

Simulasi Dampak Perubahan Tutupan Lahan dan Iklim di DAS Citarum Hulu dengan Model GenRiver: Kalibrasi model dan analisa sensitivitas

Lisa Tanika, Betha Lusiana, Adis Hendriatna



Simulasi Dampak Perubahan Tutupan Lahan dan Iklim di DAS Citarum Hulu dengan Model GenRiver: Kalibrasi model dan analisa sensitivitas

Lisa Tanika, Betha Lusiana, Adis Hendriatna

Working paper no. 309



Correct citation

Tanika L, Lusiana B, Hendriatna A. 2020. *Simulasi Dampak Perubahan Tutupan Lahan dan Iklim di DAS Citarum Hulu dengan Model GenRiver: Kalibrasi model dan analisa sensitivitas*. Working paper no. 309. Bogor, Indonesia: World Agroforestry (ICRAF) Southeast Asia Regional Program. DOI: <http://dx.doi.org/10.5716/WP20048.PDF>

Titles in the Working Paper series disseminate interim results on agroforestry research and practices to stimulate feedback from the scientific community. Other publication series from the World Agroforestry include agroforestry perspectives, technical manuals and occasional papers.

Published by World Agroforestry
Southeast Asia Regional Program
PO Box 161, Bogor 16001
Indonesia

Tel: +62 251 8625415
Fax: +62 251 8625416
Email: icraf-indonesia@cgiar.org
Website: <http://worldagroforestry.org/regions/SEA>

© World Agroforestry 2020
Working Paper no. 309

Photographs:

The views expressed in this publication are those of the author(s) and not necessarily those of the World Agroforestry Articles appearing in this publication may be quoted or reproduced without charge, provided the source is acknowledged. All images remain the sole property of their source and may not be used for any purpose without written permission of the source.

Tentang Penulis

Lisa Tanika bergabung dengan World Agroforestry pada tahun 2008 hingga 2017 sebagai seorang ahli model ekologi. Lisa berlatar belakang pendidikan S1 Matematika dan S2 Klimatologi Terapan dari Institut Pertanian Bogor dan saat ini sedang mengikuti program S3 di Universiats Wageningen, Belanda. Riset yang ia tekuni berfokus pada pemanfaatan model Generic River Flow (GenRiver) untuk menganalisis fungsi DAS, khususnya untuk mengetahui dampak perubahan tutupan lahan dan perubahan iklim terhadap keseluruhan fungsi hidrologi sebuah DAS. Lisa menaruh minat yang besar terhadap pengembangan dan penerapan pendekatan partisipatoris bagi para pemangku kepentingan terkait dalam memonitor fungsi DAS.

Betha Lusiana adalah peneliti World Agroforestry di bidang pemodelan ekologi. Gelar doktor diperolehnya dari Universitas Hohenheim University dengan kajian pemanfaatan model dalam pengelolaan sumber daya alam. Selama ini, penelitiannya berfokus pada trade-offs antara pengembangan pertanian, khususnya agroforestry dengan penghidupan petani dan jasa lingkungan dengan menggunakan simulasi model atau pendekatan kuantitatif yang partisipatoris. Selain itu, Betha menaruh minat pada pengembangan kapasitas peneliti di bidang pemodelan dan pendekatan kuantitatif lainnya, seperti metode statistik untuk mengevaluasi fungsi jasa lingkungan bentang alam.

Adis Hendriatna adalah asisten penginderaan jauh & GIS di ICRAF sejak tahun 2018. Adis memiliki latar belakang pendidikan analisa lingkungan dan GIS dalam pendidikan S1 Kehutanan di Institut Pertanian Bogor dan telah berpengalaman lebih dari 8 tahun bekerja sama dengan tim ilmuwan multidisiplin, terutama dibidang spesialis penginderaan jauh, perubahan iklim, pertumbuhan hijau, dan analisa penggunaan lahan. Adis juga aktif dalam membangun beberapa tools berbasis GIS dan terlatih melakukan kegiatan lapangan baik menggunakan GPS maupun drone (pemetaan udara).

Abstrak

Alih guna lahan dan perubahan iklim merupakan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi kondisi hidrologi di suatu Daerah Aliran Sungai (DAS), dan yang dapat mempengaruhi efektifitas fungsi DAS dalam mempertahankan keseimbangan neraca air di tingkat bentang alam. Oleh karena itu pengelolaan DAS yang didukung dengan perencanaan DAS terpadu yang juga mengatur peruntukan dan pemanfaatan wilayah sangat diperlukan. Langkah awal dalam perencanaan DAS adalah dengan menilai kondisi fungsi hidrologi DAS tersebut dengan tujuan mengetahui apakah DAS mulai atau telah mengalami degradasi, atau sebaliknya mulai mengalami perbaikan fungsi DAS. Model simulasi seperti model Genriver dapat digunakan menilai kondisi saat ini serta memproyeksikan bagaimana dampak perubahan lahan dan iklim terhadap kondisi hidrologis DAS. Salah satu DAS penting di Jawa Barat adalah DAS Citarum Hulu sebagai bagian dari DAS Citarum yang telah ditetapkan sebagai salah satu DAS prioritas nasional. Kalibrasi model dan analisis sensitivitas menjadi bagian penting untuk mengetahui kelayakan suatu model hidrologi dalam mensimulasikan kondisi DAS, khususnya dalam mengestimasi neraca air di tingkat lansekap. Hasil kalibrasi model GenRiver dengan menggunakan data tahun 2012-2016 menunjukkan bahwa parameterisasi model telah berhasil dan model layak digunakan untuk analisa sensitivitas dan simulasi skenario. Hasil simulasi model, menunjukkan bahwa secara rata-rata 37% curah hujan yang jatuh di DAS Citarum Hulu menjadi aliran permukaan (*surface flow/run-off*), 7% menjadi aliran bawah permukaan (*sub-surface flow*) dan 20% menjadi aliran dasar (*baseflow*). Analisa sensitivitas dilakukan dengan menyusun lima skenario tutupan lahan dan tiga skenario curah hujan yang dianggap mewakili berbagai kondisi yang mungkin termasuk kondisi ekstrim: yaitu keseluruhan lahan menjadi area terbuka (ekstrim negatif) dan seluruh lahan menjadi hutan (ekstrim positif). Hasil proyeksi simulasi ekstrim negatif menunjukkan bahwa kondisi DAS Citarum Hulu yang terdegradasi dengan dominasi lahan terbuka berpotensi meningkatkan aliran permukaan hingga mencapai 70% dari curah hujan. Sedangkan perbaikan tutupan lahan DAS Citarum hulu dengan reforestasi (skenario ekstrim positif) mampu menurunkan aliran permukaan hingga mencapai 20% dari total curah hujan.

Kata Kunci

Analisis sensitivitas, DAS Citarum, model hidrologi, model Genriver, fungsi hidrologi DAS, dampak perubahan lahan dan iklim

Ucapan Terima kasih

Studi ini didanai oleh ACIAR melalui proyek ‘Agricultural Policy Research to Support Natural Resource Management in Indonesia’s Upland Landscapes - ADP/2015/043’. Kami mengucapkan terimakasih kepada the Indonesian Centre for Agriculture Socio-Economic and Policy Studies (ICASEPS) yang telah memfasilitasi penyediaan pendanaan tersebut. Teknik penilaian hidrologis menggunakan model GenRiver beserta hasil kalibrasi dan analisa sensitivitas di DAS Citarum Hulu telah dipaparkan pada pelatihan di bulan Desember 2019 yang diselenggarakan oleh ICASEPS. Penulis mengucapkan terimakasih kepada peserta pelatihan atas masukan yang diberikan selama pelatihan, khususnya kepada Dr. Ir. Erwidodo, MS dan Henri Wira Perkasa MSc.

Daftar Isi

Tentang Penulis	i
Abstrak	ii
Kata Kunci	ii
Ucapan Terima kasih.....	iii
1. Pendahuluan.....	1
2. Metodologi.....	4
Model GenRiver.....	4
Tahapan Pemodelan	5
Kalibrasi, Analisa Sensitivitas dan Evaluasi Model.....	7
Skenario Perubahan Tutupan Lahan dan Iklim	9
3. Karakteristik Lokasi Penelitian.....	11
Sub-DAS dan Jarak Aliran Air.....	11
Data Iklim dan Hidrologi	12
Tutupan Lahan.....	13
Jenis Tanah.....	15
4. Uji kesesuaian data iklim dan hidrologi	16
5. Hasil dan Pembahasan	17
Kalibrasi dan Evaluasi Model GenRiver.....	17
Simulasi Dampak Perubahan Tutupan Lahan terhadap Kondisi DAS Citarum Hulu Tahun 2012-2018	19
Simulasi Skenario Perubahan Tutupan Lahan dan Iklim Terhadap Kondisi DAS Citarum Hulu di Masa Depan (2019-2028).....	21
6. Kesimpulan dan Rekomendasi	25
Daftar Pustaka	26

Daftar Tabel

Tabel 1. Data minimum yang diperlukan untuk mensimulasikan Model GenRiver	5
Tabel 2. Acuan kinerja model dalam memprediksi debit sungai berdasarkan nilai bias.....	8
Tabel 3. Acuan kinerja model dalam memprediksi debit sungai berdasarkan nilai NSE.....	9
Tabel 4. Skenario perubahan tutupan lahan dan iklim di DAS Citarum Hulu	9
Tabel 3. Luas area dan jarak routing masing-masing Sub-DAS di DAS Citarum Hulu	12
Tabel 4. Luas area masing-masing jenis tutupan lahan di DAS Citarum Hulu.....	14
Tabel 5. Hasil parameterisasi Model GenRiver untuk DAS Citarum Hulu	17
Tabel 6. Hasil Kalibrasi dan validasi Model GenRiver untuk DAS Citarum Hulu.....	18
Tabel 7. Kondisi neraca air DAS Citarum Hulu selama 6 tahun (2012-2018) hasil simulasi model GenRiver	20
Tabel 8. Persentase komponen neraca air untuk berbagai skenario perubahan lahan dan iklim tahun 2028 di DAS Citarum Hulu.....	22

Daftar Gambar

Gambar 1. Peta DAS Citarum Hulu.	2
Gambar 2. Inti model GenRiver yang merupakan gabungan dari neraca air di tingkat sub-DAS menjadi tingkat DAS	5
Gambar 3. Tahapan pemodelan hidrologi dengan menggunakan Model GenRiver.....	6
Gambar 4. Kombinasi skenario perubahan tutupan lahan dan iklim.....	10
Gambar 5. Sub-DAS dari DAS Citarum Hulu.....	11
Gambar 6. Sebaran stasiun curah hujan dan hidrologi yang ada di DAS Citarum Hulu.....	13
Gambar 7. Peta tutupan lahan DAS Citarum Hulu.....	14
Gambar 8. Peta jenis tanah di DAS Citarum Hulu	15
Gambar 9. Hasil analisis kumulatif curah hujan dan debit tahun 2012-2017.....	16
Gambar 10. Perbandingan hidrograf antara data pengukuran di Stasiun Nanjung dengan hasil simulasi Model GenRiver	18
Gambar 11. Hasil perbandingan kumulatif curah hujan dan kumulatif debit antara hasil pengukuran di stasiun Nanjung dan hasil simulasi Model GenRiver	19

Gambar 12. Simulasi neraca air DAS Citarum Hulu tahun tahun 2012-2018 (kiri) dan hubungan antara perubahan curah hujan dengan jumlah aliran (kanan)	20
Gambar 13. Pengaruh perubahan tutupan lahan dan curah hujan terhadap aliran permukaan, aliran bawah permukaan di DAS Citarum Hulu	21
Gambar 14. Hasil simulasi neraca air DAS Citarum hulu tahun 2028 berdasarkan berbagai skenario perubahan tutupan lahan dan iklim	22
Gambar 15. Tren perubahan komponen neraca air tahun 2019-2028 untuk berbagai skenario perubahan tutupan lahan dan iklim.	23
Gambar 16. Simulasi dampak perubahan tutupan lahan dan iklim di DAS Citarum Hulu 2019-2028	24

1. Pendahuluan

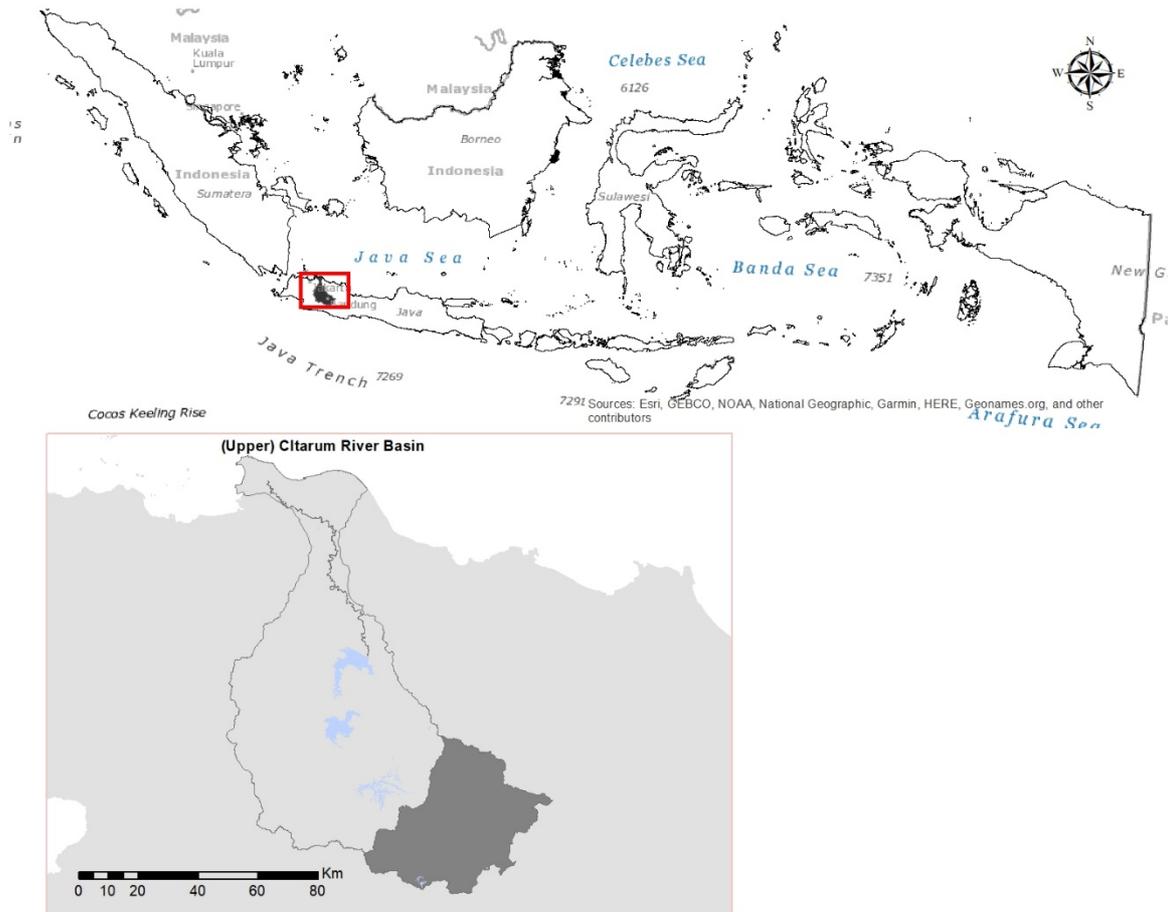
Daerah Aliran Sungai (DAS) sebagai daerah tangkapan air berperan dalam mendukung kehidupan yang ada didalamnya. Kerusakan DAS dapat memicu berbagai bencana alam seperti banjir, longsor dan kekeringan. Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi kondisi DAS, diantaranya adalah tutupan lahan dan iklim. Guo et al (2008) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa perubahan tutupan lahan berpengaruh terhadap total debit tahunan dalam suatu DAS. Oleh karena itu pengelolaan DAS terutama pengelolaan tutupan lahan yang tepat harus dilakukan untuk mempertahankan kondisi DAS serta mengurangi permasalahan yang timbul.

Menurut Peraturan Pemerintah No 37 tahun 2012 tentang Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, pengelolaan DAS didefinisikan sebagai upaya manusia dalam mengatur hubungan timbal balik antara sumber daya alam dengan manusia di dalam DAS dan segala aktivitasnya, agar terwujud kelestarian dan keserasian ekosistem serta meningkatnya kemanfaatan sumberdaya alam bagi manusia secara berkelanjutan. Tahap pertama dalam pengelolaan DAS tersebut adalah perencanaan yang terdiri dari inventarisasi, penyusunan rencana pengelolaan DAS dan penetapan rencana pengelolaan DAS. Kegiatan inventarisasi disini dapat berupa penetapan batas DAS dan penilaian DAS untuk pengklasifikasian ketegori sebagai yang dipertahankan dan dipulihkan daya dukungnya¹.

Dengan luas area 6,617 km², DAS Citarum menjadi salah satu DAS utama di Jawa dan di Indonesia karena perannya sebagai penyedia air bersih, pasokan energi (listrik di Jawa dan Bali) dan pendukung ketahanan pangan karena sebagai sumber irigasi persawahan (Kurniasih N, 2002 dan BBWS, 2016). Namun demikian kondisi DAS Citarum baik secara kualitas dan kuantitas rentan terhadap permasalahan perubahan tata guna lahan, dann terhadap perubahan iklim. Dalam perencanaan DAS, DAS Citarum dibagi menjadi 3 bagian yaitu berdasarkan topografinya, yaitu: (a) DAS Citarum Hulu yang bermuara di Waduk Saguling, (b) DAS Citarum tengah yang bermuara di Waduk Cirata dan (c) DAS Citarum Hilir yang bermuara di Waduk Jatiluhur. Secara umum fungsi DAS bagian hulu dicirikan sebagai daerah konservasi mempunyai arti penting terutama dari segi perlindungan fungsi tata air, karena itu setiap terjadinya kegiatan di daerah hulu akan menimbulkan dampak di daerah hilir dalam bentuk perubahan fluktuasi debit dan transport sedimen serta material terlarut dalam sistem aliran airnya. Oleh karenanya pengelolaan DAS hulu seringkali menjadi fokus perhatian

¹ Peraturan Kementerian Kehutanan No 60 tahun 2014 tentang Kriteria Penetapan Klasifikasi Daerah Aliran Sungai.

Studi ini bertujuan untuk menilai fungsi hidrologis DAS Citarum Hulu (Gambar 1). Salah satu cara untuk menilai kondisi DAS adalah berdasarkan pola debit dan neraca air, dimana hal ini dapat dilakukan dengan bantuan model hidrologi. Model hidrologi merupakan suatu representasi matematik sistem respons DAS sehingga dapat dipakai untuk mensimulasikan kondisi input-output dari DAS. Melalui model hidrologi tersebut dapat diprediksi besarnya perubahan debit air yang terjadi sebagai akibat adanya perubahan dalam DAS di masa yang akan datang. Selain itu keberadaan model juga dapat menghemat biaya, tenaga dan waktu dalam proses penelitian untuk membantu pengambilan kebijakan yang menunjang rencana pengelolaan DAS.



Gambar 1. Peta DAS Citarum Hulu.

Salah satu model hidrologi yang dikembangkan oleh World Agroforestry (ICRAF) adalah model Generic River Flow atau GenRiver (Van Noordwijk et al (2011). GenRiver merupakan suatu model hidrologi yang mensimulasikan dampak perubahan tutupan lahan terhadap kondisi hidrologi. Kondisi hidrologi disini mengacu pada neraca air atau kesetimbangan air yang dilihat dari besarnya evapotranspirasi, aliran permukaan (*surface flow*), aliran bawah permukaan (*subsurface flow*) dan aliran dasar (*base flow*). Selain mengestimasi neraca air di tingkat bentang alam, GenRiver juga dapat untuk melihat tren perubahan komponen neraca air selama periode waktu tertentu dan menjawab pertanyaan seperti ada tidaknya peningkatan aliran permukaan dan penurunan aliran dasar.

Tahap awal dari penilaian fungsi hidrologis suatu DAS melalui pemodelan adalah evaluasi model apakah layak digunakan untuk penilaian fungsi hidrologi di suatu DAS tertentu.

Tulisan ini merupakan bagian pertama dari dua buah tulisan yang didasarkan pada studi mengenai penilaian fungsi DAS Citarum Hulu menggunakan pendekatan simulasi model. Dalam tulisan pertama ini, akan dipaparkan mengenai kalibrasi model GenRiver dan analisa sensitivitas model terhadap skenario perubahan penggunaan lahan dan perubahan jumlah curah hujan. Tulisan yang kedua akan memaparkan penilaian fungsi hidrologi berdasarkan skenario intervensi penegelolaan lahan pertanian dan implikasinya bagi kebijakan di daerah DAS Citarum Hulu.

Tulisan in membahas mengenai:

1. Proses kalibrasi model Genriver dengan menganalisa dampak perubahan tutupan lahan dalam periode tahun 2012-2018 terhadap kondisi DAS Citarum hulu
2. Proses analisa sensitivitas dengan mengestimasi dan meproeksi dampak berbagai skenario perubahan tutupan lahan dan iklim terhadap DAS Citarum pada periode tahun 2019-2028.

2. Metodologi

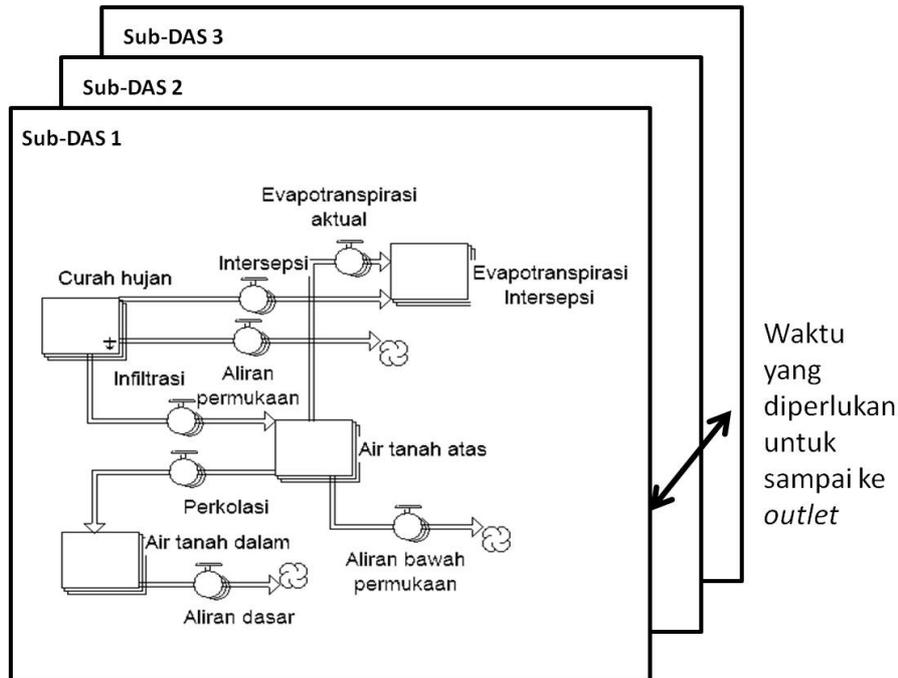
Model GenRiver

Model Generic Riverflow (GenRiver) merupakan suatu model sederhana yang mensimulasikan aliran sungai pada suatu DAS atas dasar konversi neraca air dari tingkat plot ke dalam tingkat DAS. Model ini dikembangkan oleh World Agroforestry Centre (ICRAF) untuk membantu menilai secara cepat kondisi suatu DAS dengan bantuan model hidrologi. Model GenRiver telah diaplikasikan pada berbagai kondisi DAS baik di Indonesia maupun di luar Indonesia dengan luasan antara 6 – 9,800 km². Penilaian secara cepat didefinisikan sebagai penilaian dengan menggunakan data-data hidroklimat yang tersedia secara publik dari berbagai sumber termasuk lembaga pemerintah dan lembaga penelitian lainnya. Kajian juga dilakukan dengan meminimalisasi pengambilan data primer, yang umumnya membutuhkan waktu yang lama. Kegiatan penilaian hidrologis umumnya berlangsung sekitar 6 bulan.

Model GenRiver menggunakan persamaan kesetimbangan (neraca) air yang ditunjukkan melalui persamaan 1. Persamaan ini mengasumsikan suatu sistem tata air tertutup pada suatu bentang lahan dimana curah hujan akan dialirkan menjadi debit sungai (Q), evapotranspiration (E) dan air tanah (ΔS).

$$P = Q + E + \Delta S \quad (1)$$

Konsep inti dari model GenRiver adalah neraca air harian pada tingkat plot yang dihasilkan oleh curah hujan harian dan dipengaruhi oleh perubahan tutupan lahan (Van Noordwijk et al 2011). Keluaran (*output*) dari neraca air tingkat plot ini adalah hasil air (*water yield*) yang merupakan penjumlahan dari aliran permukaan (*surface flow*), aliran bawah permukaan (*subsurface flow*) dan aliran dasar (*base flow*). Selanjutnya hasil air dikonversi menjadi debit pada tingkat bentang lahan (*watershed*) melalui jaringan sungai (jarak ke final *outlet*). Gambar 2 merupakan ilustrasi konsep dan modul yang berada dalam model GenRiver. Data yang diperlukan untuk dapat mensimulasikan model GenRiver terdiri dari data spasial, iklim dan hidrolog (Tabel 1).



Gambar 2. Inti model GenRiver yang merupakan gabungan dari neraca air di tingkat sub-DAS menjadi tingkat DAS

Tabel 1. Data minimum yang diperlukan untuk mensimulasikan Model GenRiver

No	Input	Periode	Jumlah data minimum	
1	Iklim	Curah hujan	Harian	10 tahun data
		Suhu	Harian atau bulanan	1 tahun data
		Evaporasi dari (Pan evaporation)	Harian atau bulanan	1 tahun data
2	Hidrologi	Debit sungai	harian	10 tahun data
3	Spasial	Peta tutupan lahan	-	2 tahun transisi
		Peta tanah	-	-
		Peta DEM ^{*)}	-	-
		Peta sungai	-	-

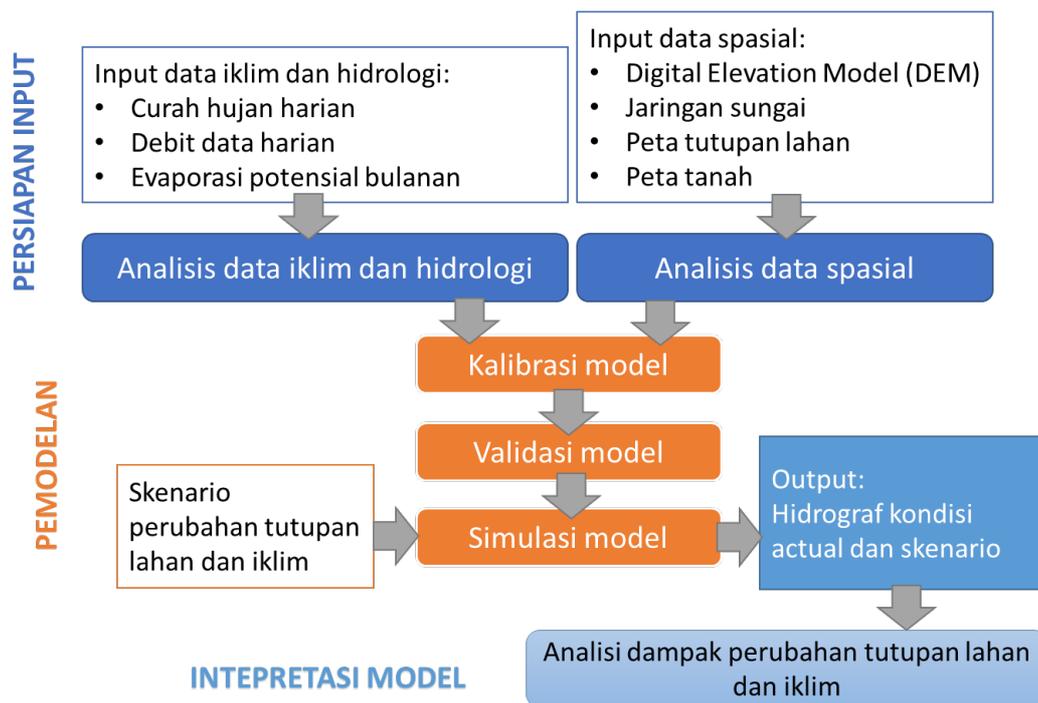
Tahapan Pemodelan

Terdapat tiga tahapan dalam melakukan pemodelan hidrologi menggunakan model GenRiver untuk memenuhi tujuan penelitian ini (Gambar 3).

- a. **Persiapan input model GenRiver.** Tahap ini merupakan persiapan semua input yang diperlukan untuk mensimulasikan model GenRiver termasuk proses pengumpulan dan analisis data. Data yang telah dikumpulkan selanjutnya dianalisis dan disusun sesuai dengan format yang diperlukan oleh model GenRiver. Pengumpulan informasi kondisi DAS dari berbagai pemangku kepentingan (masyarakat, pemerintah, LSM, perusahaan pemanfaat air atau yang ada di area DAS) juga

diperlukan sebagai informasi dalam menyusun skenario perubahan tutupan lahan. Proses analisis data iklim, hidrologi dan spasial lebih lanjut dapat dilihat pada Khasanah et al (2010).

- b. **Pemodelan hidrologi menggunakan Model GenRiver.** Tahap pemodelan hidrologi dengan model GenRiver dimulai dengan tahap kalibrasi dan validasi model. Kalibrasi merupakan suatu proses penyesuaian beberapa nilai parameter (parameterisasi) dalam model dengan tujuan agar hasil simulasi menyerupai kondisi DAS sebenarnya (Kumarasamy dan Belmont, 2018. Nilai-nilai parameter yang disesuaikan pada umumnya merupakan parameter yang sulit dan memerlukan waktu dan biaya yang cukup besar untuk diukur seperti tingkat infiltrasi, kapasitas maksimum tanah, kekasaran sungai. Validasi merupakan proses perbandingan antara debit hasil simulasi model dengan debit sebenarnya atau pengukuran di lapangan. Setelah tahap kalibrasi dan validasi selesai, tahap selanjutnya adalah mensimulasikan berbagai skenario perubahan tutupan lahan untuk melihat dampaknya terhadap neraca air.
- c. **Intepretasi model.** Tahap ini merupakan tahap akhir, dimana kita membandingkan hasil simulasi berbagai skenario perubahan tutupan lahan dan iklim. Keluaran dari tahap ini dapat menjadi bahan pertimbangan dalam membuat rencana pengelolaan DAS dimasa depan.



Gambar 3. Tahapan pemodelan hidrologi dengan menggunakan Model GenRiver

Kalibrasi, Analisa Sensitivitas dan Evaluasi Model

Kalibrasi, analisa sensitivitas dan evaluasi model adalah kegiatan yang dilakukan pada tahapan awal pemodelan, yang dilakukan untuk menentukan kelayakan model dan parameterisasinya. Seperti yang telah disampaikan sebelumnya, kalam mensimulasikan suatu DAS tertentu.

Kalibrasi merupakan suatu proses penentuan nilai parameter yang tidak diukur dari karakteristik DAS dalam suatu model. Kalibrasi umum dilakukan dalam model hidrologi untuk menentukan nilai sekelompok parameter, sehingga hasil simulasi debit oleh model mendekati nilai debit yang sebenarnya (Kumarasamy dan Belmont, 2018). Meskipun proses kalibrasi tidak dapat memperbaiki kesalahan fundamental seperti struktur model dan kualitas data, proses kalibrasi merupakan tahapan penting dan perlu dilakukan untuk meningkatkan keterandalan (*reliability*) aplikasi model hidrologi.

Analisa sensitivitas dalam pemodelan bertujuan mengukur pengaruh perubahan suatu parameter terhadap faktor lainnya termasuk perubahan hasil simulasi. Dalam pemodelan, khususnya pemodelan hidrologi, kalibrasi dan analisa sensitivitas umum dilakukan secara bersamaan untuk menilai kelayakan aplikasi sebuah model. Dalam studi ini analisa sensitivitas ditujukan untuk melihat kepekaan model dalam mensimulasikan berbagai skenario. Kelayakan akan dinilai dari kemampuan mensimulasikan perubahan neraca air di bentang lahan dalam rentang dua skenario ekstrim.

Evaluasi model sering juga disebut sebagai validasi model merupakan proses penentuan apakah model secara konsep sudah merupakan penyerdehanaan yang mewakili suatu sistem nyata. Terdapat banyak macam metode validasi, dan dalam konteks studi ini, validasi model GenRiver dilakukan dengan membandingkan output simulasi dengan pengamatan/pengukuran lapang. Ada tiga (3) indikator yang digunakan untuk mengukur seberapa dekat debit hasil simulasi dengan debit pengukuran: (i) bias, (ii) koefisien korelasi dan (iii) Nash-Sutcliffe Efficiency. Dalam studi ini, masing-masing indikator dihitung untuk pengamatan harian selama satu tahun untuk setiap tahun periode kalibrasi dan evaluasi 2012-2014.

Bias (%) mengukur selisih antara total debit sungai harian hasil pengamatan (y_{obs}) dengan total debit sungai harian yang dihasilkan simulasi (y_{sim}), dihitung dengan menggunakan persamaan 2 dengan menggunakan acuan kinerja sesuai Tabel 2.

$$Bias = \frac{\sum(y_{obs} - y_{sim})}{\sum y_{obs}} \times 100\% \quad (2)$$

Tabel 2. Acuan kinerja model dalam memprediksi debit sungai berdasarkan nilai bias.

Bias	Kinerja model
$ \text{Bias} < 10$	Sangat baik
$10 \leq \text{Bias} < 15$	Baik
$15 \leq \text{Bias} < 25$	Cukup
$ \text{Bias} \geq 25$	Kurang

Koefisien Korelasi (r) mengukur seberapa mirip *trend/pola* yang dihasilkan total debit sungai harian hasil pengamatan (x) dengan total debit sungai harian yang dihasilkan simulasi (y) dengan jumlah data (n) tertentu, dihitung menggunakan persamaan 3.

$$\begin{aligned}
 S_{xx} &= \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \\
 S_{yy} &= \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \\
 S_{xy} &= \sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n} \\
 R &= \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Nilai $r > 0.65$ menunjukkan model cukup memuaskan dalam mensimulasikan debit sungai dan sebaliknya nilai $r \leq 0.65$ menunjukkan model kurang memuaskan dalam mensimulasikan debit sungai.

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) mengukur keragaman sisaan (*residual variance*) model relative terhadap keragaman data pengamatan (Moriassi DN, et al, 2007). NSE bernilai diantara $-\infty$ (tak terhingga) dan 1, diukur dengan persamaan 4 dengan nilai acuan dalam Tabel 3.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right] \tag{4}$$

Dengan Y_i^{obs} sebagai debit sungai harian hasil pengamatan, Y_i^{sim} merupakan debit sungai harian hasil simulasi, Y^{mean} merupakan rata-rata debit sungai bulanan hasil pengamatan dan n adalah jumlah data yang diamati.

Tabel 3. Acuan kinerja model dalam memprediksi debit sungai berdasarkan nilai NSE

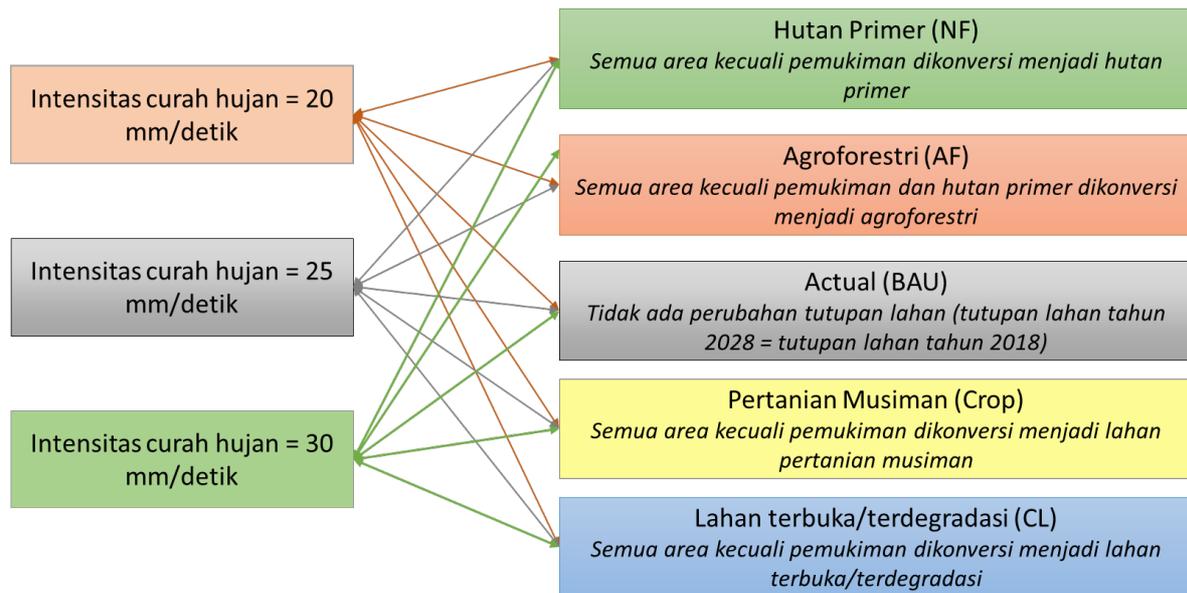
Bias	Kinerja model
$0.75 < NSE \leq 1.00$	Sangat baik
$0.65 < NSE \leq 0.75$	Baik
$0.50 < NSE \leq 0.65$	Cukup
$NSE \leq 0.5$	Kurang

Skenario Perubahan Tutupan Lahan dan Iklim

Terdapat lima skenario perubahan tutupan lahan dan tiga skenario perubahan iklim yang disimulasikan untuk sepuluh tahun mendatang (2019 – 2028). Tabel 2 memberikan gambaran skenario perubahan tutupan lahan dan iklim yang akan disimulasikan di DAS Citarum hulu. Skenario hutan primer (NF) dan skenario lahan terbuka (CL) merupakan skenario paling ideal untuk menunjukkan kondisi terbaik dan terburuk DAS Citarum Hulu. Skenario BAU dan skenario intensitas curah hujan 25 mm/detik merupakan kondisi saat ini (2018) yang akan digunakan sebagai dasar (*baseline*) untuk skenario-skenario yang lainnya. Model GenRiver akan disimulasikan berdasarkan kombinasi antara skenario perubahan tutupan lahan dan iklim (Gambar 4). Secara keseluruhan, ada 15 skenario yang dijalankan dalam studi ini.

Tabel 4. Skenario perubahan tutupan lahan dan iklim di DAS Citarum Hulu

Skenario	Deskripsi	
Skenario perubahan lahan	Hutan primer (NF)	Semua area, kecuali pemukiman diubah menjadi hutan primer
	Agroforestri (AF)	Semua are, kecuali pemukiman dan hutan diubah menjadi agroforestri
	Bussiness as Usual (BAU)	Tidak ada perubahan tutupan lahan (tutupan lahan tahun 2028 sama dengan tutupan lahan tahun 2018)
	Pertanian tanaman semusim (CR)	Semua area kecuali pemukiman dikonversi menjadi lahan pertanian semusim
	Lahan terbuka/terdegradasi (CL)	Semua area, kecuali permukiman dikonversi menjadi lahan terbuka/terdegradasi
Skenario perubahan iklim	I = 20 mm/detik	Intensitas curah hujan 20 mm/detik
	I = 25 mm/detik	Intensitas curah hujan 25 mm/detik, kondisi Business as Usual
	I = 30 mm/detik	Intensitas curah hujan 30 mm/detik



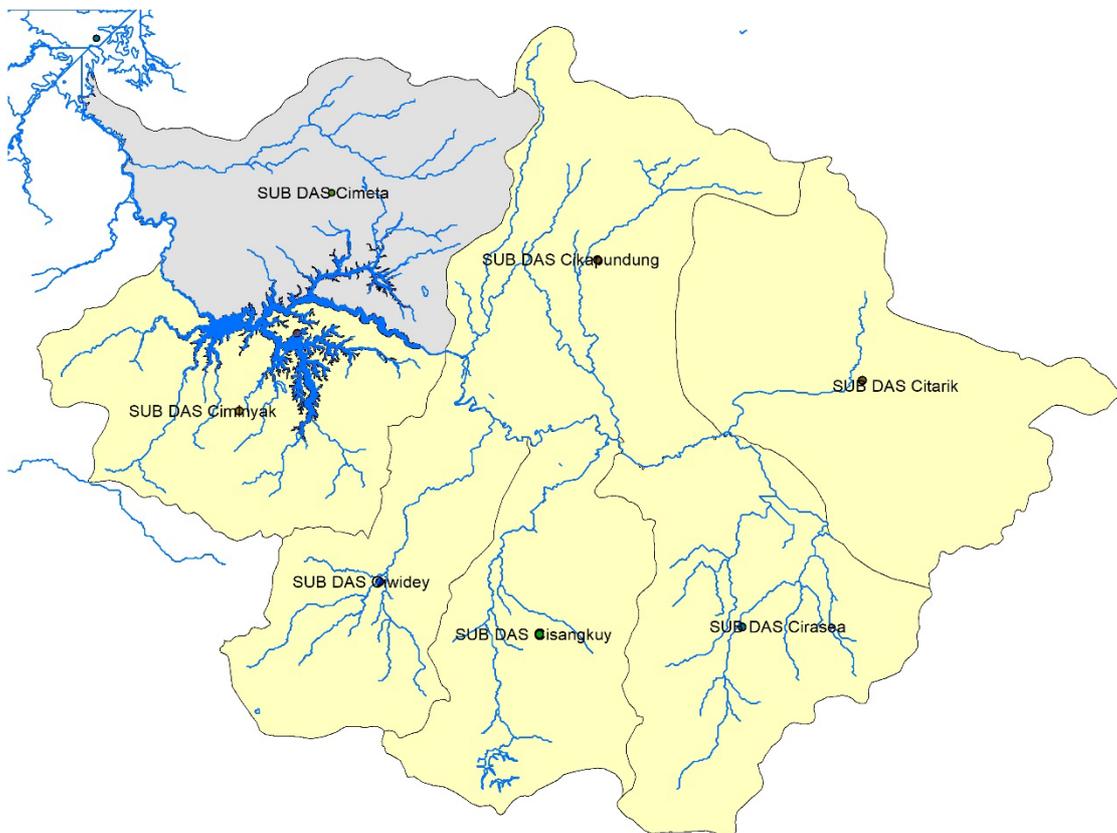
Gambar 4. Kombinasi skenario perubahan tutupan lahan dan iklim

3. Karakteristik Lokasi Penelitian

Sub-DAS dan Jarak Aliran Air

DAS Citarum Hulu dengan luas tangkapan area sebesar 232,050 Ha (berdasarkan hasil deliniasi) memiliki final outlet di Waduk Saguling. Berdasarkan pengelolaannya, DAS Citarum hulu dapat dibagi menjadi 7 sub-DAS, yaitu: sub-DAS Cirasea, Sub-DAS Cisangkuy, Sub-DAS Citarik, Sub-DAS Ciwidey, Sub-DAS Cikapundung, Sub-DAS Ciminyak dan sebagian sub-DAS Cimeta. Dalam penelitian ini, Sub-DAS Cimeta tidak termasuk dalam bagian simulasi karena tidak berada di aliran utama dari sungai Citarum Hulu.

Tabel 3 memperlihatkan hasil analisis spasial untuk jarak perutean (*routing distance*) dari titik tengah (centroid) masing-masing sub-DAS ke Waduk Saguling seperti ditunjukkan oleh Tabel 3. Jarak perutean ini dapat disebut juga sebagai jarak aliran air karena nilainya digunakan untuk memperkirakan waktu tempuh air dari masing-masing sub-DAS hingga mencapai waduk Saguling. Semakin jauh jaraknya maka semakin lama waktu yang diperlukan oleh air untuk mengalir hingga mencapai waduk Saguling.



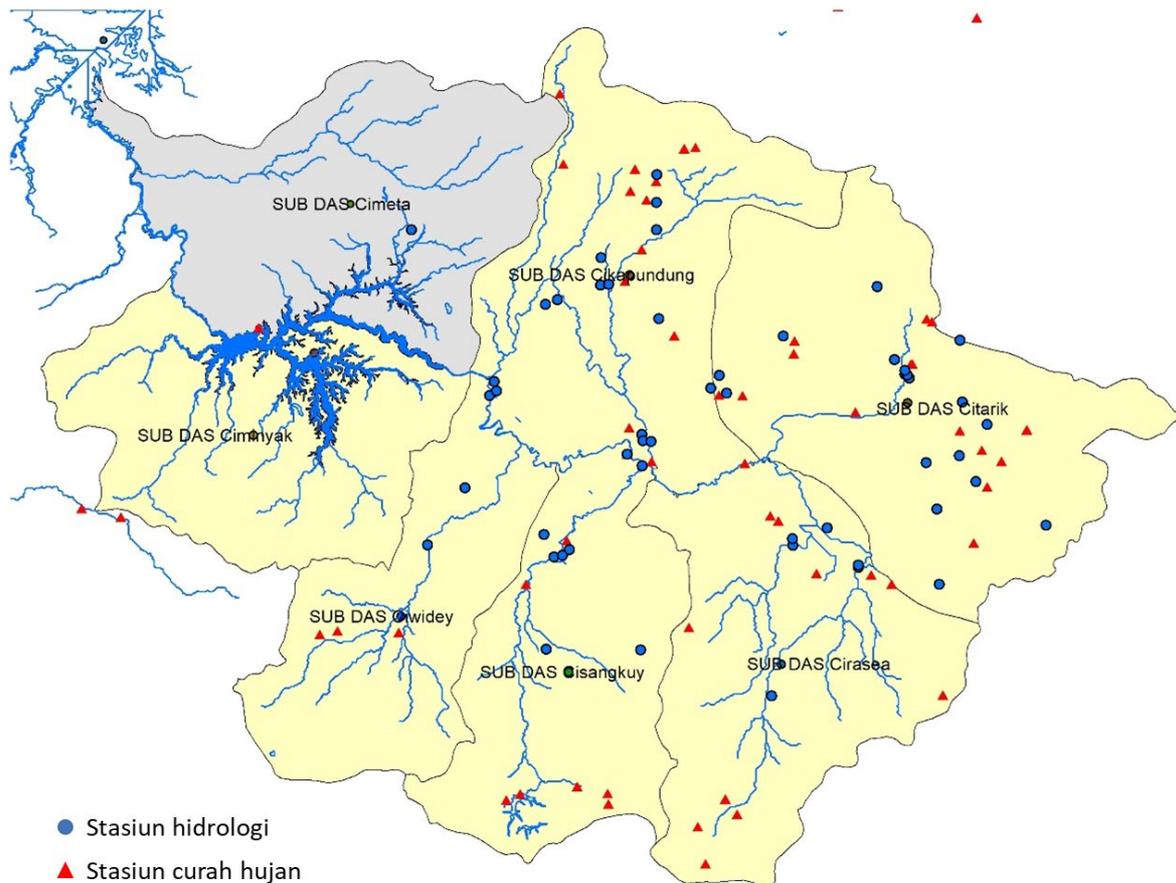
Gambar 5. Sub-DAS dari DAS Citarum Hulu

Tabel 5. Luas area dan jarak routing masing-masing Sub-DAS di DAS Citarum Hulu

Sub-DAS	Area (Ha)	Jarak Pusat Sub-DAS Ke Waduk Saguling
Cisarea	37,5	88.5
Citarik	45,9	78,0
Cisangkuy	30,5	78.3
Cikapundung	40,0	72.3
Ciwidey	27,0	59.8
Ciminyak	32,2	5,0
Waduk Saguling	3,3	0.0
Total	216,4	-

Data Iklim dan Hidrologi

Data curah hujan dan hidrologi yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air, Balai Pengelolaan Sumber Daya Air (PSDA) Wilayah Sungai Citarum dan Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Citarum. Gambar 6 menunjukkan sebaran stasiun curah hujan yang ada di DAS Citarum. Terdapat beberapa stasiun yang memiliki data curah hujan yang dimulai sejak tahun 1980, 1990, 2000 dan 2010. Ketersediaan data curah hujan dan hidrologi untuk masing-masing stasiun cukup bervariasi bergantung tahun stasiun tersebut mulai beroperasi. Untuk keperluan penelitian ini, data curah hujan dan hidrologi yang digunakan mulai tahun 2012-2018 karena disesuaikan dengan ketersediaan peta tutupan lahan. Gambar 6 merupakan sebaran stasiun curah hujan dan hidrologi yang ada di DAS Citarum Hulu.



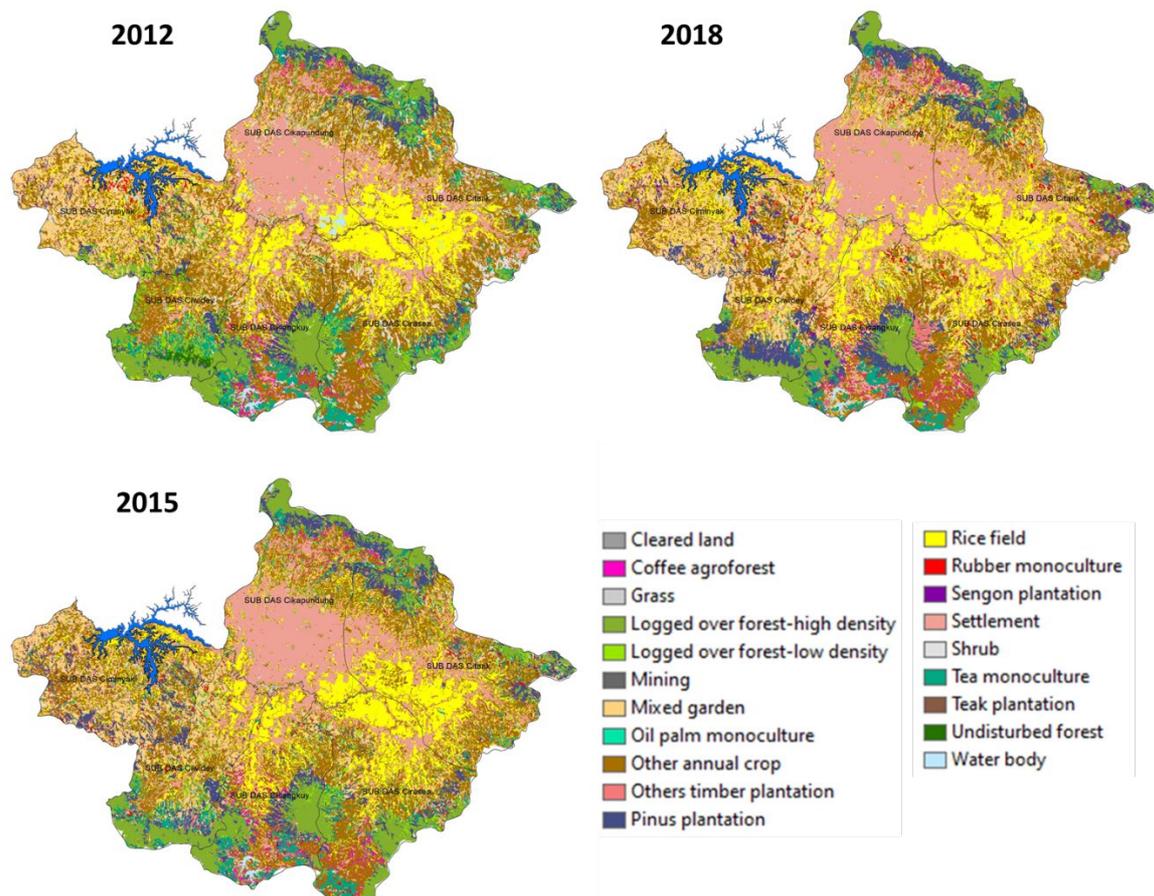
Gambar 6. Sebaran stasiun curah hujan dan hidrologi yang ada di DAS Citarum Hulu

Dari sekian banyak stasiun hidrologi yang ada di DAS Citarum Hulu, Stasiun Nanjung dipilih karena berada di sungai Citarum dan merupakan stasiun terdekat dengan Waduk Saguling, sehingga mendukung hasil kalibrasi model dapat mewakili kondisi yang sebenarnya. Data curah hujan yang digunakan berasal dari tiga stasiun yang berbeda dikarenakan tidak ada stasiun di dekat stasiun Nanjung yang memiliki data curah hujan lengkap (2012-2017). Oleh karena itu diputuskan data curah hujan menggunakan data dari Stasiun Bojong Soang (2016-2017), Stasiun Cicalengka (2012-2014) dan Stasiun Hantap (2015). Ketiga stasiun tersebut merupakan stasiun curah hujan terdekat dengan stasiun Nanjung dan memiliki nilai curah hujan yang mendekati besarnya debit di Stasiun Nanjung.

Tutupan Lahan

Data tutupan lahan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil klasifikasi yang dilakukan oleh World Agroforestry (ICRAF) berdasarkan citra Landsat yang telah dilakukan pengecekan dan verifikasi lapangan. Tutupan lahan di DAS Citarum Hulu dari tahun 2012-2018 didominasi oleh tanaman semusim (23.7%), pemukiman (16.7%), sawah (15.5%) dan agroforestry (12.2%). Sedangkan area hutan hanya tersisa di bagian hulu DAS yang merupakan kawasan hutan milik

negara. Gambar 7 dan Tabel 4 menunjukkan perubahan tutupan lahan di DAS Citarum hulu dari tahun 2012-2018. Selama 6 tahun, perubahan terbesar terjadi pada berkurangnya area hutan sekunder kerapatan tinggi (4.32% atau 9,341 ha), berkurangnya area tanaman semusim (4.12% atau 8925 ha), bertambahnya area agroforestry campuran (4.27% atau 9,239 ha), pemukiman (2.93% atau 6,344 ha) dan sawah (2.89% atau 6,258 ha).



Gambar 7. Peta tutupan lahan DAS Citarum Hulu

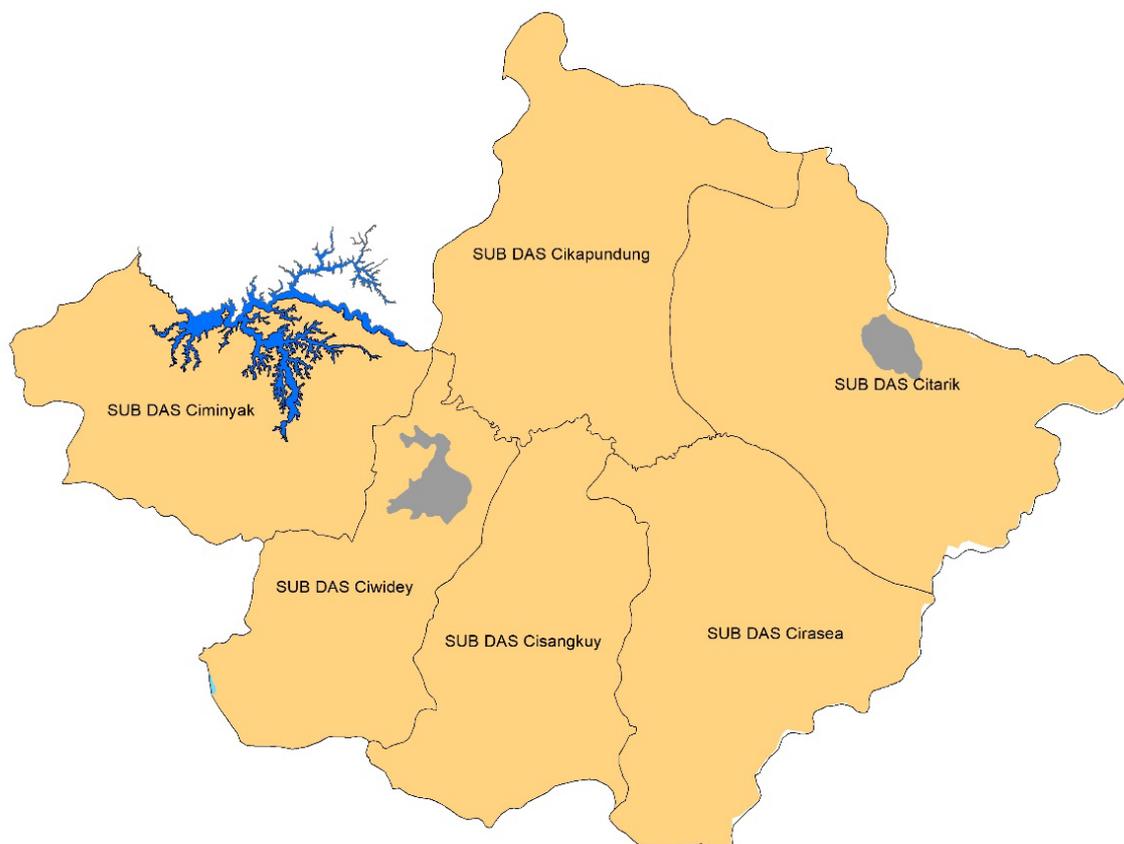
Tabel 6. Luas area masing-masing jenis tutupan lahan di DAS Citarum Hulu

Jenis Tutupan Lahan	2012		2015		2018	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Hutan Primer	1,380	0.64	25	0.01	25	0.01
Hutan Sekunder Kerapatan Tinggi	27,291	12.61	22,230	10.27	17,945	8.29
Hutan Sekunder Kerapatan Rendah	5,248	2.42	4,798	2.22	2,224	1.03
Agroforestri Campur	22,037	10.18	25,806	11.93	31,273	14.45
Agroforestri Kopi	1,888	0.87	2,910	1.34	2,591	1.20
Perkebunan Karet	679	0.31	2,333	1.08	2,272	1.05
Perkebunan Kelapa Sawit	41	0.02	41	0.02	41	0.02
Perkebunan Jati	559	0.26	2,458	1.14	1,869	0.86
Perkebunan Sengon	910	0.42	984	0.45	1,613	0.75

Jenis Tutupan Lahan	2012		2015		2018	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Perkebunan Pinus	10,458	4.83	15,032	6.95	16,233	7.50
Pekebunan Lainnya	690	0.32	1,796	0.83	2,944	1.36
Perkebunan Teh	9,620	4.45	10,049	4.64	6,412	2.96
Sawah	30,292	14.00	33,984	15.70	36,544	16.89
Tanaman Semusim	55,543	25.67	51,736	23.91	46,609	21.54
Pemukiman	33,018	15.26	35,778	16.53	39,356	18.19
Lahan Terbuka	11,820	5.46	2,225	1.03	4,054	1.87
Tambang	30	0.01	26	0.01	172	0.08
Tubuh Air	4,900	2.26	4,192	1.94	4,190	1.94
Total	216,404	100	216,405	100	216,366	100

Jenis Tanah

Berdasarkan peta tanah (sumber: Repprot), jenis tanah di DAS di Citarum Hulu didominasi oleh jenis tanah Inseptisols (80%) sedangkan sisanya berupa jenis tanah Ultisols (20%) (Gambar 8).

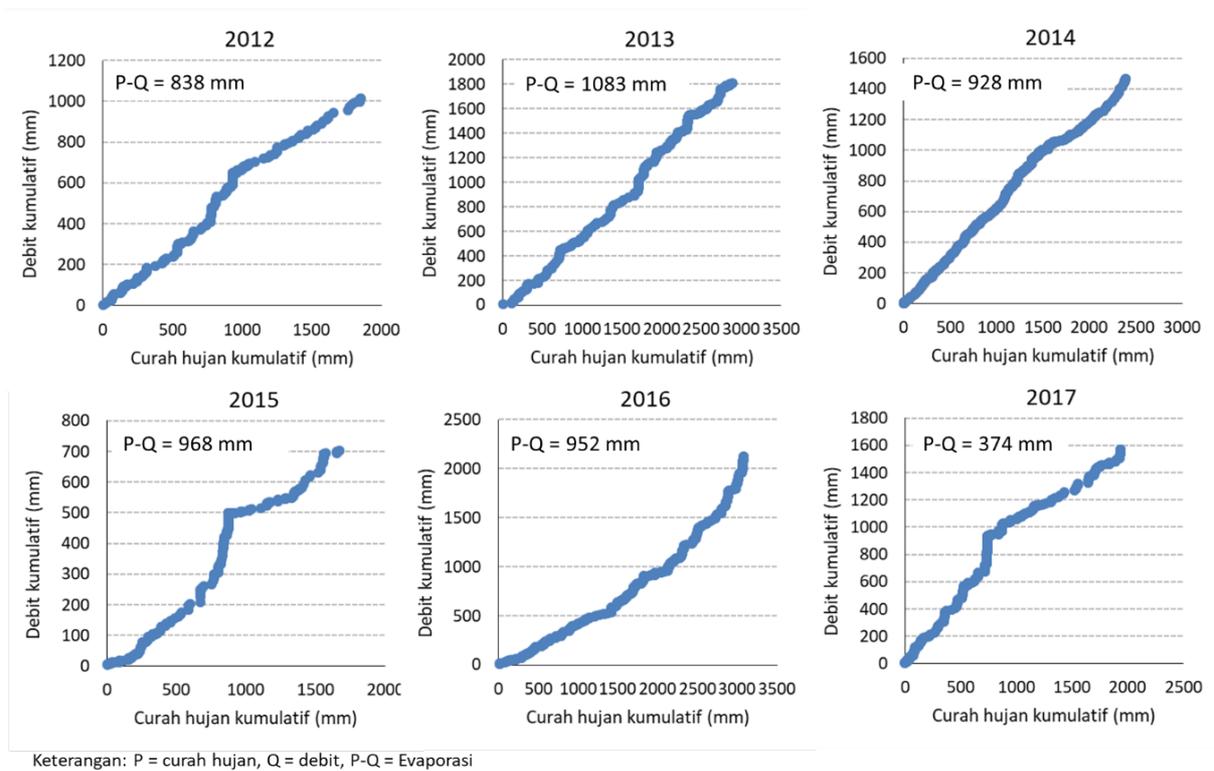


Gambar 8. Peta jenis tanah di DAS Citarum Hulu

4. Uji kesesuaian data iklim dan hidrologi

Data-data yang akan digunakan ini, diuji terlebih dahulu kesesuaiannya. Data yang sesuai akan memiliki kesamaan pola, i.e. curah hujan tinggi akan menyebabkan peningkatan atau setidaknya kestabilan debit air. Jika terjadi perbedaan pola, i.e. curah hujan tinggi tetapi penurunan debit sungai atau tidak ada debit sungai sama sekali, maka perlu dikaji ulang mengapa ini bisa terjadi dan juga dikaji ulang kelayakan data curah hujan dan debit sungai untuk digunakan dalam model GenRiver.

Data tahun 2017 memiliki nilai evaporasi yang sangat kecil (kurang dari 500 mm/tahun) dan tahun 2015 memiliki pola dimana terjadi kenaikan debit sungai Citarum tanpa adanya kenaikan curah hujan (Gambar 9). Hasil analisis ini akan digunakan sebagai masukan untuk menjelaskan hasil kalibrasi dan validasi model.



Gambar 9. Hasil analisis kumulatif curah hujan dan debit tahun 2012-2017

5. Hasil dan Pembahasan

Kalibrasi dan Evaluasi Model GenRiver

Kalibrasi model GenRiver dengan berdasarkan data curah hujan di Stasiun Bojong Soang (2016-2017), Stasiun Cicalengka (2012-2014) dan Stasiun Hantap (2015), serta data debit sungai di stasiun Nanjung (2012-2017) memperoleh hasil parameterisasi Model GenRiver seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Hasil kalibrasi dan evaluasi menunjukkan bahwa dari 6 tahun simulasi, terdapat hasil simulasi yang memiliki nilai NSE kurang dari 0.5, yaitu tahun 2015 dan 2016 (Tabel 6). Hal ini sesuai dengan hasil yang diperoleh pada saat melakukan uji kesesuaian data curah hujan dan debit sungai (Gambar 9) yang menunjukkan adanya ketidakcocokan antara pola debit sungai dengan curah hujan. Lebih lanjut, Gambar 10 dan 11 menunjukkan secara deskriptif perbandingan antara hasil pengukuran debit sungai dengan hasil simulasi debit dengan model GenRiver.

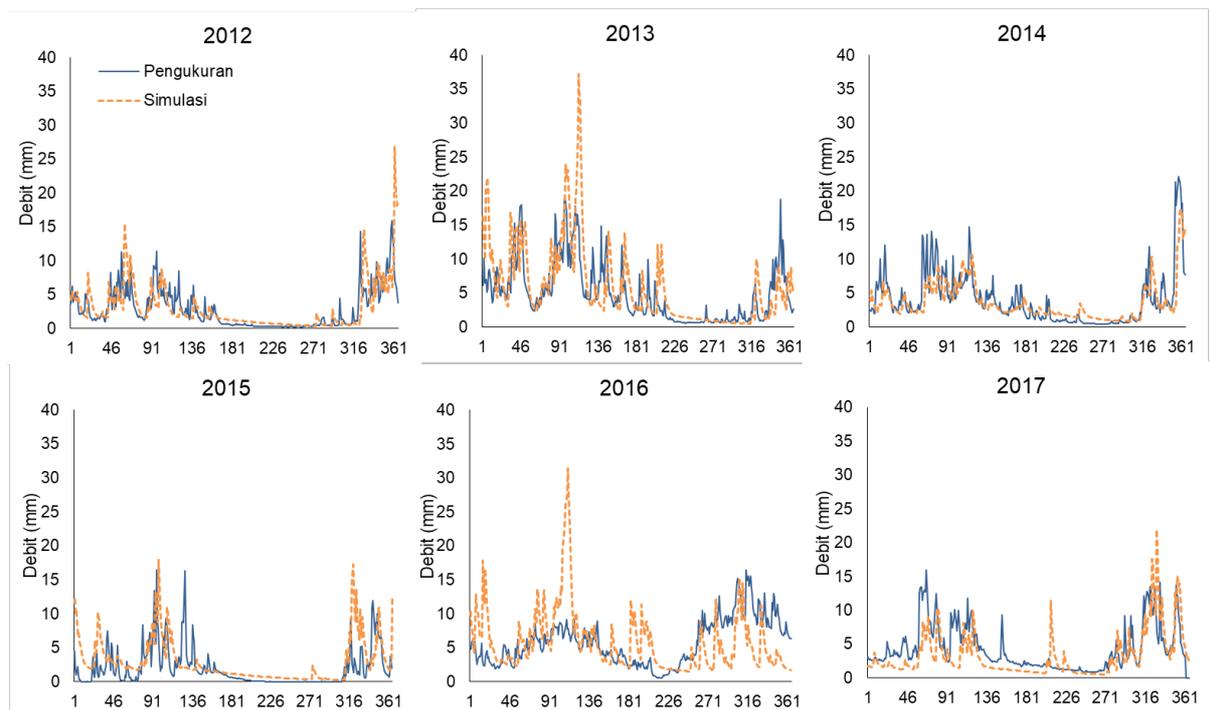
Berdasarkan hasil evaluasi kinerja model dalam mensimulasikan debit sungai Citarum tahun 2012 - 2018 dapat disimpulkan bahwa model cukup memadai dalam mensimulasikan neraca air di DAS Citarum Hulu. Ketidakmampuan model dalam melakukan simulasi disebabkan karena rendahnya kualitas data yang ada pada tahun 2014-2018. Dengan demikian, model hasil kalibrasi dapat digunakan untuk mensimulasikan skenario perubahan dan penggunaan lahan di DAS Citarum Hulu.

Tabel 7. Hasil parameterisasi Model GenRiver untuk DAS Citarum Hulu

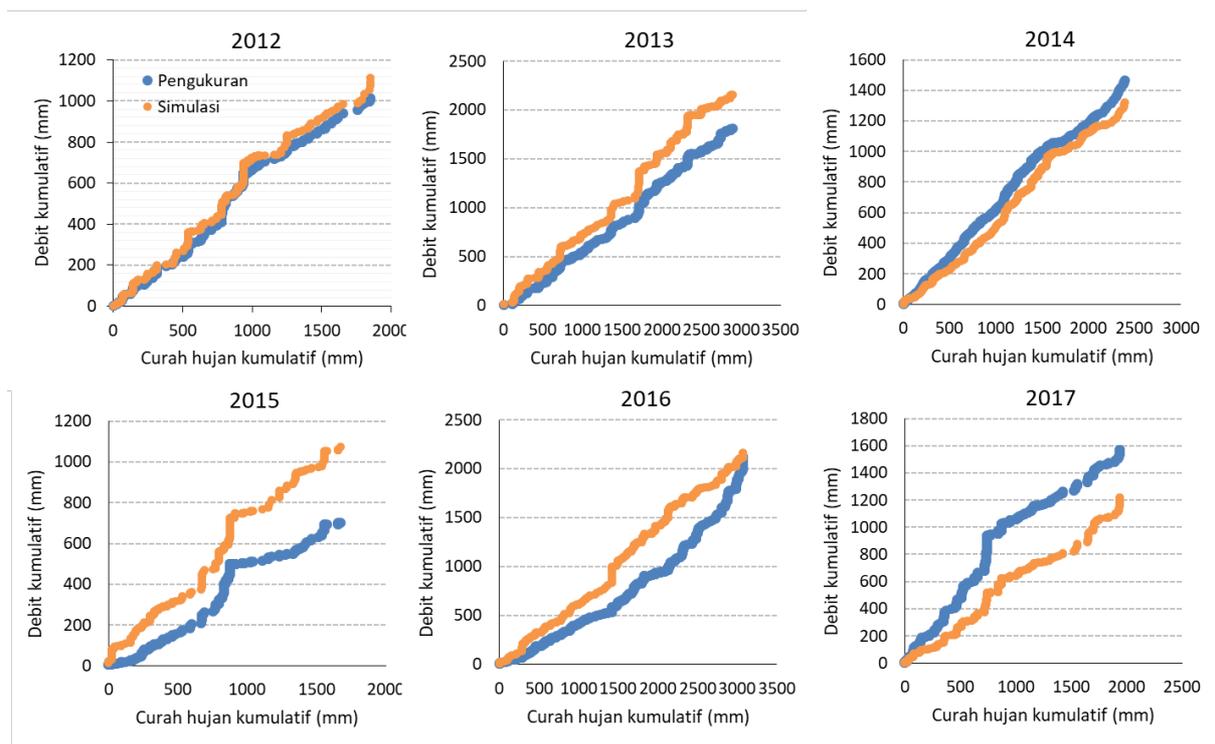
Nama Parameter	Keterangan	Nilai
RainInterceptDripRt	Tingkat intersepsi tetesan curah hujan	10
RainMaxIntDripDur	Durasi intersepsi tetesan curah hujan	0.5
InterceptEffectontrans	Pengaruh intersepsi curah hujan pada transpirasi	0.4
RainIntensMean	Rata-rata intensitas curah hujan	25
RainIntensCoefVar	Koefisien variasi intensitas curah hujan	0.3
MaxInfRate	Kapasitas maksimum infiltrasi per hari	900
MaxInfSubsoil	Kapasitas maksimum infiltrasi ke sub-tanah per hari	200
PerFracMultiplier	Fraksi pelepasan air tanah per hari	0.15
MaxDynGrWatStore	Kapasitas maksimum penyimpanan air tanah	100
GWRReleaseFracConst	Fraksi pelepasan aliran dasar	0.05
Tortuosity	Faktor bentuk DAS	0.7
Dispersal Factor	Kerapatan aliran	0.5
River Velocity	Kecepatan aliran	0.6

Tabel 8. Hasil Kalibrasi dan validasi Model GenRiver untuk DAS Citarum Hulu

Year	n	Biased (%)	NSE	r	Biased (%)	NSE
2012	12	9.14	0.84	0.94	Very good	very good
2013	12	17.52	0.56	0.91	satisfactory	satisfactory
2014	12	-11.46	0.82	0.96	good	very good
2015	12	51.59	-0.34	0.67	unsatisfactory	unsatisfactory
2016	12	0.42	-0.65	0.25	Very good	unsatisfactory
2017	12	-21.40	0.62	0.81	satisfactory	satisfactory



Gambar 10. Perbandingan hidrograf antara data pengukuran di Stasiun Nanjung dengan hasil simulasi Model GenRiver



Gambar 11. Hasil perbandingan kumulatif curah hujan dan kumulatif debit antara hasil pengukuran di stasiun Nanjung dan hasil simulasi Model GenRiver

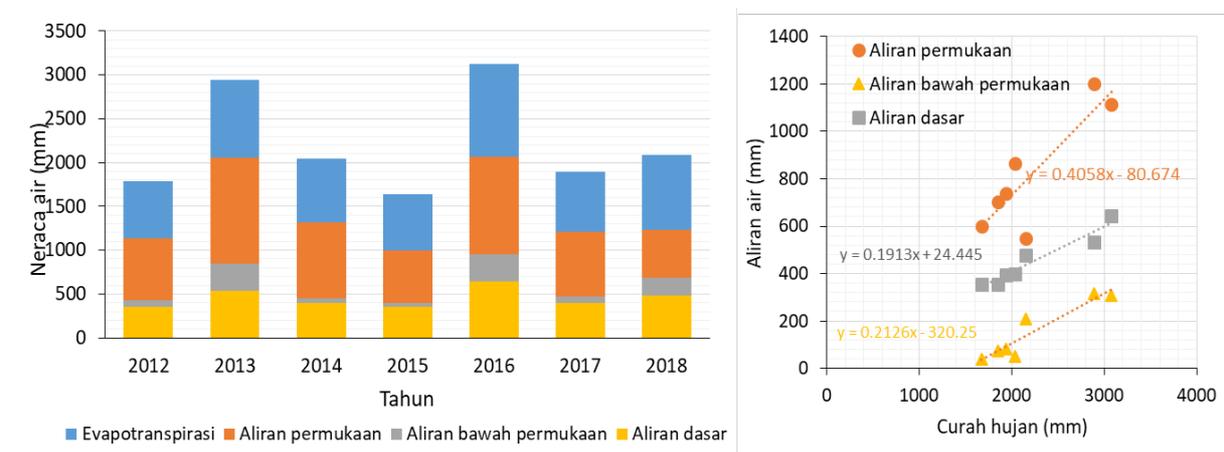
Simulasi Dampak Perubahan Tutupan Lahan terhadap Kondisi DAS Citarum Hulu Tahun 2012-2018

Berdasarkan hasil simulasi model yang telah dikalibrasi, neraca air DAS Citarum hulu selama 6 tahun (2012-2018) memiliki rata-rata tahunan evapotranspirasi sebesar 787 mm atau 35% dari total neraca air bentang lahan dalam periode tersebut, aliran permukaan sebesar 824 mm (37%), aliran bawah permukaan sebesar 154 mm (7%) dan aliran dasar sebesar 415 mm (20%) dengan total curah hujan bervariasi antara 1670-3076 mm dengan rata-rata 2230 mm (Tabel 7). Secara umum, sulit untuk memvalidasi hasil neraca air ini, khususnya komponen debit sungai karena hampir tidak adanya data di tingkat bentang lahan sebagai pembanding karena sulitnya pengukuran. Yang dapat dilakukan adalah dengan membandingkan terhadap teori/konsep yang ada mengenai neraca air di iklim tropis basah, seperti nilai evapotranspirasi tidak pernah melebihi total curah hujan (Peters T, 2014).

Tabel 9. Kondisi neraca air DAS Citarum Hulu selama 6 tahun (2012-2018) hasil simulasi model GenRiver

Komponen neraca air	Terendah		Rata-rata		Tertinggi	
	mm	%	mm	%	mm	%
Curah hujan	1670		2230		3076	
Evapotranspirasi	645	39	787	35	1055	34
Debit sungai	989	59	1424	64	2101	68
Aliran permukaan	548	33	824	37	1204	39
Aliran bawah permukaan	28	2	154	7	315	10
Aliran dasar	355	21	451	20	644	21

Gambar 12A menunjukkan variasi neraca air berdasarkan data pengamatan curah hujan dan tutupan lahan yang diperoleh dari pemetaan. Pada awal simulasi, tahun 2012, tutupan lahan terdiri atas 39.7% tanaman semusim termasuk sawah, 20.7% pemukiman dan lahan terbuka, 16.9% sistem pepohonan seperti perkebunan tanaman keras dan agroforestry, 15% hutan sekunder dan kurang dari 0.7% hutan primer (Gambar 7 dan Tabel 4). Selama periode 2012-2018 terjadi penurunan hutan primer sebesar hampir 100% dan hutan sekunder 38%, setara dengan sekitar 1350 ha dan 12,370 ha. Tanaman semusim mengalami peningkatan sebesar 53% setara dengan 19,320 ha. Gambar 12B merupakan grafik hubungan antara total curah hujan dengan aliran permukaan, aliran bawah permukaan dan aliran dasar. Semakin tinggi curah hujan tahunan maka aliran permukaan, aliran bawah permukaan dan aliran dasar akan meningkat. Pada DAS Citarum Hulu, setiap kenaikan 100 mm curah hujan akan meningkatkan aliran permukaan sebesar 40 mm, aliran bawah permukaan 19 mm dan aliran dasar 20 mm.



Gambar 12. Simulasi neraca air DAS Citarum Hulu tahun tahun 2012-2018 (kiri) dan hubungan antara perubahan curah hujan dengan jumlah aliran (kanan)

Lebih lanjut, selama 6 tahun simulasi (2012-2016) dengan curah hujan yang sama (CH = 1851 mm dan CH 3076 mm), terlihat bahwa perubahan tutupan lahan terjadi kenaikan aliran permukaan, aliran bawah permukaan dan aliran dasar sekitar 2 mm per tahun (Gambar 13). Ini menunjukkan bahwa perubahan lahan yang terjadi tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap perubahan neraca

air di DAS Citarum Hulu, karena proporsi luas area hutan yang stabil, kurang dari 1%, dan luas tanaman semusim yang stabil di 20-25% selama tahun 2012-2016.



Gambar 13. Pengaruh perubahan tutupan lahan dan curah hujan terhadap aliran permukaan, aliran bawah permukaan di DAS Citarum Hulu

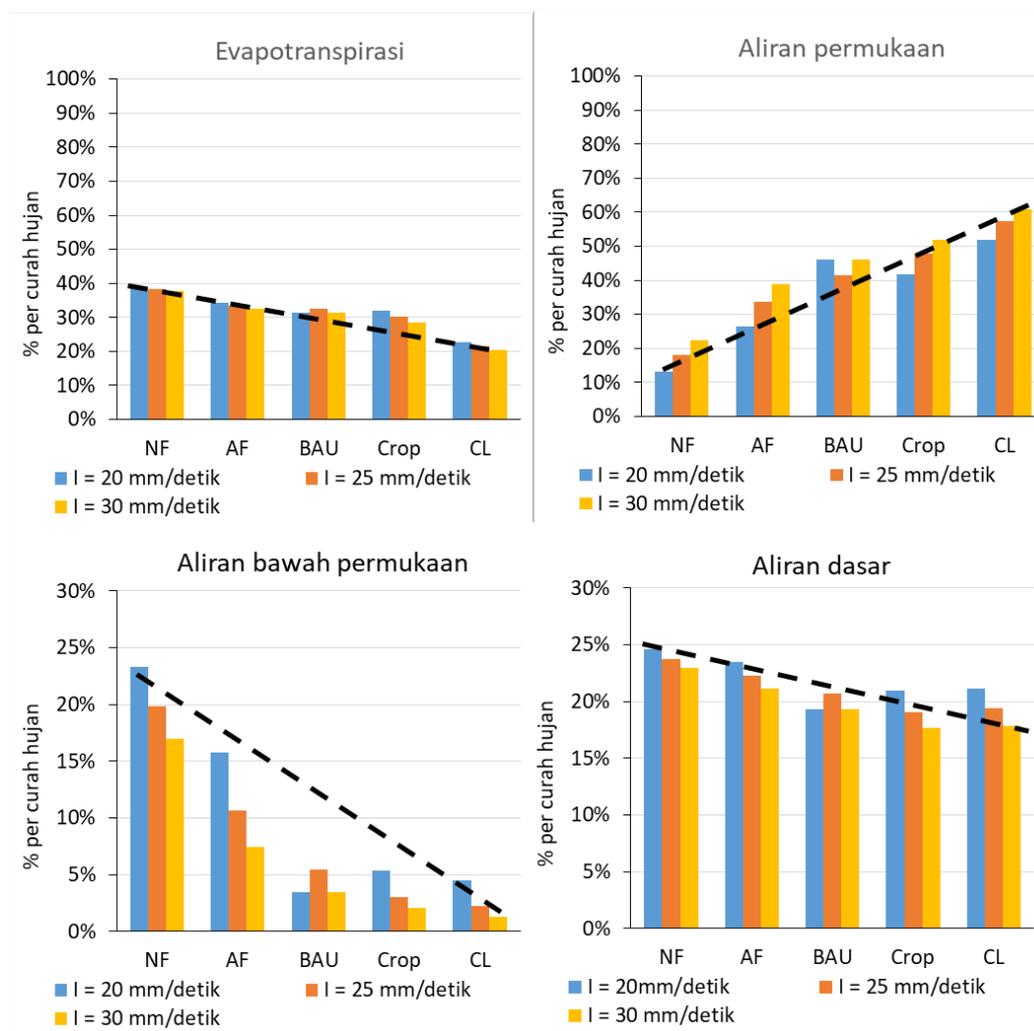
Simulasi Skenario Perubahan Tutupan Lahan dan Iklim Terhadap Kondisi DAS Citarum Hulu di Masa Depan (2019-2028)

Simulasi skenario perubahan tutupan dan iklim untuk melihat variasi kondisi hidrologi di DAS Citarum hulu. Terdapat lima skenario perubahan tutupan lahan dan 3 skenario perubahan iklim yang disimulasikan untuk tahun 2019 – 2028 (Tabel 4). Kelima skenario perubahan lahan yaitu (1) peningkatan hutan primer (**NF**), (2) peningkatan agroforestri (**AF**), (3) Business as usual, dimana tutupan lahan tahun 2018 = 2028 (**BAU**), (4) Peningkatan pertanian tanaman semusim (**Crop**) dan (5) peningkatan lahan terbuka/terdegradasi (**CL**). Ketiga skenario perubahan iklim terdiri dari (i) penurunan intensitas curah hujan - (**I = 20 mm/detik**), (2) intensitas curah hujan sama dengan kondisi saat ini - (**I = 25 mm/detik**), (iii) peningkatan intensitas curah hujan - (**I = 30 mm/detik**).

Secara umum berdasarkan Tabel 8 dan Gambar 14 memperlihatkan perbandingan komponen neraca air pada tahun 2028 dari berbagai skenario tutupan lahan dan perubahan iklim. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa peningkatan tanaman pepohonan atau vegetasi berkayu (NF dan AF) akan menurunkan tingkat aliran permukaan dan meningkatkan aliran bawah permukaan serta aliran dasar. Sebaliknya pengurangan vegetasi berkayu (Crop dan CL) akan meningkatkan aliran permukaan dan menurunkan aliran bawah permukaan serta aliran dasar. Selain itu Gambar 14 juga memperlihatkan bahwa kenaikan intensitas curah hujan juga menyebabkan kenaikan aliran permukaan dan penurunan bawah permukaan dan aliran dasar. Lebih lanjut aliran permukaan merupakan komponen neraca air yang paling rentan terhadap perubahan tutupan lahan dan iklim, sedangkan aliran dasar menjadi komponen yang paling tidak rentan terhadap perubahan tersebut (Gambar 14).

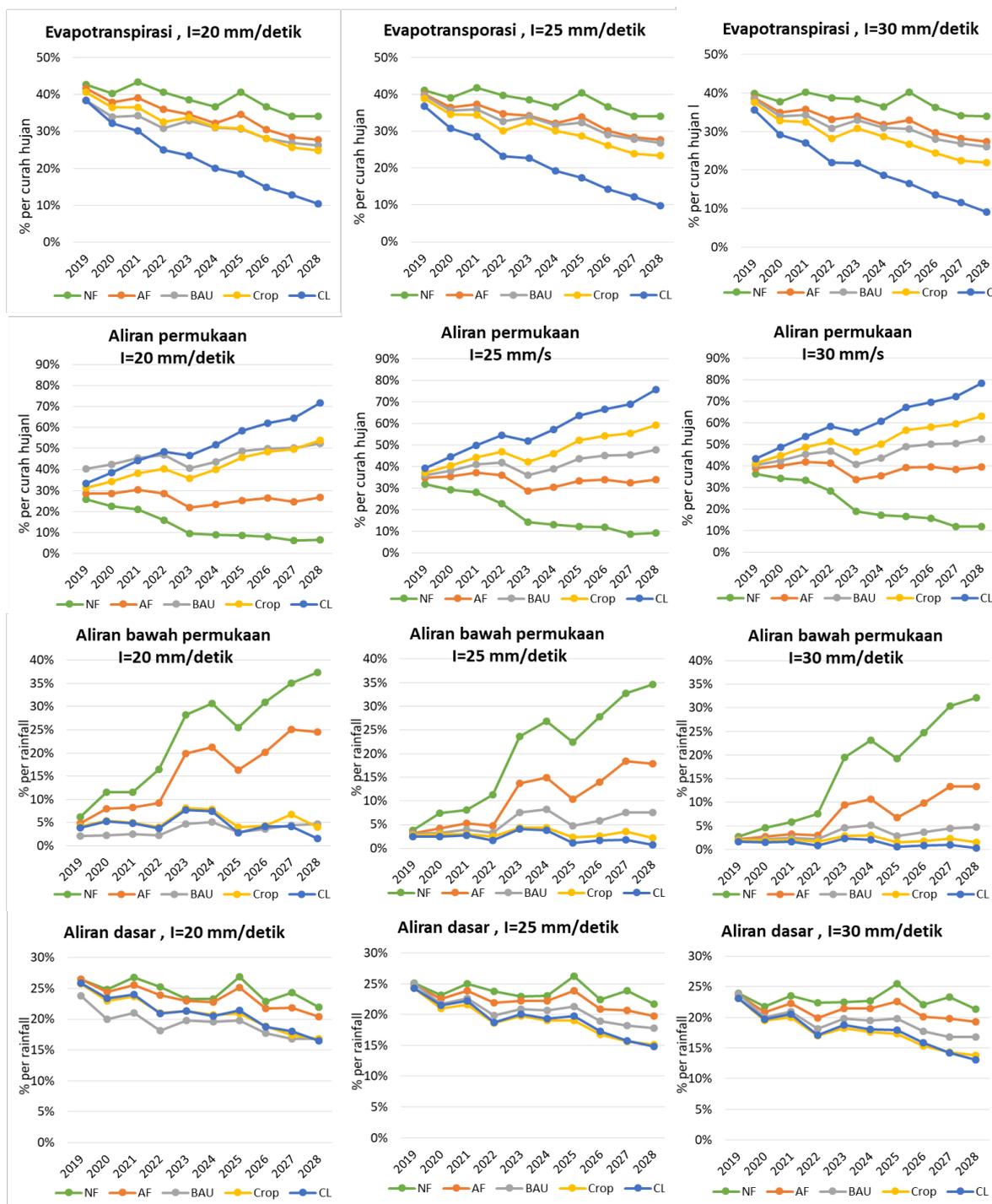
Tabel 10. Persentase komponen neraca air untuk berbagai skenario perubahan lahan dan iklim tahun 2028 di DAS Citarum Hulu

Skenario Perubahan iklim	Komponen neraca air (%)	Skenario perubahan lahan				
		NF	AF	BAU	Crop	CL
I = 20 mm/detik	Aliran dasar	24.6	23.5	19.4	20.9	21.1
	Aliran bawah permukaan	23.3	15.7	3.5	5.3	4.5
	Aliran permukaan	13.2	26.4	46.1	41.7	52.0
	Evapotranspirasi	38.8	34.3	31.3	32.1	22.6
I = 25 mm/detik	Aliran dasar	23.7	22.3	20.7	19.1	19.4
	Aliran bawah permukaan	19.9	10.7	5.5	3.0	2.2
	Aliran permukaan	18.1	33.6	41.4	47.9	57.2
	Evapotranspirasi	38.2	33.5	32.6	30.2	21.5
I = 30 mm/detik	Aliran dasar	22.9	21.2	19.4	17.7	17.9
	Aliran bawah permukaan	17.0	7.5	3.5	2.1	1.3
	Aliran permukaan	22.4	38.8	46.1	52.0	60.8
	Evapotranspirasi	37.6	32.7	31.3	28.6	20.5



Gambar 14. Hasil simulasi neraca air DAS Citarum hulu tahun 2028 berdasarkan berbagai skenario perubahan tutupan lahan dan iklim

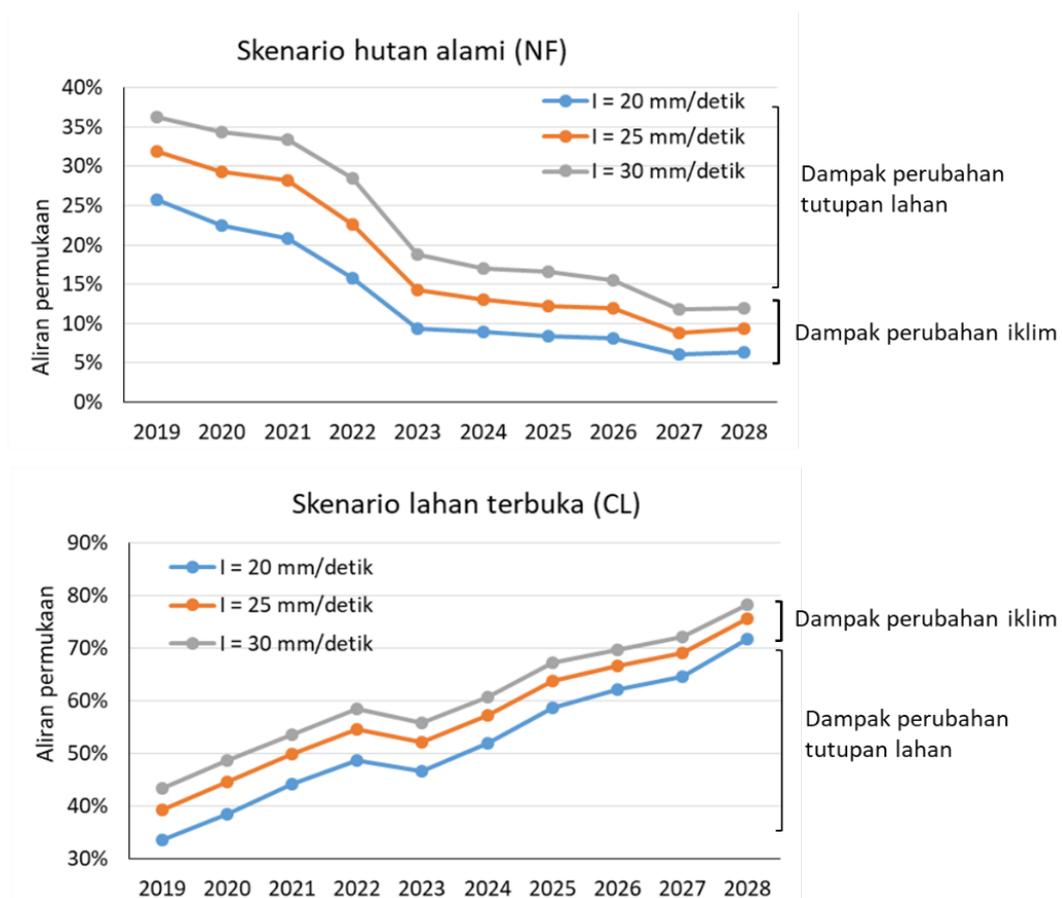
Jika dibandingkan dengan skenario BAU, skenario NF dan AF memberikan dampak perubahan yang signifikan terhadap perubahan aliran permukaan dan aliran bawah permukaan (Gambar 15). Sebaliknya skenario pembukaan lahan secara besar-besaran (CL) akan menyebabkan evapotranspirasi menurun secara drastis dan berubah menjadi aliran permukaan, yang akan meningkatkan potensi terjadinya banjir bandang.



Gambar 15. Tren perubahan komponen neraca air tahun 2019-2028 untuk berbagai skenario perubahan tutupan lahan dan iklim.

Gambar 16 memberikan analisis lebih lanjut perubahan aliran permukaan pada skenario NF dan skenario CL. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa konversi 82% (174,723 ha) lahan di hulu DAS Citarum menjadi area hutan alami akan menurunkan aliran permukaan sebesar 22 % terhadap total curah hujan. Sebaliknya pembukaan lahan dengan luas yang sama menjadi lahan terbuka akan menyebabkan 70% hujan menjadi aliran permukaan pada akhir simulasi (tahun 2028). Secara umum dalam skenario ini 5 mm/detik dari curah hujan akan menyebabkan kenaikan aliran permukaan sekitar 5% dari curah hujan.

Skenario NF dan CL merupakan kondisi ekstrim yang dalam kenyataannya akan sulit terjadi. Namun hasil kondisi ekstrim ini dapat memberikan gambaran rentang pemulihan dan degradasi DAS Citarum Hulu yang mungkin terjadi. Skema intervensi di tingkat plot melalui konservasi tanah dan lahan maupun intervensi di tingkat bentang alam melalui kebijakan perencanaan wilayah akan menghasilkan neraca air di tingkat bentang alam yang berada di rentang skenarion NF dan CL.



Gambar 16. Simulasi dampak perubahan tutupan lahan dan iklim di DAS Citarum Hulu 2019-2028

6. Kesimpulan dan Rekomendasi

Hasil kalibrasi dan evaluasi menunjukkan bahwa parameterisasi model GenRiver dengan data pengamatan curah hujan dan debit air DAS Citarum Hulu pada periode tahun 2012-2018 berkinerja dengan baik dan memadai untuk digunakan untuk mensimulasikan pengaruh perubahan tutupan lahan dan perubahan iklim terhadap fungsi hidrologis DAS Citarum Hulu. Analisa sensitivitas dengan mensimulasikan rentang perubahan ekstrim positif dan ekstrim negative menunjukkan model cukup sensitif dalam mensimulasikan dampak terhadap neraca air di tingkat bentang lahan dan telah memberikan gambaran mengenai degradasi dan perbaikan fungsi hidrologis yang mungkin terjadi.

Secara umum kondisi saat ini (2012-2018), 35% curah hujan yang jatuh di dalam DAS Citarum hulu dimanfaatkan sebagai evapotranspirasi oleh vegetasi, 37% mengalir sebagai aliran permukaan, 7% menjadi aliran bawah permukaan dan 20% aliran dasar.

Berdasarkan hasil simulasi model GenRiver (2019-2028), setiap pembukaan lahan 4700 ha menjadi area terbuka akan berkontribusi terhadap kenaikan aliran permukaan sebesar 1% (dari curah hujan). Sebaliknya untuk menurunkan aliran permukaan sebesar 1% diperlukan peningkatan area lahan bervegetasi berkayu sebesar 7900 ha.

Kenaikan intensitas curah hujan berkorelasi positif dengan kenaikan aliran permukaan. Semakin tinggi intensitas curah hujan maka semakin tinggi aliran permukaan. Oleh karena itu peningkatan area lahan dengan dominasi vegetasi berkayu dapat menjadi penyangga terhadap kejadian perubahan intensitas curah hujan.

Studi ini disusun dengan menggunakan skenario konseptual yang belum didasarkan pada skema intervensi realistis di tingkat plot maupun tingkat bentang lahan. Langkah selanjutnya yang dapat dilakukan adalah (i) menyusun skenario intervensi yang mungkin dan masuk akal untuk diterapkan di DAS Citarum berdasarkan Diskusi Kelompok Terfokus maupun Interview Tokoh Kunci yang dilakukan di DAS Citarum Hulu, kemudian (ii) mensimulasikan skenario tersebut menggunakan model GenRiver, untuk Menyusun rekomendasi kebijakan mengenai intervensi penggunaan lahan yang layak diterapkan di DAS Citarum Hulu.

Daftar Pustaka

- Aldrian E dan Susanto RW. 2003. Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature, *Int. J. Climatol* 23:1435-1452.
- Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Citarum. 2016. Rencana Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Citarum, Jakarta (<http://bbwscitarum.com/wp-content/uploads/2016/11/Rencana-Pengelolaan-Sumber-Day-Air-WS-Citarum.pdf>)
- Direktorat Kehutanan dan Konservasi Sumber Daya Air, 2010, Kajian Model Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) Terpadu, Jakarta
https://www.bappenas.go.id/files/1213/5053/3289/17kajian-model-pengelolaan-daerah-aliran-sungai-das-terpadu_20081123002641_16.pdf
- Guo H, Hu Q, Jiang T. 2008. Annual and seasonal stream flow responses to climate and land cover changes in the Poyang lake basin, China. *Journal of Hydrology* 355:106-122.
- Khasanah K, Mulyoutami E, Ekadinata A, Asmawan T, Tanika L, Said Z, van Noordwijk M, dan Leimona B. 2010. *A Study of Rapid Hydrological Appraisal in the Krueng Peusangan Watershed, NAD, Sumatra*. Working paper nr.123. Bogor, Indonesia: World Agroforestry Centre. 53p.
- Kumarasamy K, Belmont P. 2018. Calibration parameter selection and watershed hydrology model evaluation in time and frequency domains. *Water* 10:710. <https://doi:10.3390/w10060710>
- Kurniasih N. 2002, Pengelolan DAS Citarum Berkelanjutan. *Jurnal Teknologi Lingkungan* 3(2):82-91.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. 2001. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 20(3):885-900.
- Peters T. 2016. Climatic Types of Water Balances in the Tropics, in Pancel L, Köhl M (Eds.), *Tropical Forestry Handbook*. Springer-Verlag Berlin. 3363p.
- van Noordwijk M, Widodo RH, Farida A, Suyamto D, Lusiana B, Tanika L, and Khasanah N. 2010. *GenRiver and FlowPer: Generic River Flow Persistence Models, User Manual Version 2.0*. Bogor, Indonesia: World Agroforestry Centre (ICRAF).

World Agroforestry is an autonomous, non-profit research organization whose vision is a rural transformation in the developing world as smallholder households increase their use of trees in agricultural landscapes to improve food security, nutrition, income, health, shelter, social cohesion, energy resources and environmental sustainability. The Centre generates science-based knowledge about the diverse roles that trees play in agricultural landscapes, and uses its research to advance policies and practices, and their implementation that benefit the poor and the environment. It aims to ensure that all this is achieved by enhancing the quality of its science work, increasing operational efficiency, building and maintaining strong partnerships, accelerating the use and impact of its research, and promoting greater cohesion, interdependence and alignment within the organization.



United Nations Avenue, Gigiri • PO Box 30677 • Nairobi, 00100 • Kenya
Telephone: +254 20 7224000 or via USA +1 650 833 6645
Fax: +254 20 7224001 or via USA +1 650 833 6646
Email: worldagroforestry@cgiar.org • www.worldagroforestry.org

Southeast Asia Regional Program • Sindang Barang • Bogor 16680
PO Box 161 • Bogor 16001 • Indonesia
Telephone: +62 251 8625415 • Fax: +62 251 8625416
Email: icraf-indonesia@cgiar.org • www.worldagroforestry.org/region/SEA