0	129.8	180.6	660.4
2006 /1/1 - 2006 /1/1	4.9	5.7	-15.7	19.5	2.3	2.3	0.0	12.8	0.0	0.0	1.8	1.8	2.1
2002 /1/1 - 2006 /1/1	4789.9	4791.4	0.0	5774.5	4613.5	2007.5	0.0	2623.3	0.0	0.0	528.5	612.1	3650.8

Catchment: Petung 42, Area= 159,87 km ²													
Period	Q-Obs	Q-sim	%diff	Rainfall	PotEvap	ActEvap	CapFlux	Recharge	Pumping	Irrig.	OF	IF	BF
2002 /3/25 - 2003 /3/25	360.1	235.1	34.7	1569.0	1141.8	685.4	0.0	815.9	0.0	0.0	78.9	32.4	123.8
2003 /3/25 - 2004 /3/25	209.6	241.6	-15.3	894.0	1086.0	586.2	0.0	286.8	0.0	0.0	11.6	17.9	212.1
2004 /3/25 - 2005 /3/25	364.7	331.0	9.2	1313.0	1110.0	643.4	0.0	556.0	0.0	0.0	41.8	32.3	256.9
2005 /3/25 - 2006 /3/25	318.6	445.5	-39.8	1342.0	1050.8	635.6	0.0	610.6	0.0	0.0	52.3	41.8	351.3
2006 /3/25 - 2006 /3/25	1.0	2.1	-111.7	9.5	2.4	2.4	0.0	5.7	0.0	0.0	0.4	0.4	1.3
2002 /3/25 - 2006 /3/25	1253.9	1255.2	-0.1	5127.5	4391.0	2552.9	0.0	2274.9	0.0	0.0	184.9	124.9	945.4

Keterangan:

- | | | | |
|-----------------|---|-----------------|---|
| <i>Period</i> | : Periode simulasi (awal-akhir) | <i>CapFlux</i> | : <i>Capillary Flux</i> air dari air tanah ke <i>lower zone storage</i> |
| <i>Q-Obs</i> | : <i>Direct-Surface Runoff</i> terobservasi (m ³ /s) | <i>Recharge</i> | : <i>Recharge</i> air tanah |
| <i>Q-sim</i> | : <i>Direct-Surface Runoff</i> tersimulasi (m ³ /s) | <i>Pumping</i> | : Pemompaan air tanah |
| <i>%diff</i> | : Persentase kesalahan antara <i>Q-Obs</i> dan <i>Q-sim</i> | <i>Irrig.</i> | : Jumlah air irigasi |
| <i>Rainfall</i> | : Curah hujan(mm) | <i>OF</i> | : <i>Overland Flow/ Surface runoff</i> (mm) |
| <i>PotEvap</i> | : Evapotranspirasi Potensial (mm) | <i>IF</i> | : <i>Interflow</i> (mm) |
| <i>ActEvap</i> | : Evapotranspirasi Aktual(mm) | <i>BF</i> | : <i>Baseflow</i> (mm) |

pembatasan jumlah pengambilan air tanah, penataan dan penggunaan lahan dianjurkan untuk diperhatikan perubahannya.

6 Upaya konservasi

Air tanah di wilayah penelitian merupakan sumber daya atau yang sangat penting dalam kehidupan, hal ini bisa kita lihat pada penggunaan air tanah mulai dari hal sehari-hari sampai berkaitan dengan pembangunan berskala besar. Melihat kembali fungsi dari air tanah yang sangat penting tersebut, sangatlah wajar bila kita harus selalu menjaga dan memelihara kelestarian air tanah tersebut. Salah satu upaya yang sangat penting untuk dilakukan adalah konservasi air tanah, dengan melakukan tindakan penghutanan kembali. Konservasi ini harus dilakukan terpadu antara daerah imbuhan atau *recharge area* dan daerah lepasan atau *discharge area*. Salah satu daerah terpenting dalam konservasi air tanah adalah daerah imbuhan yang merupakan suatu daerah di mana air secara alami masuk ke dalam tanah. Di wilayah penelitian, penyebaran zone daerah imbuhan di bagian Barat yaitu di kecamatan Gempol dan kecamatan Prigen. Selanjutnya ke bagian Selatan yaitu di wilayah kecamatan Purwosari dan Purwodadi bagian Barat. Di bagian Timur wilayah penelitian meliputi seluruh kecamatan Tutur, Puspo, Tosari dan kecamatan Lumbang. Morfologi daerah ini berupa pegunungan, yang berfungsi sebagai daerah imbuhan, sehingga areal ini perlu dijaga kelestariannya (khususnya terhadap perubahan fungsi lahan), dan agar diupayakan menjadi areal perkebunan atau hutan. Konservasi di daerah ini harus dilakukan secara teliti, karena daerah imbuhan mempunyai karakteristik yang sangat khas dan unik, yang sudah tentu dalam penanganannya pun harus lebih khusus.

Berkaitan dengan rencana pemanfaatan mata air Umbulan yang berada di wilayah penelitian, untuk penyediaan air bersih di beberapa kota dan kabupaten di Jawa Timur, maka telah dilakukan perhitungan daerah imbuhan yang mempengaruhi debit mata air tersebut. Luas daerah imbuhan yang mempengaruhi kelestarian debit mata air dapat dihitung dengan cepat dan mudah menggunakan grafik dengan metode Todd, yaitu grafik hubungan antara luas daerah imbuhan dengan besaran imbuhan rata-rata tahunan.

Hasil pembacaan grafik Todd: luas daerah imbuhan yang perlu dijaga dan dilindungi, paling sedikit 200 km². Lokasi daerah imbuhan dengan luas 200 km² ini diperkirakan posisinya berada di atas Umbulan yakni di wilayah Kecamatan Lumbang, Puspo, dan Kecamatan Tosari sampai ke daerah lereng dan perbukitan Pegunungan

Tengger di wilayah Kabupaten Pasuruan. Wilayah yang berdekatan dengan daerah imbuhan Pasuruan menjadi satu kesatuan yang perlu diperhatikan pula, yaitu perubahan tata guna lahan di wilayah kabupaten Probolinggo, Lumajang, Malang dan kaki Gunung Semeru.

Penggunaan lahan di sekitar mata air pada saat ini belum disertai upaya konservasi, sehingga dapat memperkecil daya dan tingkat resapan, yang dalam jangka panjang dapat mempengaruhi kelestarian mata air Umbulan dan mata air lainnya di sekitar Umbulan, sebagai akibat penggunaan lahan hutan yang berlangsung mendadak ataupun gradual.

Besaran imbuhan air tanah tahunan yang dihasilkan dari hasil perhitungan proses model simulasi NAM adalah DAS Rejoso, DAS Petung, dan DAS Gembong. Nilai imbuhan yang bervariasi ini, akan mempresentasikan kondisi DAS-DAS tersebut. Gambaran kondisi DAS-DAS tersebut berkaitan dengan penggunaan lahan yang ada pada saat ini, yakni didominasi oleh sawah irigasi dan tegalan. Keberadaan hutan dan semak belukar hanya sebagian kecil dari wilayah DAS Rejoso dan empang sebagian kecil di wilayah DAS Petung. DAS Gembong banyak didominasi oleh sawah irigasi sehingga hasil perhitungan DAS Gembong mendapatkan nilai imbuhan air tanah terbesar 655,8 mm. Selain besaran imbuhan, parameter lain yang diperoleh dari hasil simulasi adalah curah hujan tahunan, evapotranspirasi potensial tahunan, evapotranspirasi aktual, aliran atas permukaan, aliran antara (*interflow*) dan aliran dasar tahunannya.

Selanjutnya semua hasil analisis yang diperoleh, digunakan dalam perhitungan potensi ketersediaan air dalam suatu cekungan air tanah, dan hasil akhir dari kegiatan ini kemudian digunakan dalam rangka pemanfaatan, pengelolaan dan pengembangan air tanah di wilayah penelitian.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis hidrologi pada cekungan air tanah Umbulan dengan menggunakan program NAM-MIKE 11, diperoleh nilai imbuhan air tanah tahunan. Nilai imbuhan yang dihasilkan tersebut bervariasi, tergantung pada kondisi daerah aliran sungai yang berada dalam CAT tersebut, yakni; DAS Rejoso: 633 mm, DAS Petung: 568,7 mm, dan DAS Gembong: 655,8 mm. Hasil perhitungan ini bisa digunakan dalam pemodelan air tanah, dalam rangka pengelolaan dan pengembangan air tanah yang akan datang dengan mengacu kepada azas keseimbangan agar pemanfaatan secara berkelanjutan. Dalam analisisnya, dilakukan pula

suatu pengembangan pengambilan air tanah yang tidak terkontrol dengan membuat beberapa skenario pengambilan air tanah. Hasil analisis telah memberikan beberapa usulan untuk melakukan berbagai upaya pengelolaan dan pengembangan. Salah satu upaya yang sangat penting untuk dilakukan adalah konservasi air tanah. Konservasi ini harus dilakukan terpadu antara daerah imbuhan dan daerah lepasan. Di CAT Umbulan, sebaran daerah imbuhan terdeteksi di bagian Barat wilayah penelitian, yakni di kecamatan Gempol dan kecamatan Prigen. Selanjutnya di bagian Selatan yaitu wilayah kecamatan Purwosari dan Purwodadi. Di bagian Timur wilayah penelitian meliputi seluruh kecamatan Tukur, Puspo dan Tosari dan kecamatan Lumbang. Daerah-daerah tersebut, berfungsi sebagai daerah imbuhan, sehingga perlu dijaga kelestariannya (khususnya terhadap perubahan fungsi lahan), dan agar diupayakan menjadi areal perkebunan atau hutan, terutama pada daerah dengan ketinggian topografi 275 m.dpl.

Hasil perhitungan dengan metode lain, yang pernah dilakukan oleh Nippon Koei pada tahun 1986, digunakan dalam analisis pemodelan air tanah dengan nilai imbuhan (*recharge*) sebesar berturut-turut 519 mm, 601 mm, 522 mm dan 608 mm, dan angka evapotranspirasi berturut-turut 940 mm, 981 mm, 998 mm dan 1155 mm. Besaran nilai-nilai imbuhan ini tidak menyimpang jauh dengan nilai imbuhan yang telah diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan program NAM-MIKE 11, yakni 633 mm, 568,7 mm dan 655,8 mm serta angka evapotranspirasi tahunan sebesar 1150 mm.

Metode perhitungan besaran imbuhan lainnya adalah menggunakan data hidrograf sumur dan dikombinasikan dengan perhitungan menggunakan grafik metode Todd. Parameter-parameter yang digunakan adalah luas daerah imbuhan hasil dari grafik Todd, fluktuasi muka air tanah dan nilai S_y , menghasilkan nilai imbuhan sebesar 60-75 juta m^3 /tahun. Potensi sumber air untuk imbuhan air tanah yang berasal dari air hujan yang bisa mencapai 400 juta m^3 /tahun ini, melebihi jumlah air yang diperlukan untuk imbuhan sebesar 75 juta m^3 /tahun.

Dalam metode analisis untuk penilaian dan perhitungan imbuhan air tanah ini, banyak ketidakpastian, maka dianjurkan agar dicoba sebanyak mungkin cara yang digunakan dalam penelitian, sehingga hasil setiap cara dapat dibandingkan dengan cara yang lain. Metode yang telah tersedia untuk menilai dan menghitung besaran imbuhan air tanah secara langsung, adalah dari data hujan dan model NAM.

Pemilihan dari metode-metode perlu juga berpedoman kepada sasaran hasil dari penelitian, yakni tersedianya data dan berbagai kemungkinan untuk mendapatkan data pengganti. Tanpa teknik penilaian secara menyeluruh yang merupakan satu kesatuan dari metode penentuan imbuhan yang telah tersedia, akan didapatkan hasil-hasil yang tidak bisa dipercaya.

Dengan penghutanan kembali daerah *recharge* diharapkan terjadi *sustainability* yang tinggi dari mata air Umbulan pada debit yang tinggi, bisa mengurangi terjadinya longsoran, mengurangi tingkat sedimentasi dan pada akhirnya mengurangi debit banjir yang seharusnya tidak terjadi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada rekan-rekan kami, anggota tim kegiatan Penelitian Hidrogeologi Daerah Umbulan, yang telah membantu dan memberikan kesempatan kepada penulis untuk dapat menyajikan tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adidarma, Hadihardaja & Legowo (2004), *Perbandingan Pemodelan Hujan Limpasan antara Artificial Neural Network (ANN) dan Nreca*, Jurnal Teknik Sipil vol II No 3 Juli 2004, ISSN 0853-2982 hal 105-115
- Bappeda Kabupaten Pasuruan, 2003, *Review RTRW Kab. Pasuruan*, Pemerintah Daerah Kabupaten Pasuruan
- Binnie & Partners, 1983, "*Guideline BP 11 Groundwater Evaluation for Water Resources Projects*", Binnie & Partners Ltd., tak diterbitkan.
- Davis, S.N & Wiest, R.J.de, 1969, *Hydrogeology*, John Wiley and Sons, Chichester.
- DHI Water & Environment, 2007, *A modelling system for Rivers and Channels User Guide*, DHI Software 2007.
- Nippon Koei, et al, 1986. *East Java Groundwater Development*. Main Report. Vol. I. Nippon Koei Co, Ltd, ELC-Electroconsult, PT. Wiratman & Associates
- Pusat Lingkungan Geologi, 2007, *Pedoman dan Panduan Teknis Pengelolaan Air Tanah*, Departemen Energi Dan Sumber Daya Mineral, Jakarta.
- Rushton, 2003, *Groundwater Hydrology Conceptual and computational models*, John Wiley and Sons, Chichester

Sembiring,S.F., 2004, *Kebijakan Nasional Pengelolaan Air Tanah*,Lokakarya Kebijakan Nasional Pengelolaan Air Tanah, Direktorat Tata Lingkungan Geologi dan Kawasan Pertambangan, Bandung

Sihwanto, 2006, *Penyelidikan Konservasi Air Tanah di Cekungan Air Tanah Pasuruan Provinsi Jawa Timur*, Pusat Lingkungan Geologi, Badan Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung