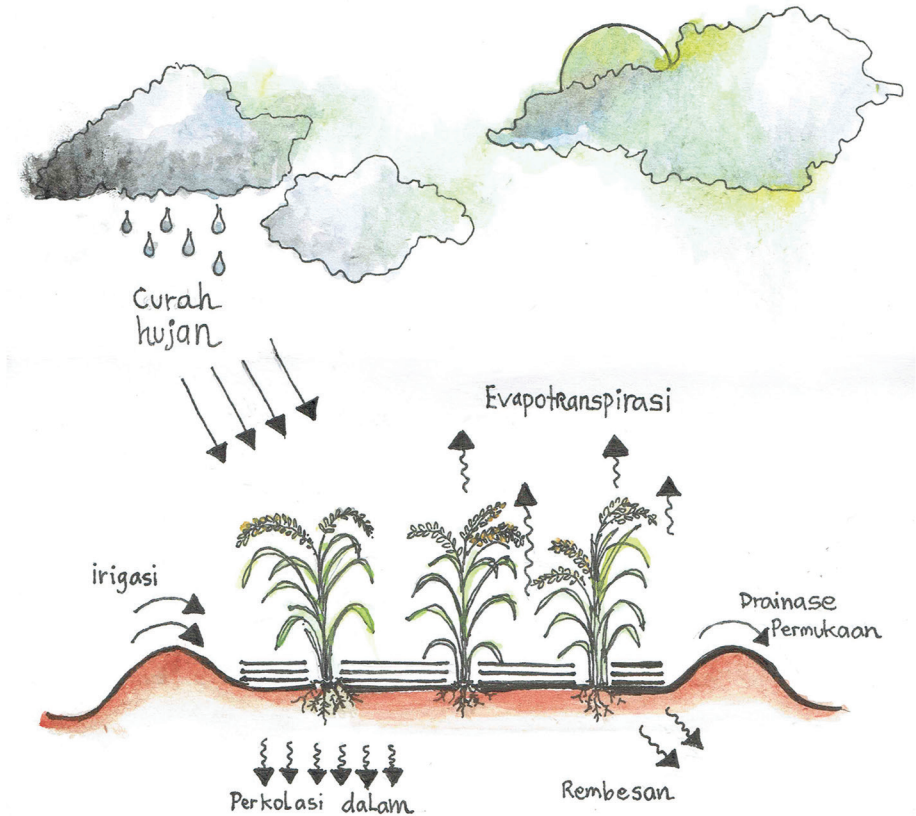


Sumbangan Pemikiran

TEORI DAN PRAKTEK IRIGASI PADA PADI SAWAH

Penerapan Konsep Ekoregional
dalam Pengelolaan Air untuk Pertanian



Penulis:
Achmad M. Fagi

Sumbangan Pemikiran

**TEORI DAN PRAKTEK
IRIGASI PADA PADI SAWAH**

**Penerapan Konsep Ekoregional dalam
Pengelolaan Air untuk Pertanian**

Sumbangan Pemikiran

**TEORI DAN PRAKTEK
IRIGASI PADA PADI SAWAH**

**Penerapan Konsep Ekoregional dalam
Pengelolaan Air untuk Pertanian**

Achmad M. Fagi

100 tahun

dari Algemeen Proefstation voor de Landbouw 1918
ke Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan 2018



Teori dan Praktek Irigasi Padi Sawah : Penerapan Konsep Ekoregional dalam
Pengelolaan Air untuk Pertanian
@2018 IAARD PRESS

Edisi I : 2018

Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang
@IAARD Press

Katalog dalam terbitan (KDT)

FAGI, Achmad M

Sumbangan pemikiran teori dan praktek irigasi pada padi sawah :
penerapan konsep ekoregional dalam pengelolaan air untuk
pertanian / Penyusun Achmad M. Fagi. -- Jakarta IAARD Press, 2019.
ix, 208 hlm.; ill.;21 cm
ISBN: 978-602-344-244-7

1. Padi sawah 2. Irigasi 3. Pengelolaan air
II. Judul

633.18.03-167

Penulis:

Achmad M. Fagi

Editor:

Elna Karmawati

Perancang cover dan Tata Letak:

Siti Leikha Firgiani

Tim Kreatif IAARD Press

Penerbit

IAARD PRESS

Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian

Jl, Ragunan No 29, Pasar Minggu, Jakarta 12540

Email: iaardpress@litbang.pertanian.go.id

Anggota IKAPI No: 445/DKI/2012

PRAKATA

Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian (Balitbangtan) menginisiasi Program Penelitian Tataguna Air mulai tahun anggaran 1980/81. Penulis yang ditugasi sebagai penanggung jawab dari program ini menginventarisi dokumen hasil-hasil penelitian dan menemukan informasi yang sangat terbatas, dan hanya menyangkut aspek agronomi dari air untuk tanaman padi pada petakan sawah skala penelitian agronomi; konsumsi airnyapun tidak terukur. Peneliti Belanda yang bertugas di *Algemeen Proefstation voor de Landbouw* (Balai Besar Penyelidikan Pertanian) meneliti kebutuhan air padi sawah pada bak-bak beton berukuran sekitar $0,75 \times 0,75$ m². Dari penelitian dihasilkan bahwa padi unggul lokal mengkonsumsi air irigasi 1,5 l/det/ha.

Balitbang Irigasi dari Kementerian Pekerjaan Umum lebih intensif meneliti aspek teknik sipil basah untuk digunakan dalam penyaluran air irigasi.

Tampaknya informasi hasil penelitian dari kedua Kementerian itu tidak cukup lengkap untuk digunakan dalam operasi pengelolaan air irigasi. Maka, Perusahaan Umum (Perum) Otorita Jatiluhur (sekarang menjadi Jasatirta II) mendanai penelitian tataguna air yang lebih komprehensif dari Program Penelitian Tataguna Air yang penulis pimpin. Dari mana memulai dan apa serta bagaimana penulis harus merancang penelitian tataguna air demikian?

Para ahli internasional bidang pengelolaan air irigasi mendefinisikan pengelolaan air irigasi (*irrigation water management*) sebagai berikut:

“Irrigation water management is the skilled handling of water resources, the executive function of planning (construction, rehabilitation, operation and maintenance, procurement, conveyance, use and removal if in excess, directing, organizing, coordinating) for efficient crop production in agriculture, and the judicious use of water to accomplish food and fiber efficiency”.

Tampak dalam definisi bahwa pengelolaan air irigasi itu sangat kompleks. Penulis dan tim menentukan prioritas penelitian sesuai kemampuan fasilitas yang tersedia, yaitu dana, peralatan dan peneliti (disiplin ilmu). Isi dari buku ini disusun berdasarkan definisi pengelolaan air irigasi tersebut. Sebagian data/informasi adalah hasil penelitian, dilengkapi dengan hasil penelusuran pustaka.

Aspek fisiologi dari air dan regim air tanah dikemukakan secara garis besar agar pembaca dari berbagai disiplin ilmu dan profesi memahami mengapa pertumbuhan tanaman terhambat dan hasilnya turun kalau tanaman menderita cekaman kekurangan air. Aspek teknik diuraikan berkenaan dengan berbagai metode untuk mengefisienkan penggunaan air. Teknik irigasi bergilir adalah cara yang terbukti mampu mengefisienkan penggunaan air dan menekan emisi gas rumah kaca (GRK).

Saran dan kritik yang membangun penulis sangat hargai. Semoga buku ini bermanfaat.

Penulis

Achmad M. Fagi

PENGANTAR

Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan (Puslitbangtan) adalah hasil evolusi dari dinamika kemajuan salah satu lembaga riset di Indonesia, mulai dari zaman penjajahan sampai kemerdekaan.

Pembangunan lembaga riset tersebut didahului oleh didirikannya *Lands Plantentuin* (Kebun Raya) pada 1817. Sejak saat itu banyak lembaga riset didirikan yang penelitiannya lebih terfokus ke tanaman perkebunan, tetapi yang berkaitan dengan Puslitbangtan adalah *Algemeen Proefstation voor de Landbouw* (Balai Besar Penyelidikan Pertanian) yang didirikan pada 1918 oleh Direktur Kebun raya Dr. J.C. Koningsberger (Mahmud *et. al.*, 1996). Kebun Percobaan (KP) Muara dibangun oleh Dr. W.M. Doctor van Leeuwen, Direktur Kebun raya, pada 1930. KP Muara berada di bawah organisasi Balai Besar.

Setelah kemerdekaan nama Balai Besar masih dipertahankan. Balai Besar ini berpartisipasi dalam uji adaptasi dan uji multilokasi galur-galur harapan padi sawah dari IRRI (*International Rice Research Institute*) sampai dilepas menjadi IR5 dan IR8. Persilangan antara IR5 dan IR8 dengan varietas padi unggul lokal menghasilkan Pelita I/1 dan Pelita I/2. Teknik budidayanya pun disesuaikan dengan varietas unggul baru (VUB) yang sangat tanggap terhadap pemupukan nitrogen (Urea). VUB dengan teknologinya didemonstrasikan di KP Muara, dan dipanen oleh Presiden Suharto. Bangunan baru yang didirikan bersamaan dengan uji adaptasi varietas unggul tersebut diberi nama *Seed Center* Kamajaya-Dewi Ratih oleh

Presiden Suharto. Pelatihan para Bupati dan Pembantu Gubernur di gedung ini mengawali program intensifikasi produksi padi. Inilah awal dari inovasi teknologi produksi padi dikenal sebagai teknologi Revolusi Hijau.

Puslitbangtan saat perhelatan besar di KP Muara, masih bernaung dibawah Direktorat Jenderal Tanaman Pangan. Nama Balai Besar Penyelidikan Pertanian diganti menjadi Pusat Penelitian dan Pengembangan Pertanian (LP3).

Pusat-pusat penelitian yang terfragmentasi digabung dalam wadah suatu badan penelitian. Maka, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian (Balitbangtan) didirikan pada 1974. Pada 1 Februari 1981, LP3 berganti nama menjadi Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan (Puslitbangtan) (Fagi *et. al.*, 2009).

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa Puslitbangtan adalah peletak dasar dari Revolusi Hijau di Indonesia. Melalui program intensifikasi produksi padi BIMAS, BIMAS Baru, INSUS, OPSUS, Indonesia mencapai swasembada beras pada 1984. Keberhasilan peningkatan produksi padi, merupakan kontribusi dari irigasi, VUB dan pemupukan, berturut-turut sebesar 26%, 5% dan 4% (Bank Dunia, 1982). Program intensifikasi (interaksi irigasi x VUB x pemupukan) menyumbang 75%, sedangkan ekstensifikasi 25%. Sumbangan irigasi yang besar (26%) harus dipertahankan secara serius. Selama periode 30 tahun (1969-1999), telah terjadi kekeringan parah 7 kali; produksi padipun turun dan Indonesia mengimpor lagi beras (Fagi *et. al.*, 2002). Iklim ekstrim *El Nino* diprediksi akan lebih sering terjadi akibat dari perubahan iklim. Pembangunan waduk-waduk baru, rehabilitasi dan perluasan jaringan irigasi adalah peluang untuk menstabilkan laju kenaikan produksi padi, dan area tanam dan panen akan menambah luas tanam pada MK (musim kemarau), kalau air irigasi digunakan secara efisien dengan mempraktekkan teknik irigasi bergilir (*intermittent/rotational irrigation techniques*).

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Dr. Achmad M. Fagi yang telah menulis buku tentang irigasi pada padi sawah, bertepatan dengan 100 tahun Puslitbangtan.

Bogor,

2018

Dr. Ir. Moh. Ismail Wahab, M.Si

SAMBUTAN KEPALA BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN PERTANIAN

Balitbangtan mulai memperhatikan penelitian tataguna air (*water management*) sejak awal tahun 1980-an dengan diproyeksikannya Program Nasional Penelitian Tataguna Air. Penanggung jawab dari program ini adalah Balai Penelitian Tanaman Pangan (Balittan) Sukamandi yang kemudian menjadi Balai Penelitian Tanaman Padi (Balitpa) dan selanjutnya menjadi Balai Besar Penelitian Tanaman Padi (BB Padi).

Kepala Balitbangtan saat itu, Ir. Sadikin Sumintawikarta, menyeleksi peneliti yang tepat untuk menduduki jabatan fungsional sebagai Koordinator Program. Pilihannya jatuh kepada Dr. Achmad M. Fagi, M.Sc, dengan memperhatikan transkrip program studi Ph.D di Univesity of the Philippines at Los Banos (UPLB).

Tim peneliti yang terbentuk dan terlibat dalam penelitian tataguna air dibina melalui pelatihan di IRRI, Filipina, dan dilibatkan dalam kegiatan penelitian tataguna air kerjasama baik dalam skala nasional maupun skala internasional. Melalui diskusi-diskusi penyusunan RPTP (Rencana Penelitian Tingkat Peneliti) dan dalam lokakarya hasil-hasil penelitian, kemampuan peneliti tataguna air meningkat dan rasa percaya dirinya bangkit. Instansi di luar Departemen Pertanian dan lembaga riset internasional

mempercayai kredibilitas dari tim peneliti tataguna air di Balittan Sukamandi, seperti Perum Otorita Jatiluhur, IRRI, IDRC-Canada (*International Development Research Center, Canada*), dan IIMI-Sri Langka (*International Irrigation Management Institute, Sri Langka*). Bahkan, seseorang dari peneliti tataguna air mendapat penghargaan internasional sebagai peneliti berbakat karena tulisannya tentang peranan wanita dalam usahatani berbasis tanaman padi pada lahan irigasi. Dia, Ir. Iis Syamsiah, MSc (alm), menerima anggaran khusus penelitian, dan mendapat beasiswa untuk mengikuti program S2 di University of the Philippines at Los Bannos bidang tataguna air.

Beberapa hasil penelitian tataguna air yang relevan dengan pembangunan pertanian dan perikanan saat ini, adalah:

- 1) Teknik irigasi bergilir (*rotational irrigation technique*), penetapan *rotational irrigation blocks*, pola tanam berbasis tanaman padi berlandaskan golongan tanam atau jadwal pengairan yang ditetapkan oleh Panitia Irigasi,
- 2) Rancang bangun (*design criteria*) dari embung (*small farm reservoir*), dan pemanfaatan air embung yang efisien pada lahan tadah hujan,
- 3) Teknik irigasi pada mina-padi dan tatatanam jajar legowo (*jarwo*),
- 4) Proporsi campuran air laut dan air tawar optimum pada budidaya udang windu untuk menghemat penggunaan air tawar bagi pertanian tanaman pangan,
- 5) Analisis kualitas air di pantai utara Jawa Barat untuk perluasan budidaya udang windu yang hemat air tawar.

Contoh-contoh dari hasil penelitian digunakan sebagai petunjuk teknis di dalam buku ini dan sebagai dasar dari diskusi/argumentasi.

Penerbitan buku ini bertepatan dengan 100 tahun Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan dari sejak

didirikannya Algemeen Proefstation voor de Landbouw pada 1918. Selama 100 tahun perkembangan lembaga riset ini begitu dinamis menghadapi dinamika perubahan lingkungan strategis. Hasil-hasil penelitiannya merupakan teknologi budidaya tanaman pangan yang monumental.

Buku ini mendukung upaya Pemerintah cq. Kementerian Pertanian dalam upaya perluasan area tanam dan area panen tanaman padi, jagung dan kedelai, suatu komoditas yang bernilai strategis dari segi sosial, ekonomi dan politik.

Jakarta,

2018

Prof. (R) Dr. Ir. Muhammad Syakir

GLOSARIUM

Pengertian dari Istilah Khusus dalam Buku untuk Pemahaman Penyuluh Pertanian

bahan kimia (*chemical substance*): elemen dari senyawa kimia yang dihasilkan dari proses kimiawi atau substansi yang dapat menghasilkan efek-efek kimia.

energi bebas (*free energy*): daya tarik dari permukaan benda padat terhadap molekul air agar permukaannya basah; energi bebas dari tanah jenuh air = 0

$$f = h - Ts$$

di mana f = energi bebas, h = kandungan panas, T = temperatur absolut dan s = entropi dari sistem.

evaporasi (*evaporation*) = transfer larutan air dari permukaan tanah basah ke atmosfer.

evapotranspirasi (*evapotranspiration*) = gabungan evaporasi dan transpirasi untuk menghitung kebutuhan air irigasi dari hamparan pertanaman.

evapotranspirasi potensial (*potential evapotranspiration*) = evapotranspirasi yang terjadi pada kondisi air tanah tersedia secara optimal pada iklim normal dan tanaman tumbuh sehat, tidak terganggu oleh hama/penyakit dan populasi tanaman sesuai anjuran.

hukum Darcy (*Darcy's Law*)

$$v = \frac{kh}{l}$$

di mana, v = kecepatan gerakan air ($\text{cm}^3/\text{cm}/\text{det}$), h = puncak hidrolik (*head*) dalam cm, l = panjang kolom lintasan air, k = konduktivitas hidrolik.

hidrolika (*hydraulics*): cabang ilmu yang berkenaan dengan pengaruh terhadap gerakan dari air.

kapiler (*capillar*): saluran terkecil dalam jaringan di mana air atau larutan mengalir (dalam tanah atau tubuh tanaman).

kecepatan pergerakan air (*flow velocity of water*): volume air yang terbawa/terangkut/tergerak dalam satuan waktu per unit area.

konduktivitas hidrolik (*hydraulic conductivity*): nisbah antara kecepatan dan gaya/kekuatan/tenaga untuk menggerakkan air atau larutan ke keadaan jenuh air.

matrik (*matrix*): material alami yang membentuk benda padat dalam tanah yang terdiri atas partikel-partikel tanah dan organik dsb.

membran (*membrane*): lapisan yang sangat tipis dan lunak yang memisahkan antara pelarut (air) dan larutan, yang:

- berupa lapisan epidermis atau endodermis atau lapisan kutin atau suberin (dapat dilihat dengan mikroskop biasa), juga
- dapat berupa protoplasma sel (diuraikan secara ilmiah oleh seorang ahli biokimia Prof. Dr. Peter Agre).

osmosis (*osmotic*): difusi melalui membran semi-permeabel yang memisahkan antara pelarut (air) dan larutan sehingga konsentrasi cairan menjadi sama.

permeabilitas (*permeability*): kemampuan suatu media yang porous (tanah) dalam mentransmisi air pada kondisi standar atau normal.

Satuan potensi kapiler dan tekanan kapiler adalah negatif karena bertentangan dengan arah mengalirnya air menuju akar tanaman.



Prof. Dr. Peter Agre
Peraih Hadiah Nobel Kimia 2003
John Hopkins University, Baltimore, USA

Membran Aquaporin

- Rangkaian protein istimewa yang membentuk pori-pori di dalam sel bakteri, tanaman, manusia.
- Pori-pori ini memungkinkan air mengalir dalam jaringan tubuh makhluk hidup.

KOMPAS, 27 Maret 2017

potensial (*potential*): kemampuan untuk mengembangkan atau menjadi kenyataan atau tenaga untuk menggerakkan unit massa pada jarak tertentu atau jarak yang diinginkan.

potensi air dari tanah (*soil water potential*): kemampuan tanah menyebabkan kelembaban relatif dalam pori-pori tanah per molar volume dari air (satunya adalah negatif).

potensi kapiler (*capillary potential*): besarnya tenaga/kekuatan/daya untuk menarik/menggerakkan air bebas melawan tenaga/kekuatan/daya pegang atau daya mengikat dari pori-pori kapiler tanah sehingga cairan/larutan terlepas dan masuk ke dalam tubuh tanaman melalui akar.

potensi kimia (*chemical potential*): kemampuan dari substansi (cairan/larutan) dalam menghasilkan efek kimia.

potensi kimia dari air (*chemical potential of water*): kemampuan air dalam menghasilkan efek kimia.

potensi matriks (*matrix potential*): besarnya tenaga/kekuatan/daya untuk menarik/menggerakkan air bebas melawan tenaga/kekuatan/daya pegang atau daya mengikat dari matriks tanah sehingga larutan/cairan terlepas dan masuk ke dalam tubuh tanaman melalui akar.

puncak hidrolis (*hydraulic head*): tinggi air atau sumber air di atas sasaran irigasi.

ratio transpirasi (*transpiration ratio*) : berat air yang ditranspirasi untuk menghasilkan berat kering tanaman.

tekanan kapiler (*capillary pressure*): kekuatan adhesif (saling mengikat) antara benda padat dan cairan/larutan dalam sistem kapiler yang tergantung pada kekuatan ikatan antara molekul cairan/larutan.

tekanan osmosis (*osmotic pressure*): tekanan yang diperlukan untuk menghasilkan osmosis.

tekanan uap (*vapor pressure*): tekanan yang ditimbulkan oleh uap dalam keadaan ekuilibrium atau berimbang dengan bentuknya dalam keadaan padat atau cair.

titik layu (*wilting point*): kandungan air tanah yang tidak memenuhi kebutuhan tanaman untuk menjaga/ mempertahankan turgor, yang menyebabkan tanaman layu.

tingkat-tingkat hidrolik (*hydraulic gradient*): makin berkurangnya tinggi sumber air per unit jarak menuju tingkat penurunan terbesar.

transpirasi (*transpiration*): transfer air ke atmosfer melalui jaringan tanaman (daun) dalam bentuk uap air.

turgor (*turgor*): pembengkakan dari lapisan protoplasma dan dinding sel tanaman akibat dari kandungan cairan.

DAFTAR ISI

PRAKATA	v
PENGANTAR.....	vii
SAMBUTAN	xi
GLOSARIUM Pengertian dan Istilah Khusus untuk Pemahaman Penyuluh Pertanian.....	xv
I. PENDAHULUAN	1
II. FUNGSI AIR BAGI TANAMAN.....	7
2.1. Keterkaitan Fungsi Air dari Aspek Ekologi dan Fisiologi.....	7
2.2. Karakteristik Unik dari Air	10
2.3. Sifat-Sifat dari Larutan dalam Tubuh Tanaman.....	14
2.4. Pergerakan Air dalam Tanaman Menuju Daun	17
III. DINAMIKA AIR TANAH.....	21
3.1. Fisik dan Kimia Tanah	21
3.2. Air Tanah	24
3.3. Klasifikasi Air Tanah	26
3.4. Pengukuran dan Pengendalian Air Tanah.....	30

IV.	PERGERAKAN AIR DARI TANAH KE TANAMAN DAN KE ATMOSFIR	33
4.1.	Mekanisme Pergerakan Air.....	33
4.2.	Cekaman Air	35
V.	STATUS IRIGASI TANAMAN PANGAN	41
5.1.	Potensi Sumberdaya Air dan Masalah yang dihadapi	43
5.2.	Prinsip Irigasi	46
5.3.	Metode Irigasi	61
5.4.	Efisiensi Penggunaan Air untuk Irigasi Pertanian...	64
5.5.	Makna dari Pengelolaan Air Secara Terpadu Berbasis Ekoregional.....	67
VI.	PERENCANAAN, PENGATURAN, DAN DISTRIBUSI AIR	73
6.1.	Pengaruh Tipe Sistem Irigasi Terhadap Rencana Pengaturan Distribusi Air	73
6.2.	Sistem Irigasi Gravitasi Terbuka	74
6.3.	Hukum Darcy dalam Penyaluran Air untuk Irigasi.....	78
VII.	KIAT-KIAT PENYALURAN AIR IRIGASI SECARA BERGILIR	81
7.1.	Prioritas Daerah Pergiliran Air.....	81
7.2.	Penentuan Batas dan Jumlah Petakan Rotasi	83
7.3.	Implikasi dan Penetapan Prioritas Daerah Pergiliran Air dan <i>Stress Day</i>	86

7.4. Contoh Penerapan Teknik Irigasi Bergilir di Lokasi SRI, Desa Salebu, Kecamatan Mangunreja, Tasikmalaya	88
7.5. Keunggulan Irigasi Bergilir.....	90
7.6. Pergiliran Air Irigasi pada Sistem Gravitasi Tertutup dan Pipanisasi	97
7.7. Kasus KP Jakenan.....	102
VIII. PENGUKURAN DEBIT AIR PADA SALURAN IRIGASI.....	119
8.1. Di Mana dan Bagaimana Arus Aliran Air Irigasi Diukur	120
8.2. Pintu Air – <i>Weirs</i>	121
8.3. Perawatan <i>Weirs</i>	127
8.4. Pompanisasi dan Pipanisasi.....	128
8.5. Satuan-satuan Pengukur Standar Internasional dan Nasional	130
IX. ORGANISASI PENGELOLAAN AIR IRIGASI DI TINGKAT LAPANG	133
9.1. Konsep Pasten	133
9.2. Harmonisasi Kelompok Tani dan P3A.....	137
9.3. Partisipasi petani dalam Pengelolaan Air Irigasi di Tingkat Usahatani	140
X. PENGEMBANGAN LAHAN DAN PENCETAKAN SAWAH IRIGASI BARU.....	143
10.1. Kronologi Kegiatan Pengembangan dan Pencetakan Lahan Sawah Irigasi KP Sukamandi	145
10.2. Aspek Teknik Budidaya Padi.....	151

XI PENUTUP.....	157
EXECUTIVE SUMMARY.....	159
PUSTAKA.....	165
LAMPIRAN	173
INDEKS	201

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Komposisi fraksi (partikel) padat dari tanah yang membentuk tekstur tanah berdasarkan ISSS.....	22
Tabel 2.	KTK dari mineral liat dan humus	23
Tabel 3.	Perbandingan beberapa sifat fisik tanah berkenaan dengan status air tanah pada 6 tekstur tanah.....	29
Tabel 4.	Neraca air pada sistem irigasi yang belum menerapkan teknik irigasi maju di Amerika Serikat.....	66
Tabel 5.	Nilai RWS pada hamparan sawah pertanaman padi di bagian hulu, tengah dan hilir serta pengaruhnya terhadap hasil gabah (lokasi pada daerah irigasi Masan, Binong (Subang), Jawa Barat.....	83
Tabel 6.	Pengaruh selang pemberian air irigasi terhadap hasil padi sawah (rata-rata dari varietas IR36 dan Cipunegara) di KP Sukamandi, MK 1982	84
Tabel 7.	Pembagian air irigasi secara bergilir berdasarkan nilai K.....	85
Tabel 8.	Hasil gabah, konsumsi air irigasi dan efisiensi penggunaan air irigasi (rata-rata varietas padi Bogowonto, IR36, IR52, IR54) karena irigasi intermitent di Sukamandi, wilayah Jatiluhur MH 1984/85 dan MK 1985	93

Tabel 9. Neraca air pada 3 cara teknik irigasi pada minapadi di KP Sukamandi, MH 1988/1989 dan MK 1989	94
Tabel 10. Perbandingan hasil dan GWP dari pengaruh paket teknologi budidaya dan teknik irigasi di KP Jakenan, Balingan, MK dan MH.....	95
Tabel 11. Perbandingan volume penggunaan air irigasi, hasil gabah dan efisiensi hasil antara irigasi bergilir dan pengairan terus-menerus pada <i>Upper Pampanga Research Project</i> , Filipina, MK 1974	96
Tabel 12. Analisis fisik dan kimia tanah KP Jakenan di lokasi penelitian INSURF.....	104
Tabel 13. Pengaruh pemupukan N, P, K terhadap hasil gabah varietas C4-63 gogoranch pada tanah planosol KP Jakenan, MH 1993/74	107
Tabel 14. Pemupukan organik dan anorganik pada padi varietas IR64 di KP Jakenan	108
Tabel 15. Peluang terjadinya kekeringan pada pertanaman padi walik jerami dan palawija di KP Jakenan ; analisis dibuat dari data curah hujan selama 40 tahun (1953-1992).....	109
Tabel 16. Komponen teknologi PTT padi gogoranch pada lahan sawah tadah hujan	112
Tabel 17. Ukuran embung, luas daerah tangkapan air hujan dan luas tanaman jagung varietas lokal yang dapat diairi dengan teknik penyiraman.....	116
Tabel 18. Kebutuhan air tanaman relatif (RIR) dari tanaman padi, tebu, dan palawija, Proyek Irigasi Pekalen Sampean, 1973-1974.....	135
Tabel 19. Pembagian tugas antara Poktan dan P3A pada hamparan padi yang menerapkan irigasi bergilir	137

Tabel 20. Neraca lahan sawah irigasi periode 1981-1999.....	144
Tabel 21. Kebutuhan air tanaman padi di KP. Sukamandi, BB Padi (dulu LP3 Cabang Sukamandi).....	153

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Interaksi antara sifat-sifat yang diturunkan tanaman dengan lingkungan tumbuh tanaman dan pengaruhnya terhadap proses fisiologis tanaman.....	9
Gambar 2.	Molekul air dilihat dari aspek fisik dan kimia yang berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia dari air.....	11
Gambar 3.	Siklus hidrologi mengilustrasikan komponen neraca air	31
Gambar 4.	Contoh kurva infiltrasi dan runoff berdasarkan data dari infiltrometer	55
Gambar 5.	Neraca air pada pertanaman padi sawah irigasi	57
Gambar 6.	Alat pengukur kedalaman air genangan (skala miring).....	58
Gambar 7.	Piezometer ditanamkan ke dalam tanah di petakan sawah antara rumpun tanaman padi.....	58
Gambar 8.	Bak yang dirancang khusus untuk mengetahui perubahan tinggi air karena evaporasi (E), transpirasi (T), dan perkolasi (P)	59
Gambar 9.	Ilustrasi transek toposekuen dari Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan kedalaman air tanah yang berbeda.....	68

Gambar 10. Ilustrasi inisiatif ekoregional yang menunjukkan diversifikasi pada berbagai skala usaha dan pelestarian daya dukung lahan, serta pengolahan hasil.....	70
Gambar 11. Ilustrasi contoh dari pengairan terus-menerus dari petak ke petak sawah; sumber air dari sungai (tekstur tanah lebih berat dari petakan sawah yang letaknya paling rendah)	77
Gambar 12. Ilustrasi volume pendistribusian air diindikasikan dengan RWS	82
Gambar 13. Contoh pembagian petakan pergiliran dalam blok irigasi tersier seluas 50 ha	87
Gambar 14. Luas areal tanam padi sawah di wilayah pengairan Timur, sistem irigasi Jatiluhur, pada MK setelah diterapkannya irigasi bergilir	91
Gambar 15. Respon PB36 terhadap takaran pupuk urea pada berbagai interval pengairan di jalur Pantura Ciasem, sistem irigasi S. Cilamaya	92
Gambar 16. Perbedaan muka air di waduk/tandon air dan permukaan lahan pertanian rendah (<i>low head</i>) atau agak datar	98
Gambar 17. Pengaturan air dengan pipanisasi semi-terbuka pada perbedaan muka air di waduk (tandon air) rendah atau agak datar	99
Gambar 18. Skema pengangkatan air dan ditampung di penampung untuk dialirkan ke lahan pertanian (a); contoh tiga tingkat penampungan air untuk lahan yang makin rendah (b)	100
Gambar 19. Penampung ditinggikan berupa tangki agar tekanan ke daerah lebih rendah mampu menggerakkan <i>sprinkler</i>	101

Gambar 20. Fluktuasi curah hujan dari tahun 1953-1991 di KP Jakenan, Balingtan, Pati, Jawa Tengah	105
Gambar 21. Pola distribusi curah hujan bulanan pada tahun basah (rata-rata 22 tahun) di KP Jakenan, Balingtan	110
Gambar 22. Pola distribusi curah hujan bulanan pada tahun kering (rata-rata 18 tahun) di KP Jakenan, Balingtan	111
Gambar 23. Contoh jaringan saluran irigasi; sumber air adalah sungai (A); contoh hasil pengukuran debit air sepanjang tahun dari 3 saluran tersier dengan debit air tinggi (<i>high</i>), sedang (<i>intermediate</i>) dan rendah (<i>low</i>) (B).....	120
Gambar 24. Penampang vertikal dari rectangular weir (a); pemasangan <i>rectangular weir</i> pada saluran irigasi (b) dan <i>rectangular weir</i> dalam box (c).....	122
Gambar 25. Contoh bentuk dari <i>trapezoidal weir</i> dan pemasangannya secara permanen pada saluran air...	124
Gambar 26. Ilustrasi konstruksi dari <i>trapezoidal weir</i> (<i>Cipoletti weir</i>)	125
Gambar 27. Skema bentuk dari 90o <i>V-notch weir</i> (a), dan operasionalisasinya di lapang; struktur bangunan permanen.....	126
Gambar 28. Contoh jaringan irigasi di wilayah irigasi Tulungagung-Trenggalek, pengaliran air DAS Brantas	140
Gambar 29. Hasil pengembangan lahan, pencetakan dan perataan lahan menjadi blok-blok sawah irigasi di KP Sukamandi, Balittan Sukamandi (Kebun Timur).....	147

Gambar 30. Hasil Pengembangan lahan, pencetakan dan perataan lahan menjadi blok-blok sawah irigasi dari KP Sukamandi (Kebun Barat), sebagian blok (\pm 80 ha) ke arah desa Patok Beusi diserahkan kepada Balai Penelitian Ikan Air Tawar.....	148
Gambar 31. Kurva peluang berbagai intensitas curah hujan di KP Sukamandi, BB-Padi	149

Bab. 1

PENDAHULUAN

Produksi pertanian tanaman pangan, khususnya produksi padi menghadapi empat ketidakpastian, yaitu: ketidakpastian iklim, ketidakpastian kesuburan tanah, ketidakpastian sistem usahatani (SUT) dan ketidakpastian harga hasil pertanian. Ketidakpastian iklim adalah yang paling krusial dan tidak mudah ditangani. Diantara unsur iklim, curah hujanlah yang paling menentukan keberhasilan program intensifikasi padi, karena curah hujan adalah sumberdaya air yang disalurkan ke lahan pertanian langsung melalui sungai atau ditampung terlebih dahulu di dalam waduk dan embung. Sungai dan waduk/embung dilengkapi dengan infrastruktur irigasi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air irigasi. Upaya inipun tidak menjamin penuh keberhasilan penyediaan air irigasi akibat dari fluktuasi curah hujan.

Iklim muson Indonesia dicirikan oleh intensitas dan distribusi hujan tahunan dan dekade yang fluktuatif yang sampai saat ini tidak mudah diramal atau diprediksi. Kondisi ini diperparah oleh kejadian iklim ekstrim *La Nina* dan *El Nino*. Pengaruh negatif dari iklim ekstrim yang dampak negatifnya luas adalah *El Nino*. Kemarau panjang yang disebabkan oleh *El Nino* menurunkan produksi padi. Fluktuasi produksi padi terjadi pada periode 1969-2005. Kekeringan terjadi pada 1972, 1976, 1982, 1987, 1991, 1994, dan 1997. Rekayasa sistem produksi Bimas Baru, INSUS, OPSUS,

SUPRA INSUS, GEMA PALAGUNG mampu menaikkan produksi, tetapi tidak mampu meniadakan impor, karena laju kenaikan permintaan lebih besar dari laju kenaikan penyediaan (Fagi *et al.* 2002).

Fenomena kemarau panjang dan dampaknya menarik perhatian organisasi profesi PERHIMPI (Perhimpunan Meteorologi Pertanian) dan PERAGI (Perhimpunan Agronomi Indonesia) (PERHIMPI 1992); PERAGI dan PERHIMPI 1995). Diskusi-diskusi yang diinisiasi oleh PERHIMPI dan PERAGI menghasilkan konsep Gerakan Hemat Air. Metode atau teknik penghematan air irigasi tidak secara spesifik dianjurkan. Kekhawatiran asosiasi peneliti dalam wadah PERHIMPI dan PERAGI sejalan dengan pengambil kebijakan pada Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian periode 2009/2010-2013/2014 (Pawitan *et al.* 2008).

Dalam upaya peningkatan produksi padi dan mencapai kemandirian pangan, pemerintah periode 2014/2015-2018/2019 membangun sejumlah waduk baru dan jaringan irigasi yang mencakup area pertanaman padi sawah lebih dari 3,0 juta ha. Pembangunan ini kehilangan makna kalau sumber air di DAS (daerah aliran sungai) hulu dan tengah tidak dikonservasi. Maka, pendekatan ekoregional harus ditempuh agar pembangunan pertanian dan pemanfaatan sumberdaya alam umumnya dan sumberdaya air khususnya dilaksanakan oleh lintas kementerian sesuai dengan ketentuan KISS (koordinasi, integrasi, sinkronisasi dan sinergi) (IRRI 1997).

Berkenaan dengan Gerakan Hemat Air, peneliti Program Penelitian Tataguna Air dari Balittan (Balai penelitian Tanaman Pangan Sukamandi), sekarang menjadi Balai Besar Penelitian Tanaman Padi (BB Padi), menganjurkan teknik irigasi bergilir, yang selain mampu menghemat air juga mampu menekan emisi GRK (gas metan = CH_4) (Balingtang dan ICRAF, 2015) secara spektakuler (sekitar 50%). Penerapan teknik irigasi yang efektif dan efisien akan lebih diyakini oleh teknisi dan penyuluh lapangan kalau mereka

memahami aspek teori yang berkenaan dengan fisiologi tanaman dan regim air tanah, serta mempraktekkan dan menyuluhkan teknik irigasi bergilir secara konsisten dan mantap. Perlu diingat bahwa praktek teknik irigasi bergilir perlu jaringan irigasi yang terpelihara dan dilengkapi dengan pintu-pintu pengukur debit air. Sebab itu perlu KISS organisasi petani pemakai air (P3A-Mitra Cai).

Pemerintah periode 2014-2015 sampai 2018-2019 mengantisipasi kelangkaan air untuk pertanian dengan strategi yang jelas, seperti diekspresikan, dan tindakan langsung di lapang (Kompas, 2017):

- 1) Ketahanan pangan adalah salah satu pilar dari ketahanan nasional,
- 2) Ketahanan pangan lebih terjamin kalau didukung oleh ketahanan air,
- 3) Potensi air di Indonesia sebesar 3,9 triliun m³ per tahun, yang dimanfaatkan baru sekitar 691 miliar m³ (19% untuk kebutuhan air domestik dan industri, dan 81% untuk irigasi pertanian),
- 4) Efisiensi air irigasi masih rendah, terutama karena kehilangan air di saluran irigasi mencapai 55%, sebab itu pada periode 2015-2019 akan dibangun irigasi baru yang mencakup area sawah 1,3 juta ha dan rehabilitas irigasi lama yang mencakup 2,3 juta ha, selain itu direncanakan pembangunan 65 bendungan (bendungan tingkat usaha tani dengan skala kecil adalah embung).

Keberhasilan program pemerintah menghadapi tantangan perubahan iklim global yang akan berpengaruh terhadap ketersediaan air.

Landasan ilmiah dasar yang menyangkut ilmu iklim, fisiologi tanaman dan tanah dipresentasikan oleh beberapa peserta panel diskusi (PERAGI-PERHIMPI, 1995) secara garis besar. Buku ini

melengkapinya dengan mengelompokkan pembahasannya ke dalam dua bagian:

Bagian I : Dasar-Dasar Teori Aspek Fisiologi dan Regim Air Tanah.

Bagian II : Implikasi Teori dalam Praktek Irigasi Adaptif terhadap Ancaman Kelangkaan Air: Teknik Irigasi Bergilir.

Dasar-Dasar Teori
Aspek Fisiologi dan
Regim Air Tanah

BAB II

FUNGSI AIR BAGI TANAMAN

Air penting secara kuantitatif dan kualitatif bagi tanaman, dan menyumbang 80-90% dari berat basah dari semua bagian tanaman herba (batang tubuhnya lunak); sumbangan air terhadap berat basah batang tubuh tanaman keras atau berkayu sekitar 50%.

Pentingnya air dapat dilihat dari aspek ekologi dan fisiologi yang saling terkait.

2.1. Keterkaitan Fungsi Air dari Aspek Ekologi dan Fisiologi

2.1.1 Aspek ekologi

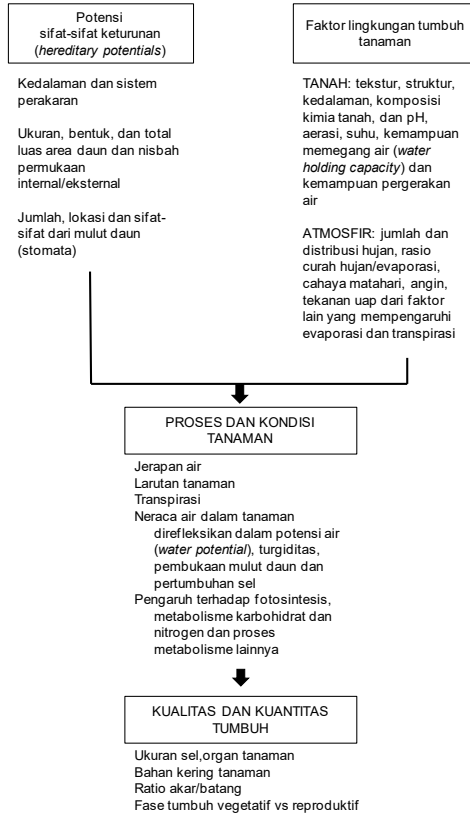
Sebaran berbagai jenis tanaman atau vegetasi di permukaan bumi lebih dipengaruhi oleh ketersediaan air daripada oleh faktor tunggal selain air. Wilayah di mana curah hujan banyak dan tersebar rata sepanjang pertumbuhan tanaman ditumbuhi oleh vegetasi yang rimbun seperti hutan hujan tropis di wilayah tropika basah. Di wilayah lain yang mengalami kekeringan pada musim kemarau yang panas, padang rumput dominan, seperti steppa di Nusa Tenggara Timur dan Nusa Tenggara Barat, dsb. Makin berkurangnya hujan menyebabkan dominasi semi-padang pasir yang ditumbuhi semak-semak dan menjadi padang pasir kalau curah hujan makin sedikit.

Pengaruh suhu udara yang tinggi mengurangi kandungan air di tubuh tanaman. Suhu tubuh tanaman akan turun akibat dari berkurangnya laju evaporasi dan transpirasi. Jadi, jumlah air hujan yang sesuai bagi wilayah padang rumput, di wilayah lain dengan jumlah curah hujan yang sama tetapi suhu udaranya sejuk sesuai bagi tumbuhnya pepohonan hutan karena laju evapotranspirasi yang rendah. Fakta ini menghasilkan konsep ratio curah hujan- evaporasi atau *the rainfall-evaporation concept* (Kramer, 1975).

Sebaran vegetasi adalah akibat dari fungsi fisiologis dari air. Proses fisiologi dalam tanaman (*physiological process*) dan kondisi lingkungan tumbuh tanaman (*environmental condition*) terutama ketersediaan air berinteraksi seperti diilustrasikan dalam Gambar 1. Hampir semua proses fisiologis yang berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman dipengaruhi baik langsung atau tidak langsung oleh ketersediaan air bagi tanaman. Aktivitas metabolisme sel dan tanaman sangat berkaitan dengan kandungan air dalam tanaman.

Umumnya semua pihak lebih menyadari pentingnya air bagi tanaman kalau terjadi kekeringan yang berpengaruh negatif terhadap produksi pertanian. Kekeringan menyebabkan tanaman menderita *stress* atau cekaman kekurangan air. Hasil pengamatan peneliti yang dievaluasi oleh Kramer (1975) menyimpulkan fungsi air bagi tanaman, yaitu:

- (1) Sebagai reagen atau reaktan dalam proses-proses penting seperti fotosintesis dan hidrolisis, antara lain hidrolisis dari tepung hasil fotosintesis menjadi gula,
- (2) Sebagai pelarut (*solvent*) dari gas, mineral (unsur hara) dan larutan air lain yang masuk ke tubuh tanaman melalui akar (*massflow*), dari sel ke sel, dan dari organ ke organ tanaman.



Gambar 1. Interaksi antara sifat-sifat yang diturunkan tanaman dengan lingkungan tumbuh tanaman dan pengaruhnya terhadap proses fisiologis tanaman.

Sumber: Kramer, 1975

- (3) Sebagai penjaga turgor tanaman yang penting bagi perkembangan sel-sel dan pertumbuhan tanaman yang *succulent* (lunak),
- (4) Sebagai penstabil suhu tanaman melalui transpirasi; transpirasi yang berlebihan karena panas terik dihindari dengan menutup mulut daun yang berakibat terhadap naiknya suhu tanaman, kemudian daun layu karena pengurangan turgor.

2.1.2. Aspek fisiologi

Salisbury dan Ross (1969) menguraikan pentingnya air bagi kehidupan berkenaan dengan sifat-sifat fisika dan kimia yang unik dari air.

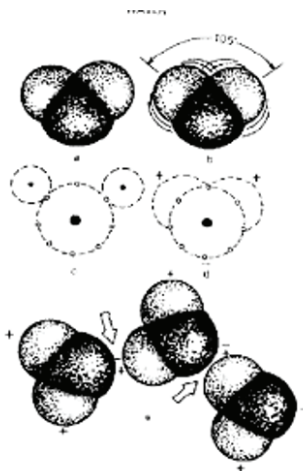
- 1) Proses metabolisme (*biokimis* dan *enzimatis*) dalam protoplasma sel. Reaksi metabolisme berlangsung dalam larutan air. Molekul-molekul air berintegrasi dengan komponen-komponen metabolisme berupa reaksi kimia seperti dalam fotosintesis dan hidrolisis lemak/tepung.
- 2) Molekul-molekul makro dari protoplasma, seperti protein dan enzim adalah katalisator dari reaksi metabolisme dalam kehidupan asam, nukleus (*nucleic acid*) membawa informasi dari kehidupan, dan lainnya seperti tepung (*starch*) dan pektin membentuk struktur unik dalam asosiasi dengan molekul air.
- 3) Batang, akar, daun, tunas dan buah terujud bentuknya oleh air sebagai penyebab dari turbiditas akibat dari tekanan air (water pressure) dalam sel-selnya, perubahan dari tekanan hidrolika air memicu pertumbuhan dan gerakan dari bagian-bagian tanaman.
- 4) Gerakan atau transportasi bahan-bahan ke bagian-bagian tanaman melalui difusi bahan-bahan terlarut dalam menembus membran dan dinding sel yang dipenuhi oleh larutan air.
- 5) Sangat tingginya suhu spesifik (*specific heat*) dari air karena fusi diimbangi dengan penguapan air (*vaporization*), dan ini menstabilkan suhu tanaman; ketika tanaman diterpa suhu tinggi oleh sinar matahari, sebagian dari suhu itu di kembalikan ke lingkungan melalui penguapan air dari tanaman, khususnya dari daun.

2.2. Karakteristik Unik dari Air

Mengapa air berfungsi sangat penting dalam kehidupan, khususnya dalam pertumbuhan tanaman dan pertanian? Garis

besar tentang keterkaitan antara tanaman dan lingkungan tumbuh (Gambar 1), khususnya air, akan lebih dipahami dengan mengenal karakteristik dari air; seperti berikut:

Karakteristik unik dari air diilustrasikan oleh Salisbury dan Ross (1969) secara lebih sederhana, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Molekul air dilihat dari aspek fisik dan kimia yang berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia dari air.

Sumber: *Salisbury and Ross (1969)*

Garis-garis yang menghubungkan titik pusat dari dua atom hidrogen dengan titik pusat atom oksigen membentuk sudut 105° miring ke kanan (terlihat dalam kristal air dalam bentuk es). Dua elektron yang mengitari atom hidrogen dalam bentuk molekul air tunggal: satu elektron dari atom hidrogen itu sendiri dan satunya lagi berasal atau dipinjam dari atom oksigen. Elektron ini tidak tersebar rata dalam nukleus hidrogen, tetapi cenderung lebih dekat dengan nukleus oksigen. Sementara muatan dari molekul air seharusnya netral, tetapi karena molekul air (dua atom hidrogen dan satu atom oksigen membentuk sudut 105°), maka satu molekul air bermuatan sedikit positif. Pada molekul air yang lain

elektron atom hidrogen menjauhi atom oksigen sehingga molekul air bermuatan agak negatif. Dalam kumpulan molekul air posisi molekul air tunggal saling mengimbangi, sehingga kumpulan molekul air itu bereaksi netral oleh muatan elektron dari atom hidrogen.

Karena kemampuan reorientasi elektron dalam atom hidrogen dalam molekul dan kumpulan molekul air, maka air bersifat polar (kumpulan molekul berimbang antara muatan negatif dan positif), dan kemampuan atom hidrogen dalam mewujudkan muatan netral dari air disebut ikatan hidrogen (*hydrogen bonds*), yang lebih kuat dari *van der Waals forces*, (kemampuan saling mengikat antara molekul cairan atau larutan lain atau antara benda padat).

Hydrogen bonds dalam molekul air menyebabkan air mempunyai karakteristik fisika dan kimia yang berguna dalam kehidupan.

2.2.1. Aspek fisik

Aspek fisik dari air, seperti diuraikan berikut, menyebabkan berbagai jenis tanaman mampu menyesuaikan diri dengan ekosistem tertentu atau spesifik, yaitu: 1) penghantar panas lebih baik dari larutan lain yang mengandung bahan non-metal, 2) pemanasan spesifik (*specific heat*): jumlah energi untuk memanaskan 1,0 gram air 1,0oC (satunya kalori), 3) pemanasan untuk penguapan (*heat of vaporization*): besarnya 540 kalori/gram air pada suhu 100°C; hal ini menyebabkan air mempunyai pengaruh pendinginan (*cooling effect*), menstabilkan suhu, 4) transparan terhadap cahaya matahari, tetapi menahan cahaya gelombang panjang, maka air adalah penyerap panas yang baik, 5) kerapatan air cukup tinggi (tetapi tidak serapat air raksa); kerapatan maksimum pada suhu 4°C; kerapatan justru melonggar dan volumenya naik 10%, saat suhu mencapai titik beku, maka es mengambang di atas permukaan air, 6) tegangan permukaan air dan viskositas lebih tinggi dari cairan larutan, karena air murni

mempunyai tenaga kohesif internal (saling mengikat) antara molekul air yang tinggi.

Pemanasan untuk pencairan (*heat of melting*) adalah 80 kalori/gram; Kondensasi atau pembekuan air mempunyai pengaruh pemanasan (*warming effect*).

2.2.2. Aspek kimia

Air sebagai reagen atau reaktan dalam fotosintesis dan hidrolisis dan pelarut dari gas dan mineral menunjukkan bahwa aspek fisik dari air tidak dapat dipisahkan dari aspek kimia. Di dalam tubuh tanaman aspek fisik dan aspek kimia berperan dalam reaksi fisiko-kimia.

Keistimewaan molekul air memfasilitasi reaksi fisiko-kimia, yaitu: air sedikit sekali mengalami ionisasi (hanya satu molekul dapat terionisasi dari $5,5 \times 10^8$ molekul), ion hidrogen (H^+) seluruhnya proton, maka H^+ tidak bisa bebas dan selalu berasosiasi dengan air; disosiasi air:



Karena sedikit terionisasi, maka air mempunyai konstanta dielektrik yang tinggi, maka air adalah pelarut yang baik, pelarut yang baik bagi elektrolit, karena penarikan ion dalam elektrolit ke muatan positif dan negatif dari air; ini membuat ikatan ganda (*dipole bonds*), juga pelarut yang baik bagi non-elektrolit, karena membentuk ikatan hidrogen (*hydrogen bonds*) dengan grup amino dan hidroksil, dan air terikat secara kuat dengan permukaan selulosa, mineral liat, molekul protein, dll.

Karakteristik fisik dan kimia dari air adalah penting dalam kaitannya dengan hubungan antara air tanah dan air dalam tanaman.

2.3. Sifat-Sifat dari Larutan dalam Tubuh Tanaman

Semua larutan dalam tubuh tanaman yang berfungsi dalam proses fisiologi tanaman tidak berupa air murni, karena air yang diserap akar dari tanah mengandung berbagai bahan terlarut seperti unsur hara, senyawa asam-asam organik, dsb. Sebab itu penting dipahami bahwa larutan dalam tubuh tanaman berbeda dengan air murni. Perbedaan itu menyebabkan dinamika larutan yang dapat dihitung dengan rumus-rumus fisiko-kimia (*physical chemistry*).

Dinamika larutan dalam tubuh tanaman memperjelas fungsi air bagi tanaman. Hal ini dimungkinkan karena karakteristik unik dari air, maka berfungsi dalam jerapan air dari tanah oleh akar tanaman dan transportasi unsur hara yang dikandung ke bagian-bagian aktif dari tubuh tanaman.

Tekanan uap

Tekanan uap mengikuti hukum Raoult (Kramer, 1975) yang diekspresikan dalam rumus:

$$e = e^o \frac{n_w}{n_w + n_s}$$

di mana, e = tekanan uap, e^o = tekanan uap dari pelarut murni (air), n_w = jumlah molar dari pelarut, dan n_s = jumlah molar dari bahan terlarut

Turunnya tekanan uap dari air akibat dari penambahan bahan terlarut menurunkan suhu pada titik beku, tetapi menaikkan suhu pada titik didih (titik beku air 0°C, dan titik didihnya 100°C).

Tekanan uap dari larutan menurun kalau air mengandung bahan-bahan terlarut. Kasus ini dalam tubuh tanaman berpengaruh terhadap pergerakan air dari sel ke sel, dan dari jaringan ke jaringan dalam tubuh tanaman.

Tekanan osmosis

Tekanan osmosis berkaitan langsung dengan konsentrasi bahan-bahan terlarut dalam larutan. Jika air murni dan larutan dipisahkan oleh membran yang permeabel terhadap air, tetapi tidak permeabel terhadap bahan terlarut, maka air akan menembus membran ke arah gradien penurunan tekanan uap. Tekanan yang harus diberikan ke larutan sampai tekanan uap dari larutan sama dengan tekanan uap dari air disebut tekanan osmosis dengan simbol π .

Tekanan osmosis dapat dihitung dengan persamaan Van't Hoff:

$$\pi V = nsRT \rightarrow \pi = \frac{nsRT}{V}$$

di mana, π = tekanan osmosis, V = volume dari larutan, ns = molar dari bahan terlarut, R = konstanta gas (0,082 liter atm/tingkat molar), dan T = suhu absolut. Untuk 1 mole dari bahan terlarut dalam 1 liter larutan pada 273°K menghasilkan $\pi = 22,4$ atm atau 22,7 bar.

Tekanan osmosis dapat dihitung dengan menggunakan tekanan uap atau dengan tekanan uap relatif atau dengan kelembaban relatif (*relative humidity*), dengan menggunakan rumus Raoult:

$$\frac{e}{e^0} = \frac{n_w}{n_w + n_s}$$

$\frac{e}{e^0}$ diukur dengan alat *thermocouple psychrometer*; $\frac{e}{e^0} =$ kelembaban relatif.

Tekanan uap dan tekanan osmosis saling terkait, keduanya menunjukkan bagaimana air bergerak dari sel ke sel dan dari jaringan ke jaringan. Dinding sel berfungsi sebagai membran.

Potensi kimia dari air

Potensi kimia (*chemical potential*) dari suatu substansi dalam sistem adalah indikator dari kemampuan substansi tersebut untuk bereaksi. Dalam larutan sederhana non-elektrolit, potensi kimia dari air tergantung pada rata-rata energi bebas per molekul air dan konsentrasi dari molekul air (*mole fraction of the water*). Besarnya penurunan potensi kimia dari air dalam larutan dibanding dengan potensi kimia dari air murni diekspresikan dalam rumus:

$$\mu_w - \mu_w^0 = RT \ln N_w$$

di mana, μ_w = potensi kimia air dalam larutan, μ_w^0 = potensi kimia dari air murni, R = konstanta gas, dan T = suhu absolut, N_w = fraksi molar dari air.

Untuk perhitungan secara umum, dimana air tidak mengandung bahan terlarut sederhana, formula yang digunakan

$$\mu_w - \mu_w^0 = RT \ln \frac{e}{e^0}$$

di mana, $\frac{e}{e^0}$ = kelembaban relatif (*relative humidity*). Kalau tekanan uap air dalam sistem sama dengan air murni, maka $\ln \frac{e}{e^0} = 0$, dan

$\mu_w - \mu_w^0 = 0$; maka, potensi kimia air murni = 0. Jika tekanan uap air dari dalam sistem dan potensi kimia dari larutan lebih rendah dari potensi kimia dari air murni, maka $\ln \frac{e}{e^0}$ berupa angka negatif; jadi potensi kimia dari larutan lebih rendah dari potensi kimia dari air murni (angkanya negatif) atau potensi kimia air tertinggi = 0.

Satuan potensi kimia diekspresikan dalam unit energi per unit volume. Kalau persamaan kiri dan kanan di atas sama-sama dibagi

dengan molar volume dari air $\left(\frac{-}{V_w} \right)$

$$\psi_w = \frac{\mu_w - \mu_w^o}{\bar{V}_w} = \frac{RT \ln \frac{e}{e^o}}{\bar{V}_w}$$

di mana, ψ_w = potensi air (*water potential*); satuan dari potensi air adalah bar atau atmosfer (1 bar = 0,987 atm = 106 dyne/cm² atau ergs/cm³).

Potensi air dari sistem menurun karena faktor-faktor yang mengurangi tekanan uap relatif, seperti berikut: (1) penambahan bahan terlarut yang mengurangi kemampuan air, mengurangi aktivitasnya melalui hidrasi molekul bahan terlarut atau ion, (2) gaya matriks yang berupa gaya permukaan (*surface forces*) dan gaya mikrokapiler pori-pori tanah, dinding sel, protoplasma dan substansi lain yang menjerap atau mengikat air, (3) tekanan negatif atau tension dalam xylem dari tanaman yang sedang menguapkan air, (4) penurunan suhu absolut (T).

Potensi air dari sistem naik karena faktor yang meningkatkan tekanan uap; akibat tekanan karena pembesaran dinding sel dan isi dari sel dan kenaikan suhu absolut.

Potensi kimia dari larutan dalam tanaman lebih rendah dari potensi kimia dari air yang diisap oleh akar tanaman. Potensi kimia dari larutan yang rendah menyebabkan potensi air larutan yang rendah. Sebab itu larutan dengan potensi kimia lebih tinggi akan bergerak menuju ke larutan dengan potensi kimia lebih rendah. Ini, adalah mekanisme lain yang menyebabkan gerakan air di dalam jaringan tanaman.

2.4. Pergerakan Air dalam Tanaman Menuju Daun

Pergerakan air dari sel ke sel dan dari jaringan ke jaringan dengan berbagai mekanisme telah diuraikan sebelumnya.

Tubuh tanaman terdiri atas banyak sekali sel dan jaringan. Jadi, aliran air dari tubuh tanaman menuju permukaan daun yang

berakhir dalam bentuk transpirasi adalah agregasi dari pergerakan air dari sel ke sel dan dari jaringan ke jaringan. Maka, aliran air dalam tubuh tanaman adalah pergerakan yang berkesinambungan dari sel ke sel dari jaringan ke jaringan. Dua cara pergerakan air dalam tanaman, adalah: (a) pergerakan pasif berupa difusi dan pergerakan massal (*mass flow*), dan (b) pergerakan aktif yang tergantung pada energi yang dihasilkan oleh proses metabolisme tanaman.

Pergerakan air melalui difusi

Difusi dari larutan merupakan pergerakan tidak teratur (random) dari molekul, ion-ion atau partikel koloid yang disebabkan oleh energi kinetik dari masing-masing unsur tersebut, yang prosesnya lambat. Contoh dari proses difusi adalah penguapan (evaporasi) dari larutan, osmosis dan absorpsi (imbibition) yang diekspresikan secara matematis:

$$\frac{dm}{dt} = -DA \frac{dc}{dx}$$

di mana, dm = jumlah bahan (*substances*) yang bergerak per satuan waktu dt ; D = koefisien difusi (konstanta ini besarnya berbeda antara substansi); A = luasan di mana difusi berlangsung; dc = perbedaan konsentrasi substansi dari mana substansi itu bergerak dengan konsentrasi dimana substansi masuk; dx = jarak berlangsungnya difusi.

Catatan: perbedaan konsentrasi substansi dalam larutan air menyebabkan adanya perbedaan potensi kimia, potensi air, dan osmosis.

Pergerakan air secara osmosis

Osmosis adalah difusi melalui membran, karena adanya perbedaan potensi kimia (*chemical potential*) atau potensi air (*water potential*) antara sel-sel atau jaringan.

Membran adalah pembatas antara sel dengan luar sel berupa lapisan epidermis dan endodermis atau lapisan kutin atau suberin yang membentuk dinding sel; ini dapat dilihat melalui mikroskop biasa; membran dapat juga berupa protoplasma sel (hanya dapat dilihat dengan mikroskop khusus). Membran mempunyai permeabilitas (*permeability*), disebut juga konduktivitas hidraulik (*hydraulic conductivity*). Membran tidak permeabel terhadap larutan substansi polar seperti larutan tepung dan gula sebagai substansi penting dalam metabolisme tanaman; pergerakannya difasilitasi oleh mekanisme pergerakan aktif berupa energi yang berasal dari proses respirasi.

Potensi osmotik (*osmotic potential*) dari cairan sel-sel dalam xylem pada batang tanaman lebih rendah dari yang dalam akar; perbedaan itu disebabkan oleh perbedaan potensi air. Pergerakan air dalam akar terjadi melalui difusi atau aliran air lambat. Keterlambatan pergerakan air dalam akar ke organ-organ bagian atas tanaman merupakan kasus yang disebut daya hambat akar (*root resistance*) terhadap gerakan air dari tanah ke tanaman.

BAB III

DINAMIKA AIR TANAH

Tanah selain sebagai media tumbuh tanaman juga sebagai penyimpan air untuk tanaman. Demikian pula tanah adalah penyedia unsur hara tanaman dan media berkumpulnya mikroorganisme ~ bakteri, cendawan, alga (ganggang), protozoa dan bermacam jenis insekta.

3.1. Fisik dan Kimia Tanah

Uraian singkat dari karakteristik fisik dan kima tanah diacu dari penjelasan yang mendalam dalam buku Brady (1974) yang sangat populer di kalangan ahli ilmu tanah internasional.

Struktur

Partikel-partikel tanah berupa pasir kasar (*coarse sand*), pasir halus (*fine sand*), debu (*silt*) dan liat (*clay*). Komposisi partikel-partikel tersebut dan bahan organik membentuk struktur tanah. Struktur tanah tertata dalam berbagai bentuk:

- 1) Seperti lempengan (*platelike*).
- 2) Seperti prisma (*prismlike*), terdiri atas prismatis (permukaannya datar dan kolumnar), permukaannya melintang di ujungnya bulat.

- 3) Seperti kotak (*blocklike*), terdiri atas bentuk kubus atau sub-angular.
- 4) Tidak beraturan (*sherodial*), terdiri atas bentuk butiran (*granular*), dan rendah.

Mikroorganisme tanah merombak bahan organik kasar yang terdiri atas fragmen akar tanaman, tumpukan rontokan ranting dan daun, dan jasad insekta dan binatang-binatang kecil. Hasil dekomposisi bahan organik menjadi perekat dari partikel-partikel tanah yang mengubah struktur asli dari tanah.

Tekstur

Komposisi partikel-partikel tanah dalam persentase adalah dasar dari penentuan tekstur tanah. Tabel 1 adalah contoh sebaran partikel padat tanah (persentase) yang membentuk 3 macam tekstur tanah.

Tabel 1. Komposisi fraksi (partikel) padat dari tanah yang membentuk tekstur tanah berdasarkan ISSS.

Fraksi (partikel)	Diameter (mm)	Tekstur		
		Lempung berpasir (%)	Lempung (%)	Liat berat (%)
Pasir kasar	2,00 - 0,20	66,6	27,1	0,9
Pasir halus	0,20 - 0,02	17,8	30,3	7,1
Lempung	0,02 - 0,002	5,6	20,2	21,4
Liat	<0,002	8,5	19,3	65,8

a ISSS = *International Society of Soil Science*

Sumber : Lyon and Buckman dalam Kramer (1975)

Diantara partikel-partikel padat tersebut partikel mineral liat berperan paling penting dalam menentukan kesuburan tanah dan kesesuaian tanah bagi tanaman padi, palawija dan hortikultura (Fagi, 1977). Partikel mineral liat terkonsolidasi dalam bentuk lempengan yang bermuatan negatif, maka mampu mengikat kation

unsur hara yang bermuatan positif. Hasil dekomposisi bahan organik dalam bentuk partikel-partikel halus dan koloid bahan organik bermuatan negatif dan positif. Gabungan partikel liat dan partikel organik selain mampu mengikat kation, juga mampu melepaskannya ke dalam air tanah; kation yang larut dalam air tanah bermanfaat bagi tanaman. Bahan organik yang bermuatan positif dan negatif mampu mengikat dan melepaskan baik unsur hara kation dan anion. Kemampuan mengikat dan melepas kation disebut Kapasitas Tukar Kation (KTK) atau *Cation Exchange Capacity* (CEC). Karena kemampuan bahan organik untuk mengikat dan melepas kation dan anion, maka bahan organik selain memiliki sifat KTK, juga mempunyai kapasitas penetralan atau *buffering capacity*. Contoh dari KTK dari beberapa jenis mineral liat utama ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. KTK dari mineral liat dan humus.

Partikel liat dan bahan organik	KTK (me/100 gram)
Vermikulit	160
Humus	100–300
Montmorillonit	100
Illit	30
Kaolinit	10

KTK = Kapasitas Tukar Kation

Sumber: Istiqlal Amien (1994)

Beberapa catatan dari karakteristik mineral liat, adalah:

- 1) Kaolinit terdiri atas lempengan aluminium dan silikat dengan perbandingan 1:1; ikatan antar lempengan sangat kuat sehingga kaolinit tidak mengembang saat tanah basah, dan tidak mengerut saat kering; kaolinit dijumpai pada tanah yang tua (proses pelapukan lanjut),
- 2) Monmorillonit dan vermikulit terdiri atas lapisan aluminium dan silika dengan perbandingan silika: aluminium 2: 1,

mudah mengembang/membengkak saat basah dan mengerut saat kering; tanah yang kaya mineral liat 2: 1 retak-retak dan mengeras saat kering,

- 3) Pada illit, antara dua satuan lempengan berisi kalium dengan daya ikat kuat, maka illit tidak mengembang ketika basah dan tidak mengerut saat kering.

Kandungan liat atau tekstur dan tipe mineral liat dari tanah menentukan air tanah yang berpengaruh terhadap ketersediaan air dalam lahan pertanian untuk digunakan oleh tanaman.

3.2. Air Tanah

Struktur tanah dan porositas

Agregat dari partikel liat tanah (gembur, butiran, bongkahan) membentruktur tanah. Lubang-lubang yang bekas ditumbuhi akar dan bekas sarang insekta, cacing, dsb bersama dengan agregat partikel tanah membentuk pori-pori tanah. Berdasarkan ukuran dan fungsinya, Baver (1966) membedakan pori-pori tanah:

- 1) Pori-pori non-kapiler ~ berukuran relatif besar, menampung air hujan, tetapi cepat kering setelah hujan reda dan kembali berisi udara; air tersebut merembes ke lapisan tanah yang lebih dalam disebut infiltrasi/perkolasi
- 2) Pori-pori kapiler ~ ukuran halus, berisi udara dan air hujan dsb, tetapi air tersebut masih bertahan di dalamnya setelah hujan reda, bahkan setelah pori-pori non-kapiler mengering; status air pada kondisi demikian disebut kondisi kapasitas lapang (*field capacity*): tanah jenuh air 100% pori-pori tanah berisi air; tanah pada kondisi kapasitas lapang 40-60% pori-pori tanah berisi air.

Dalam praktek pertanian pergerakan air dalam pori-pori tanah disebut drainase internal atau *internal drainage*.

Retensi air oleh tanah

Kandungan air dari contoh tanah dihitung dari jumlah air yang menguap dari contoh tanah yang dikeringkan pada suhu 105°C; satuannya adalah berat air per berat tanah kering atau volume air per volume tanah kering. Waktu yang diperlukan untuk mengeringkan air pada suhu 105°C sampai berat tanah konstan berbeda antara jenis tanah. Perbedaan itu disebabkan oleh kemampuan tanah memegang air yang berbeda; tanah juga disebut mempunyai kemampuan retensi terhadap air yang berbeda. Dalam praktek kemampuan retensi itu disebut *water holding capacity*.

Kandungan air tanah dengan cara pemanasan seperti di atas tidak bermakna bagi kemampuan tanah menyediakan air bagi tanaman. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa sejumlah air yang dapat membuat tanah berpasir jenuh air, tetapi kalau jumlah air yang sama diberikan ke tanah liat, air tersebut masih belum cukup atau masih terlalu kering untuk pertumbuhan tanaman pada tanah liat.

Mekanisme apa yang membuat tanah dapat menahan air? Mekanisme itu dijelaskan dalam paragraf berikut.

Pada tanah yang tidak mengerut ketika kering (mineral liat illit dan kaolinit dominan), kurva kandungan air saat tanah ditekan secara bertahap untuk melepas air dari pori tanah sampai pori berisi udara tidak sama dengan kurva kandungan air saat tanah yang dibasahi secara bertahap; interface atau batas permukaan udara dan air (*air-water interface*) terjadi karena adanya tensi permukaan (*surface tension*).

Pada tanah yang dapat mengerut saat kering (mineral vermikulit dan montmorillonit dominan), kerutan tersebut mendekatkan partikel tanah; karena permukaan partikel tanah tersebut bermuatan negatif, maka partikel tanah saling menolak; gaya saling menolak itu sangat kuat yang berimbas kepada penahan air di permukaan partikel tanah.

Kedua kekuatan penahan air oleh partikel tanah disebut *matric forces*, yang menyebabkan potensi air (*water potential*) berkurang.

Mekanisme ketiga yang mengurangi energi bebas atau potensi air berkurang dan memperkuat retensi air oleh partikel tanah adalah adanya bahan terlarut yang secara osmotik aktif berupa garam terlarut; garam terlarut tersebut menurunkan tekanan uap dari air tanah dan menurunkan energi bebas atau potensi air; potensi osmotik ini berpengaruh penting terhadap ketersediaan air bagi tanaman.

3.3. Klasifikasi Air Tanah

Keluar-masuknya air ke dalam pori-pori tanah kapiler sama dengan apa yang terjadi di dalam tubuh tanaman (pergerakan air dari sel ke sel, dari jaringan ke jaringan dan dari organ ke organ).

Pentingnya potensi kimia dari air dalam sel dan jaringan tanaman sama prinsipnya dengan yang terjadi dalam air tanah. Potensi kimia air tanah menentukan potensi air tanah, ψ_t . Seperti halnya potensi air tanaman, potensi air tanah ditentukan oleh tekanan uap relatif. Persamaan di halaman 16 digunakan dalam pengukuran air tanah dengan mendeterminasi tekanan uap relatif pada contoh tanah.

Gaya utama yang menyumbang terhadap potensi air tanah adalah matrik tanah, sifat-sifat osmosis dari larutan tanah dan faktor lain yang berpengaruh terhadap air tanah. Struktur matrik tanah dan karakteristik osmosis air larutan tanah diartikan sebagai gaya matrik (*matric forces*). Jadi, potensi air tanah (ψ_t) terdiri atas tiga komponen potensial, yaitu:

$$\psi_t = \psi_m + \psi_p + \psi_s$$

di mana: ψ_m = potensi matrik tanah; ψ_p = potensi tekanan uap dan ψ_s = potensi osmotik dari larutan air tanah.

Gaya eksternal (luar tanah) yang mungkin diperhitungkan adalah gaya gravitasi atau *gravitational potential* (ψ_g), sehingga rumus menjadi:

$$\psi_t = \psi_m + \psi_p + \psi_s + \psi_g$$

Tema lain yang lebih dimengerti dalam praktek lapang daripada tema-tema termodinamika adalah kapasitas lapang (*field capacity*) dan titik layu permanen (*permanent wilting point/percentage*).

Kapasitas lapang

Kapasitas lapang adalah kandungan air tanah 1-3 hari setelah tanah basah secara merata oleh curah hujan atau irigasi. Pada keadaan demikian perkolasi berhenti.

Kapasitas lapang ditetapkan secara sederhana dengan menampung air pada permukaan tanah dan membiarkan air itu mengering secara gravitasi selama 1-3 hari (tergantung jenis tanah), dengan syarat tanah dilindungi dari penguapan air pada permukaannya.

Catatan: nilai kapasitas lapang lebih akurat pada tanah bertekstur ringan daripada tanah yang bertekstur berat.

Hasil pengamatan di laboratorium tidak reliabel digunakan karena nilai kapasitas lapang dipengaruhi oleh profil tanah dan struktur tanah. Tensiometer adalah alat yang digunakan di lapang; kandungan air tanah pada kapasitas lapang ekuivalen dengan tegangan 0,3 bar atau kandungan air $\pm 30\%$ berat kering tanah pada tanah berlempung. Pada kondisi kapasitas lapang 40-60% pori-pori tanah berisi air.

Titik layu permanen

Titik layu permanen adalah indikator dari kandungan air tanah di mana daun tanaman layu secara permanen.

Catatan: layunya daun tanaman yang diamati pada sore hari, berlanjut keesokan harinya.

Potensi air tanah (*soil water potential*) pada kondisi titik layu permanen adalah -10 sampai -20 bars (rata-rata -15 bars); data ini diperoleh dari alat *pressure membrane apparatus*.

Kelayuan terjadi karena daun kehilangan turgornya dan ini tergantung karakteristik osmosis dari cairan jaringan daun, maka kelayuan bergantung pada neraca antara potensi air dari banyak spesies tanaman berkisar -10 sampai -20 bars.

Kandungan air pada titik layu $\leq 10\%$ berat kering tanah pada tanah berlempung, $<20\%$ pada tanah liat berlempung.

Air siap tersedia

Air tanah siap tersedia (*readily available soil water*) berkenaan dengan ketersediaan air tanah untuk pertumbuhan tanaman pada kondisi regim air antara kapasitas lapang dan titik layu permanen. Jadi, kapasitas lapang adalah batas tertinggi ketersediaan air, sedangkan titik layu permanen adalah batas terendah ketersediaan air.

Senjang antara kandungan air tanah pada kapasitas lapang dan titik layu permanen lebih besar atau lebar pada tanah bertekstur halus daripada tanah yang bertekstur kasar atau ringan.

Data tentang air tanah tersedia pada jenis tanah tertentu harus diinterpretasi dengan hati-hati, karena beberapa variabel berikut: (a) akar tanaman yang tumbuh dalam dan menembus horizon tanah bisa mengkompensasi rendahnya air tersedia di satu horizon karena akar mencapai horizon yang lebih dalam dengan air tersedia cukup melimpah, (b) sebaliknya tanaman dengan akar dangkal akan menderita kekeringan.

Hal-hal lain yang perlu dicatat adalah: (a) pada banyak jenis tanah kisaran ketersediaan air untuk bisa bertahan bagi jenis

tanaman tertentu, justru lebih banyak dari kebutuhan jenis tanaman untuk tumbuh baik; (b) pada kisaran ketersediaan air, tingkat ketersediaannya berkurang kalau kandungan air dalam potensi air menurun.

Beberapa contoh sifat fisik dari 6 tekstur tanah (bobot jenis, ruang pori tanah dan status air tanah ditunjukkan oleh Istiqlal Amien (1995) dalam Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan beberapa sifat fisik tanah berkenaan dengan status air tanah pada 6 tekstur tanah.

Tekstur	Bobot jenis (g/cm ³)	Ruang pori tanah % (volume)	Status air tanah	
			Kapasitas lapang % (kejenuhan)	Titik layu % (kejenuhan)
Pasir	1,20 – 1,30	32 – 42	31 – 47	10 – 24
Lempung berpasir	1,55 – 1,88	40 – 47	38 – 57	15 – 26
Lempung	1,40 – 1,60	43 – 49	59 – 74	26 – 34
Lempung berliat	1,35 – 1,50	47 – 51	66 – 72	32 – 40
Liat berdebu	1,30 – 1,40	49 – 53	72 – 86	34 – 42
Liat	1,25 – 1,35	51 – 55	76 – 89	37 – 43

Sumber: Istiqlal Amien (1995)

Dalam Tabel 3 tampak bahwa semakin berat tekstur tanah, semakin tinggi kandungan air tanah, semakin tinggi kandungan air tanah pada kapasitas lapang dan titik layu permanen, karena ruang ruang pori-pori tanah (pori-pori kapiler) lebih banyak. Penelitian terdahulu menunjukkan data yang sama (*silty clay loam* > *loam* > *sand*) dan diilustrasikan secara lebih jelas (Regers, 1996; Nyvall, 2002 dalam Idrus, 2009).

Konsekuensi dari informasi tersebut adalah bahwa untuk mengairi tanah sampai tanah jenuh air perlu volume air lebih banyak pada tanah bertekstur berat (berliat) dari pada tanah bertekstur ringan (berpasir). Pelumpuran tanah sawahpun demikian. Selain itu tanah bertekstur berat lebih mampu memegang air tanah daripada tanah bertekstur ringan apabila terekspose pada keadaan kering

(MK). Tetapi sekali tanah bertekstur berat menjadi kering, perlu tenaga (energi) yang lebih besar untuk mengolahnya. Penambahan bahan organik yang berupa serasah tanaman dalam pola tanam berbasis padi sawah irigasi atau tadah hujan memfasilitasi tanah untuk memegang air dan mempermudah pengolahan tanah (Fagi dan De Datta 1983).

Konsep Bouyoucos diacu oleh Baver (1966) tentang klasifikasi air tanah: (1) air gravitasi: bergerak atas gaya gravitasi; sangat tersedia bagi tanaman, (2) air bebas (*free water*): membeku pada suhu $-1,5^{\circ}\text{C}$; tersedia bagi tanaman, (3) air tidak bebas: tidak berfungsi sebagai pelarut, yaitu air kapiler: membeku pada suhu -4°C ; sangat terikat oleh partikel tanah; sedikit tersedia bagi tanaman, kombinasi: tidak membeku pada suhu -78°C ; tidak tersedia bagi tanaman.

3.4. Pengukuran dan Pengendalian Air Tanah

Neraca air

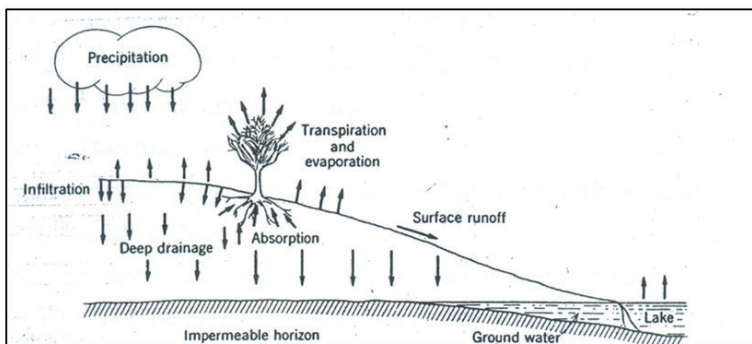
Dinamika rejim air tanah diestimasi dengan rumus neraca air tanah

$$\Delta W = Ch - (Rf + Pr + Et)$$

dimana, ΔW = perubahan simpanan air atau stok air di dalam tanah (stok air awal dikurangi stok air saat pengukuran atau stok akhir), Ch = curah hujan, Rf = aliran air permukaan tanah (*run-off*); Pr = aliran ke lapisan tanah yang lebih dalam (*percolation*) dan Et = penguapan air dan transpirasi (*evapotranspiration*).

Perhitungan neraca air dalam berbagai skala luasan ~ hamparan kepulauan, daerah tangkapan hujan, petakan lahan pertanian, tanaman individual/tunggal. Neraca air dalam hamparan diilustrasikan dalam Gambar 3. Gambar 3 ini menunjukkan pentingnya pengelolaan air secara terpadu. Sumber air dari sungai dan waduk adalah air tanah (*ground water*) yang masuk ke dalam danau, kemudian mengalir ke dataran yang lebih rendah melalui

sungai. Air sungai ada yang ditampung dalam waduk, kemudian dialirkan melalui saluran induk (*primer*), saluran sekunder, yang dibagi-bagikan ke petak-petak pertanian melalui saluran tersier dan kuartir. Aliran air permukaan yang masuk ke waduk dan sungai akan mendangkalkan sungai dan waduk oleh tanah akibat erosi. Jadi, upaya menyediakan air dan mengatur air melalui sistem irigasi akan sia-sia kalau DAS hulu dan tengah gundul oleh penebangan kayu secara liar (*illegal logging*).



Gambar 3. Siklus hidrologi mengilustrasikan komponen neraca air.
Sumber: Kramer (1975)

Cara dan alat yang digunakan untuk mengukur ΔW dan kandungan air tanah secara langsung:

Lysimeter

Digunakan mengukur kandungan air tanah dengan satuan 1,0 gram air/100 gram tanah kering dengan persyaratan: (1) lokasi yang tepat dan representatif; (2) jumlah contoh lokasi: 10–40 lokasi untuk memperoleh simpangan data berturut-turut 1,0 dan 0,5%.

Tidak akurat atau sulit menginterpretasikan data pada hamparan yang ditumbuhi banyak jenis tanaman, dengan sistem perakaran dan, ukuran dari tubuh tanamanyang berbeda.

Bor tanah dan oven

Agar contoh pengukuran kandungan air tanah dengan cara ini interpretatif, kandungan air pada kapasitas lapang dan titik layu permanen diketahui, karena kandungan air pada kondisi jenuh air dari tanah berpasir, justru lebih rendah dari kandungan air pada titik layu dari tanah liat.

Langkah-langkah yang harus ditempuh dengan cara ini, adalah: (1) contoh tanah diambil dengan bor tanah (*auger*) atau tabung tanah, kemudian (2) contoh tanah dipanasi 105°C sampai berat tanah konstan; akan tetapi cara ini menyita banyak waktu.

Modifikasi untuk mengurangi waktu pengamatan, adalah dengan *methyl alcohol*: campur contoh tanah dengan *methyl alcohol*; ukur perubahan berat-volume (*specific gravity*) dengan hidrometer.

Cara lain adalah mencampur contoh tanah dengan calcium carbide untuk menghasilkan gas *acetylene*; jumlah kandungan air tanah adalah perubahan/penurunan berat tanah plus calcium carbide.

Pengukuran tidak langsung-alat yang populer dalam praktek (1) *gypsum blocks* (untuk mengukur kandungan air tanah pada kondisi lebih kering dari kapasitas lapang, tetapi lebih basah dari titik layu permanen); (2) *tensiometer* (untuk mengukur kandungan air pada kisaran kapasitas lapang); (3) *neutron probe*: prinsipnya adalah atom hidrogen mampu memperlambat gerakan neutron; penurunan hitungan neutron mengestimasi kandungan hidrogen dalam contoh tanah (hidrogen adalah bagian dari H₂O).

BAB IV

PERGERAKAN AIR DARI TANAH KE TANAMAN DAN KE ATMOSFIR

4.1. Mekanisme Pergerakan Air

U nsur hara dalam larutan air tanah masuk ke tubuh tanaman melalui akar untuk pertumbuhan tanaman tersebut. Pergerakannya terjadi karena adanya gradien potensi matrik (*matric potential*) yang dalam praktek lebih dikenal sebagai gradien potensi air (*water potential gradient*). Pergerakan dalam tanah menuju akar akan menghadapi resistensi tanah (*soil resistance*). Resistensi tanah akan makin berkurang dengan makin padatnya perakaran (*root density*).

$$\text{Kepadatan akar} = \frac{\text{Volume tanah}}{\text{Panjang akar}}$$

Resistensi terbesar dari pergerakan air ketika air (larutan) memasuki akar menuju xylem, karena gerakan air itu melintasi massa dari sel-sel dalam akar yang hidup. Resistensi akar, xylem dan daun, makin berkurang karena gradien tekanan uap air yang makin tinggi. Sebab itu, laju pergerakan air antara permukaan akar dan permukaan daun tidak proporsional.

Pada tanaman dengan transpirasi air dari permukaan daun berlangsung lambat, aliran air melalui xylem akan melebihi kehilangan air oleh transpirasi, menyebabkan terjadinya tekanan hidrostatik positif, aliran air pada kondisi demikian melalui difusi.

Pada tanaman dengan transpirasi cepat aliran air melalui xylem akar kurang cepat, sehingga air dalam sel-sel akar dan xylem berada dalam tekanan hidrostatik negatif, maka air mengalir ke tubuh tanaman sampai ke daun melalui akar berupa aliran massal (*mass flow*); tekanan hidrostatik negatif disebabkan oleh potensi air yang berbeda.

Ada pendapat bahwa aliran air dari tanah melalui akar masuk ke tubuh tanaman dan berakhir di perbatasan (*interface*) antara permukaan daun dan atmosfer, mengikuti hukum Ohm pada arus listrik:

$$\text{Aliran listrik} = \frac{\text{Potensi listrik}}{\text{Tahanan}}$$

Dengan menyamakan aliran air dengan aliran/arus listrik van den Horneet mengilustrasikan aliran air pada kondisi suplai air stabil (*steady state*) dalam persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Aliran air} &= \frac{\psi_{\text{tanah}} - \psi_{\text{permukaan akar}}}{r_{\text{tanah}}} \\ &= \frac{\psi_{\text{permukaan akar}} - \psi_{\text{xylem}}}{r_{\text{akar}}} \\ &= \frac{\psi_{\text{xylem}} - \psi_{\text{daun}}}{r_{\text{xylem}} + r_{\text{daun}}} \\ &= \frac{\psi_{\text{daun}} - \psi_{\text{atm}}}{r_{\text{daun}} + r_{\text{udara}}} \end{aligned}$$

Menurut van den Horneet turunnya potensi air dari tanah ke tanaman sebesar 50 bar jauh lebih rendah dari turunnya potensi air dari daun ke udara yang besarnya 950 bar.

Jadi, aliran air dari tanah ke tubuh tanaman dikendalikan oleh permukaan daun berupa dinamika ketahanan lapisan kutikula dan mulut daun terhadap penguapan air (transpirasi).

4.2. Cekaman Air

Cekaman air tanaman (*plant water stress*) disebabkan oleh tiga hal: penguapan air dari daun (transpirasi) berlebihan, rendahnya jerapan air tanah oleh akar atau kombinasi dari keduanya. Ada banyak pengamatan dilaporkan oleh Kramer (1975) bahwa cekaman air berpengaruh terhadap aspek pertumbuhan tanaman yang berupa modifikasi anatomi, morfologi, fisiologi dan biokimia.

Berkurangnya stok air tanah (ΔW) karena suplai air tidak ada atau tidak ada hujan (Ch) pada musim kemarau; sementara evapotranspirasi berlanjut, air dalam pori-pori non-kapiler terkuras dan tertinggal air dalam pori-pori kapiler; makin deras laju evapotranspirasi, air yang tertinggal dalam pori-pori kapiler adalah air higroskopis yang erat diikat oleh partikel tanah; ini berarti resistensi tanah (r tanah) makin besar (potensi air tanah -50 bar, sementara potensi air di daun -950 bar), maka laju kehilangan air dari tanaman karena transpirasi lebih cepat dari jerapan air tanah oleh akar tanaman.

Transpirasi dan jerapan air tanah yang berkelanjutan menurunkan potensi air dari tanah; fakta ini menimbulkan: (a) fenomena layu tengah hari (*mid-day wilting*), justru pada keadaan air tanah cukup, seperti sering diamati pada tanaman padi sawah irigasi; dan (b) fakta lain adalah kejadian layunya daun pada siang hari; pada malam hari tidak ada transpirasi, dan air tanah bergerak ke akar sehingga $\psi_{\text{tanaman}} = \psi_{\text{tanah}}$ maka tanaman segar lagi pada pagi hari; ini adalah indikasi bahwa air tanah belum mencapai titik layu permanen atau potensi air tanah < -15 bar.

Tanaman yang daunnya layu disebut menderita cekaman air (*water stress*). Jadi, titik layu permanen ditentukan oleh potensi osmosis dari daun, bukan oleh karakteristik tanah.

4.2.1. Pengaruh cekaman air

Cekaman air yang berkepanjangan menyebabkan tertekannya pertumbuhan tanaman; beberapa indikatornya, adalah: (1) penurunan turgor daun menyebabkan mulut daun (*stomata*) tertutup, maka aktivitas fotosintesis terhambat karena berkurangnya CO₂ dan zat pengatur tumbuh, (2) pertumbuhan tanaman terhambat karena terhambatnya perkembangan sel; (3) penurunan potensi air memodifikasi proses yang dikendalikan oleh enzim; potensi air mengubah struktur protein; defisit air dalam beberapa bar memodifikasi metabolisme karbon dan nitrogen; (4) hidrolisis protein dari daun tanaman yang layu meningkatkan kandungan asam amino dalam bentuk protein; sedikit berpengaruh terhadap kandungan asam glutamat; (5) respirasi juga terhambat oleh cekaman air, dan hal ini menyebabkan terkurasnya stok karbon, maka area daun, ukuran sel dan volume antar sel juga turun; dan (6) ketahanan tanaman terhadap serangan hama atau penyakit menurun atau timbulnya hama/penyakit baru yang tidak muncul pada kondisi yang basah.

4.2.2. Antisipasi terhadap cekaman air

Pengetahuan tentang lingkungan tumbuh memberi jalan tentang langkah antisipatif yang diperlukan, antara lain berupa penanaman tanaman yang tahan terhadap kekeringan: (1) tanaman tahan kekeringan karena protoplasma selnya tidak terhidrasi, tetapi tidak menyebabkan kerusakan sel; jenis rerumputan, semak dan pepohonan tertentu mampu bertahan hidup (*survive*) di wilayah semi-arid, dan daunnya dimanfaatkan sebagai pakan ternak; sentra produksi ternak terletak di wilayah semi-arid; contoh NTT, NTB; (2) beberapa jenis tanaman secara genetik mempunyai sifat *drought avoidance*: berakar dalam, berakar serabut dalam, tersebar dan bercabang banyak, a.l. sorghum; tanaman berakar dangkal kentang, bawang, *lettuce* cepat terpengaruh oleh cekaman air daripada jagung dan tomat; (3) cekaman air berdampak serius pada

fase reproduktif, terutama saat terjadi penyerbukan tepung sari dan pembuahan;antisipasi terhadap cekaman air berbeda antar tanaman, hasil jagung turun kalau cekaman air terjadi pada stadia *silking* dan *tasseling*, tetapi irigasi gula beet justru menurunkan hasil gula.

$$\text{Efisiensi air} = \frac{\text{unit hasil}}{\text{unit air yang dipakai}};$$

Untuk meningkatkan efisiensi air, dianjurkan: (1) tanam varietas berdaya hasil tinggi, (2) tanam tanaman berakar dalam; pertumbuhan akar dirangsang dengan pemupukan, (3) tanam varietas yang tahan kering, (4) gunakan teknik irigasi yang efektif

Metode seleksi varietas padi tahan kering (IRRI):

- ▼ *Stomatal closure*
- ▼ *Root density & root strength*
- ▼ *Prolin content*
- ▼ *Recovery of roost and tillers* (tanaman diekspose terhadap kekeringan sampai titik layu permanen; kemudian lahan pertanaman diairi); seleksi galur yang anaknya tumbuh baru

dan efisien, (5) tekan evaporasi dengan penutupan permukaan tanah pertanaman dengan intercultivation (pengolahan tanah ringan diantara baris tanaman untuk memotong pori-pori kapiler dan non-kapiler dari tanah).

**Implikasi
Teori dalam Praktek Irigasi Adaptif
Terhadap Ancaman Kelangkaan Air**

**TEKNIK IRIGASI
BERGILIR**

BAB V

STATUS IRIGASI TANAMAN PANGAN

Irigasi pada hakekatnya adalah pengendalian simpanan air tanah dalam skala luas untuk menghindari ketidakpastian ketersediaan air karena dinamika iklim, khususnya curah hujan yang belum dapat diprediksi secara tepat. Berdasarkan analisis data iklim, Huke (1982) memasukkan region Indonesia ke dalam peta iklim IIB. Region golongan IIB potensial bagi intensifikasi produksi padi, tetapi keberhasilan program intensifikasi padi dapat terganggu karena curah hujan yang fluktuatif dan sulit diramal. Curah hujan yang fluktuatif adalah ciri dari iklim muson.

Buku ini menekankan irigasi pada tanaman padi karena pertimbangan berikut:

Pertama, beras adalah makanan pokok sekitar 95% penduduk, maka pemerintah memprogramkan intensifikasi produksi padi untuk mencapai kemandirian pangan. Upaya ini diwujudkan dalam bentuk rehabilitasi jaringan irigasi yang mencakup 1,34 juta ha sawah dan pemeliharaan jaringan irigasi untuk sawah seluas 2,32 juta ha, dana sebesar Rp 20 triliun disediakan untuk membangun embung sebanyak 30.000 pada lahan sawah tadah hujan yang tak terjangkau irigasi, dan pembangunan waduk skala sedang dengan dana tersendiri.

Kedua, penggunaan air untuk irigasi tanaman padi masih kurang efisien sehingga area tanam dan intensitas tanam tidak mencapai target, terutama ketika terjadi iklim ekstrim (*El Nino*) yang menyebabkan kemarau panjang.

Ketiga, tanaman padi sawah dituduh sebagai salah satu penyebab dari pemanasan global karena sistem irigasi mengemisi gas metana (CH_4), maka mendapat perhatian dari komunitas peneliti internasional (IRRI, 1995). Denmead (1995) mereview emisi CH_4 pada kisaran 4-20% emisi CH_4 total dari seluruh dunia.

Peningkatan produksi jagung dan kedelai juga mendapat perhatian pemerintah. Jagung dan kedelai ditanam di lahan sawah irigasi dan tadah hujan secara bersusulan dengan tanaman padi (*relay planting/rotational planting*) atau tanam bersisipan (*intercropping*) dalam pola tanam berbasis padi pada lahan kering. Jadi, efisiensi penggunaan air pada padi sawah, memperbesar peluang bagi pola tanam jagung atau kedelai berbasis padi.

Resesi ekonomi dunia berdampak kepada ekonomi nasional. Maka, investasi terhadap infrastruktur irigasi pertanian tertunda. Pulihnya ekonomi nasional membangkitkan kembali investasi terhadap infrastruktur irigasi. Perpres No. 61/2011 memperhatikan upaya perbaikan infrastruktur irigasi, karena infrastruktur irigasi yang baik akan memfasilitasi penggunaan teknologi intensif dan adaptif terhadap perubahan iklim.

Sistem irigasi dikelompokkan ke dalam tiga sistem irigasi dengan ciri-ciri berikut: (1) sistem irigasi teknik: debit air dalam saluran air dapat diukur dan diatur dengan alat pengukur dilengkapi dengan pintu pengatur; saluran pemberian air terpisah dari saluran drainase, (2) sistem irigasi semi-teknik: penyediaan air dapat diatur tetapi tidak diukur; pintu pengatur dibangun tetapi tidak dilengkapi alat pengukur; (3) sistem irigasi sederhana: penyediaan air tidak diatur dan tidak diukur; saluran pemasukan air merangkap sebagai saluran drainase (disebut juga irigasi pedesaan pada lahan tadah hujan).

Rehabilitasi/pembangunan jaringan irigasi dan pemeliharaan saluran yang masih baik diharapkan dapat memperluas sistem irigasi teknik.

5.1. Potensi Sumberdaya Air dan Masalah yang Dihadapi

5.1.1. Potensi

Potensi sumberdaya air Indonesia sekitar 2530 km³/tahun meliputi 6% dari persediaan air dunia atau 21% persediaan air tawar dari kawasan Asia-Pasifik. Kekayaan air ini tersalur di 6000 sungai utama yang panjangnya sekitar 18000 km dan tersebar di seluruh kepulauan Indonesia; termasuk yang tersimpan dalam 521 danau alami.

Potensi sumberdaya lain untuk pertanian dan perikanan berupa 33,5 juta ha rawa yang terdiri atas 20,1 juta ha rawa pasang surut dan 13,4 juta ha rawa dataran rendah atau lebak.

Dari total ketersediaan air itu, 96 m³/kapita/tahun itu, 75% diantaranya untuk pertanian, 11,5% untuk domestik dan 13,5% untuk industri. Jika ketersediaan air dibandingkan dengan ketersediaan air total sebesar 15000 m³/kapita/tahun hampir 25 kali rata-rata ketersediaan air dunia sebesar 600 m³/kapita/tahun hanya sebagian kecil yang telah dimanfaatkan. Ketersediaan air yang melimpah itu didukung oleh curah hujan rata-rata sebesar 2779 mm/tahun.

Pulau Jawa, di mana hampir 60% produksi padi berasal dari pulau ini, justru menghadapi situasi yang kritis, karena fakta berikut: 48% penduduk Indonesia berada di pulau Jawa, sementara luas daratannya hanya 7% dari luas daerah Indonesia, padahal pulau Jawa hanya mempunyai 4,5% dari total air tawar nasional.

Curah hujan yang tidak merata sepanjang tahun, bersamaan dengan daerah aliran sungai yang sudah kritis, membuat debit air sungai merosot tajam. Sebagai contoh debit air sungai Cimanuk

(Jawa Barat) adalah 880 m³/detik dan Bengawan Solo (Jawa Tengah) 1488 m³/detik pada MH, tetapi hanya 2 m³/detik pada MK.

5.1.2. Masalah

Berbagai masalah dan kendala yang dihadapi dalam pengelolaan air untuk irigasi pertanian yang diakibatkan oleh operasi dan pemeliharaan yang tidak memadai (dana yang disediakan hanya 40-50% dari kebutuhan riil) (Pawitan *et al.* 2008):

- (1) Dari 7,28 juta ha liputan jaringan irigasi terbangun, 1,5 juta ha dalam keadaan rusak,
- (2) Dari 11.547 bendung irigasi, 49 dalam keadaan rusak berat,
- (3) Dari 273 waduk dan embung besar 19 di antaranya rusak berat sehingga kurang optimal dalam menyediakan air irigasi pada MK,
- (4) Degradasi DAS hulu dan tengah sebagai daerah tangkapan air hujan dan konservasi menyebabkan erosi dan sedimentasi dan pendangkalan sungai dan waduk,
- (5) Akibat dari butir (1) s/d (4) luas area tanam dan panen berkurang, terutama pada kondisi iklim ekstrim,
- (6) Luas lahan sawah cetakan baru 3,2 juta ha, 1,6 juta ha di antaranya telah dikonversi untuk kegiatan non-pertanian; 1,6 juta ha sisanya terlantar akibat dari tidak adanya petani, kontruksi irigasi telah dibangun, tetapi sawah belum dicetak dan salah memilih lokasi (lahan berpasir) dan salah konstruksi (Fagi *et. al.* 2007).

Faktor-faktor lain yang menyebabkan penggunaan air irigasi tidak efisien, ditunjukkan dalam evaluasi sistem irigasi di bendung Barugbug, kecamatan Jatisari, Karawang (Fagi, 2006). Dari hasil evaluasi itu ternyata kehilangan air dalam penyaluran dari saluran induk ke saluran tersier mencapai 30-55%, dan penyaluran air ke

petak-petak tersier berlebihan (*Relative Water Supply* $\geq 1,5$).

Lahan sawah yang dilayani bendung Barugbug berdekatan dengan kantor BPP (Balai Penyuluhan Pertanian); sistem irigasi tekniknya tidak berfungsi/difungsikan.

Status nyata irigasi tahun 2016-2017, seperti dilaporkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, (Kompas, 2017), adalah:

- 1) 7,14 juta ha daerah irigasi permukaan mendapat air dari bendungan, bendung dan tadah hujan. Pengertiannya adalah: bendung merupakan bangunan sekat melintang sungai untuk menaikkan muka air sungai agar airnya dapat mengairi lahan sawah yang letaknya lebih tinggi; bendungan merupakan bangunan penampung air agar kebutuhan air terpenuhi pada musim kemarau.
- 2) 208 bendungan yang ada menampung air total 16,2 milyar m³ yang hanya mampu mengairi sawah seluas 761 ribu ha (10,7% dari total sawah irigasi), maka perlu dibangun bendungan baru sebanyak 62 bendungan; maka volume air yang tertampung akan naik dari 16,2 milyar m³ menjadi 19,1 milyar m³; luas lahan sawah irigasi terairi akan naik dari 10,7% menjadi 18,5% dan indeks tanam akan naik dari 180% menjadi 265%.
- 3) Hasil audit Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat tahun 2016 menemukan 43,6% jaringan irigasi dari lahan sawah 7,14 juta ha rusak, dan kebocoran air di saluran air mencapai 55%.
- 4) Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat membagi tugas dan kewenangan dalam pembangunan irigasi baru (1,3 juta ha) dan rehabilitasi irigasi yang ada (2,3 juta ha).
 - Pembangunan irigasi baru: 56% pemerintah pusat, 24% pemerintah propinsi, dan 20% pemerintah kabupaten/kota.

- Rehabilitasi irigasi yang ada: 46% pemerintah pusat, 23% pemerintah propinsi, dan 31% pemerintah kabupaten/kota.

Dari informasi tersebut dapat ditarik kesimpulan, bahwa pengembangan irigasi yang masif sekalipun belum mampu memenuhi kebutuhan air untuk seluruh sawah irigasi. Pengembangan infrastruktur irigasi harus diimbangi dengan teknik irigasi yang efektif dan efisien untuk meningkatkan produktivitas lahan dan memperluas jangkauan dari air irigasi. Pemerintah daerah bertanggung jawab dalam menerapkan teknik irigasi yang efektif dan efisien tersebut.

5.2. Prinsip Irigasi

Irigasi membuka salah satu peluang besar untuk menggali potensi dan meningkatkan produksi pertanian, khususnya pertanian tanaman pangan. Pentingnya irigasi telah disadari dan sistem irigasi dibangun sebelum Masehi oleh bangsa Mesir, bangsa-bangsa di Asia dan oleh suku Indian di Amerika Utara. Sistem irigasi kuno itu hanya mengandalkan pada aliran air permukaan (*rum-off water*) ketika terjadi hujan lebat.

Manusia moderen menyadari bahwa irigasi diperlukan kalau curah hujan tahunan kurang dari 250 mm. Produksi pertanian tanaman pangan akan terbatas kalau curah hujan pada kisaran 250-500 mm per tahun. Sistem irigasi dibangun untuk memproduksi secara maksimum kalau curah hujan tahunan lebih dari 500 mm. Konsep irigasi moderen selain memanfaatkan air sungai dengan membangun infrastruktur irigasi, pompanisasi air tanah dalam dan menampung air sungai dalam bendungan untuk stok air jangka panjang, kemudian menyalurkan airnya ke lahan pertanian melalui jaringan infrastruktur pertanian.

Hal-hal yang berkenaan dengan irigasi dirinci oleh Schwab *et. al.* (1966) sebagai berikut:

5.2.1 Kebutuhan air irigasi

Kebutuhan air irigasi adalah volume air, tidak termasuk curah hujan, yang harus dialirkan secara artifisial. Ini ditentukan bukan hanya oleh evapotranspirasi, tetapi juga oleh efisiensi pemberian/penyaluran air, curah hujan efektif dan air yang berasal dari perkolasi untuk mengisi pori-pori tanah atau air kapiler yang bergerak dari air dalam tanah (*ground water*) ke atas untuk juga mengisi pori-pori tanah. Curah hujan efektif adalah air hujan yang tertahan pada permukaan tanah sampai tanah jenuh air dan menggenangi permukaan tanah sampai tinggi yang diinginkan.

Kebutuhan air tanaman pangan (padi sawah) dirumuskan sebagai berikut:

$$I_r = S + P + ET - C_{he}$$

di mana:

I_r = kebutuhan air irigasi

S = *seepage* (limpasan air bawah permukaan secara horizontal atau rembesan air)

P = perkolasi (limpasan air secara vertikal)

ET = evaporasi dan transpirasi

C_{he} = curah hujan efektif

5.2.2. Evaporasi dan transpirasi

Uraian dari Schwab *et. al.* (1966) tentang evaporasi, transpirasi dan evapotranspirasi dikemukakan secara singkat berikut ini.

Evaporasi adalah transfer larutan air dari permukaan tanah (pada lahan sawah permukaan tanah basah) ke atmosfer. Prosesnya berlangsung setelah cahaya matahari (energi surya) menerpa permukaan tanah yang basah dan memanaskan air pada permukaan tanah itu. Akibatnya molekul air bergolak, dan pergolakannya semakin cepat dengan semakin lamanya cahaya matahari menerpa permukaan tanah itu. Lama kelamaan lebih

banyak molekul air yang bergolak, kemudian lepas dari rangkaian molekul air, dan keluar ke atmosfer dalam bentuk uap air. Suhu udara, angin, kualitas air, energi surya dan tekanan udara menentukan perbedaan laju evaporasi dan tekanan uap air lintas lokasi hamparan, maka suhu udara bulanan bukan penyebab utama dari rata-rata evaporasi bulanan, karena intervensi dari kecepatan angin.

Transpirasi adalah transfer air ke atmosfer dalam bentuk uap air melalui jaringan tanaman, utamanya daun. Porsi air yang ditransfer melalui mekanisme ini bisa rendah atau banyak tergantung pada kelengasan tanah, kesuburan dan struktur tanah, jenis dan kepadatan tanaman dan intensitas cahaya matahari. Jadi, transpirasi adalah konsumsi air oleh tanaman untuk memfasilitasi proses metabolisme dalam tubuh tanaman (*consumptive use of plant*). Efektivitas tanaman dalam menggunakan air untuk menghasilkan bahan kering tanaman disebut rasio transpirasi (*transpiration ratio*).

$$\text{Ratio transpirasi} = \frac{\text{berat air yang menguap melalui transpirasi}}{\text{berat bahan kering tanaman yang dihasilkan}}$$

Contoh di Amerika Serikat : rasio transpirasi dari sorgum, jagung, gandum dan kentang berturut-turut 250, 350, 500 dan 640.

Irigasi berfungsi ganda, yaitu menormalkan defisit kelengasan tanah dan menyediakan air yang diperlukan tanaman. Maka, untuk tujuan analisis kebutuhan irigasi pertanaman dalam hamparan istilah evaporasi dan transpirasi digabung menjadi evapotranspirasi. Maka, evapotranspirasi disebut konsumsi air irigasi, untuk pertanaman dalam hamparan (*consumptive use of irrigation water*). Laju evapotranspirasi naik karena kenaikan suhu air pada permukaan tanah pertanaman dan suhu kanopi pertanaman, yang diperkirakan menaikkan tekanan uap air. Di dataran tinggi yang dingin laju evapotranspirasi lebih rendah dari yang di dataran rendah yang panas.

Istilah evapotranspirasi potensial tidak ditemui dalam Schwab *et. al.* (1966) dan Kramer (1975). Evapotranspirasi dipengaruhi oleh banyak faktor, sehingga tidak ada definisi yang baku. Pada tanaman karet, besarnya evapotranspirasi potensial setara dengan 120 mm/bulan kalau hari hujan lebih dari 10 hari, dan 150 mm/bulan apabila hari hujan kurang dari 10 hari (Tailliez, 1973 dalam Thomas, 2003). Thomas (2003) menggunakan kriteria tersebut untuk mencari hubungan antara nisbah evapotranspirasi aktual (ET_a) dan evapotranspirasi potensial (ET_p) dengan fraksi ketersediaan air tanah. Ternyata ET_a/ET_p nilainya 1,0 pada fraksi ketersediaan air tanah yang nilainya juga 1,0 (Nix *et. al.*, 1992, dalam Thomas, 2003). Hal ini berarti bahwa evapotranspirasi potensial adalah evapotranspirasi dimana air tanah cukup untuk mendukung pertumbuhan tanaman yang optimal.

5.2.3. Perkiraan evapotranspirasi

Metode dasar yang digunakan dalam memprediksi evapotranspirasi dikelompokkan ke dalam 3 katagori: (1) transfer massal (*mass transfer*): uap air bergerak menjauh dari permukaan evaporasi dan transpirasi sebagai akibat dari turbulensi pencampuran udara dan gradien tekanan uap (*metode Thornthwaite dan Holzman*); (2) keseimbangan energi (*energy balance*): panas diperlukan untuk menguapkan air, sebab itu kalau tidak ada perubahan suhu dari air, maka radiasi netto atau panas yang masuk adalah dasar dari pengukuran penguapan. Keseimbangan energi mudah diterapkan dalam praktek (*metode Penman*); (3) metode empiris (*empirical methods*) dikembangkan dari pengalaman dan penelitian lapang yang mengasumsikan bahwa energi yang tersedia untuk penguapan adalah proposional dengan suhu dari permukaan penguapan (*metode Blaney dan Criddle*).

Metode Blaney-Criddle

Metode ini banyak digunakan untuk menghitung evapotranspirasi (ET) dari data klimatologi dan data irigasi yang ada. Prosedurnya adalah menghitung koefisien korelasi dari hubungan antara data ET dari berbagai jenis tanaman dengan suhu bulanan, persentase jam siang dan masa tanam. Koefisien korelasinya digunakan untuk menetapkan ET di daerah lain, dimana hanya ada data klimatologi. Rumus empiris dari ET bulanan:

$$\mu = \frac{k.t.p}{100} = kf$$

μ = ET bulanan (inci)

k = koefisien ET bulanan (berdasarkan konsumsi air, diperoleh dari data penelitian atau koefisien tanaman)

t = rata-rata suhu bulanan ($^{\circ}\text{F}$)

p = persentase jam hari siang dalam setahun

$f = \frac{tp}{100}$ faktor ET bulanan (berdasarkan konsumsi)

Untuk selama masa pertanaman (*growing season*), rumus yang digunakan:

$$U = KF = \sum kf$$

dimana, $U \approx u$, $K \approx k$, dan F = jumlah ET bulanan, f = periode.

Catatan: suhu rata-rata bulanan dan presentasi jam siang tiap bulan dapat diacu dari data lokal (BMG).

Contoh: Hitung ET tanaman jagung pada bulan Juli

- Data:
- koefisien tanaman = 0,6
 - suhu maksimum (siang) dan minimum (malam) rata-rata = 75 $^{\circ}\text{F}$ atau 23,9 $^{\circ}\text{C}$
 - rata-rata persentase panjang hari (jam penyinaran) bulan Juli 10,32

$$\text{Jawaban: } U = \frac{0,6 \times 75,0 \times 10,32}{100} = 46,4 \text{ inchi/bulan,}$$

Metode Penman

Metode ini digunakan untuk mengestimasi penguapan dari permukaan air bebas dengan menghitung keseimbangan energi. Data yang diperlukan cukup banyak dengan perhitungan yang rumit. Dari data evaporasi itu, kemudian diestimasi ET dengan memperkalikannya dengan koefisien tanaman.

Sebab itu tidak dibahas secara mendalam rumus dari metode Penman ini.

$$H = E + A + S + C$$

di mana,

H = energi radiasi netto yang jatuh di permukaan bumi

E = energi untuk menguapkan air

A = energi untuk memanaskan udara

S = energi untuk memanaskan air

C = energi untuk memanaskan wadah dari air (waduk atau sungai)

Penman mengabaikan S dan C, maka rumus menjadi lebih sederhana:

$$E = H - A$$

Dengan menggabung rumus ini dengan hukum Dalton,

$$E = C (e_s - e_d)$$

di mana,

E = laju evaporasi

C = konstanta berdasarkan variabel lain yang mempengaruhi laju evaporasi

e_s = tekanan uap jenuh pada suhu dari permukaan air (inchi ketinggian Hg)

e_d = tekanan uap aktual dari udara ($e_s \times$ kelembaban relatif) dalam inchi ketinggian Hg

Maka, rumus Penman menjadi:

$$E = \frac{\Delta H + Ea\gamma}{\Delta + \gamma}$$

di mana:

$\Delta = \left. \frac{de}{dt} \right|_{T_a}$ = sudut (*slope*) dari kurva tekanan uap jenuh vs suhu (T_a) dalam mm Hg/ $^{\circ}$ F

γ = konstant dari persamaan higrometer basah dan kering (0,27 untuk suhu dalam $^{\circ}$ F dan tekanan uap dalam mmHg)

$$Ea = 0,35 (e_s - e_d) (0,5 + 0,01 V_2)$$

di mana:

e_s = tekanan uap jenuh pada suhu udara T_a dalam mm Hg

e_d = tekanan uap aktual dari udara dalam mm Hg

$$V_2 = \frac{\log 6,6}{\log h} \times V_h$$

di mana:

V_2 = rata-rata kecepatan angin pada ketinggian 2 m

V_h = kecepatan angin tercatat pada ketinggian h kaki (*feet*)

H = energi matahari (*radiant energy*) yang jatuh ke permukaan dinyatakan dalam mm tinggi air yang diuapkan per hari oleh energi tersebut H dihitung dengan rumus berikut:

$$H = R_a(1-r) \left(0,18 + \frac{0,55n}{N} \right) - \sigma T_a^4 \left(0,56 - 0,092\sqrt{e_d} \right) 0,10 + \frac{0,9n}{N}$$

di mana:

R_a = radiasi surya di atmosfer (*extra terrestrial radiation*) dalam mm air per hari

r = koefisien refleksi radiasi surya (0,05 untuk permukaan air)

n/N = nisbah panjang jam hari aktual terhadap panjang jam hari yang mungkin terjadi

σ = konstanta Stefan-Boltzmann ($2,10 \times 10^{-9}$ mm day⁻¹ oK⁴)

T_a = suhu dalam °K (°C, absolut)

e_d = tekanan uap aktual dari udara dalam mm Hg

γ = konstanta dalam persamaan hygrometer basah dan kering (0,27 untuk temperatur °F dan tekanan uap dalam mm Hg)

Tampak dalam uraian di atas bahwa metode Penman memerlukan dukungan begitu banyak data yang belum tentu tersedia semuanya, seperti diunjukkan oleh Schwab *et. al.* (1966) di Amerika Serikat.

Dari nilai penguapan pada permukaan air itu, ET dihitung dengan rumus:

$$\mu = c E$$

di mana:

E = penguapan dari permukaan air bebas dalam mm/hari

c = koefisien tanaman (di Amerika Serikat 0,6 pada musim dingin dan 0,8 pada musim panas pada 50° LU, dan 0,7 di katulistiwa pada wilayah basah (*humid regions*) dan <0,7 pada wilayah semi arid (kering))

Metode Jensen-Haise

Metode ini menggunakan pendekatan keseimbangan energi, tetapi perhitungannya lebih sederhana dari metode Blaney-Criddle. Persamaan dasar keseimbangan energinya adalah:

$$R_s - r R_s + R_a - (R_g + R_p) - E - G - A - P - s = 0, \text{ atau}$$

$$R_s = r R_s + (R_g + R_p) + E + G + A + P + s - R_a$$

di mana:

R_s = gerakan (*flux*) terus menerus radiasi surya (gelombang pendek)

r = refleksi atau albedo

R_a = gerakan (*flux*) terus-menerus radiasi panas dari atmosfer

$R_g + R_p$ = flux dari radiasi panas berturut-turut dari permukaan tanah dan tanaman

E = laju evaporatranspirasi (ET)

G = *flux* panas ke permukaan tanah

A = *flux* panas ke udara

P = *flux* radiasi (sinar) matahari yang digunakan tanaman untuk fotosintesis

s = *flux* panas yang disimpan di zona pertanaman

G dan s diabaikan (dinilai 0), karena nilai untuk fotosintesis hanya 5% dari radiasi netto dan hanya pada periode satu sampai dua minggu. Persamaan menjadi:

$$R_s (1 - r) + R_a - (R_g + R_p) - E - A \approx 0$$

Kalau semua parameter dalam persamaan ini dibagi dengan R_s maka persamaan menjadi:

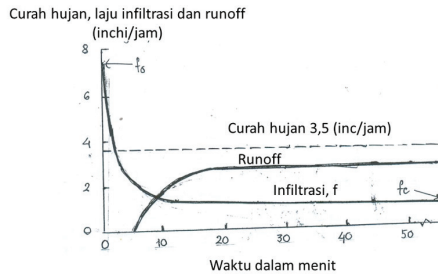
$$\frac{E}{R_s} = 1 + r + \frac{R_a - (R_g + R_p) - A}{R_s}$$

Parameter kunci dari metode Jensen-Haisen adalah E/R_s yang dapat diamati. Dari persamaan E/R_s nilainya dilaporkan:

- $E/R_s = 0,6 \sim$ tanaman menghijau menutupi permukaan petak pertanaman yang diairi cukup dan A nihil.
- $E/R_s < 0,6 \sim$ tanaman mencapai stadia awal pertumbuhan dan kanopinya belum menutup permukaan petak pertanaman.
- $E/R_s > 0,6 \sim$ tanaman membesar sehingga kanopinya menutup penuh petak pertanaman yang diairi cukup, tetapi suhu udara cukup panas.

5.2.4. Seepage dan perkolasi

Pada hamparan sawah yang tergenang air secara merata dengan petakan-peakan yang dibatasi galengan secara terpelihara *seepage* (S) dianggap tidak terjadi. Maka parameter yang menentukan air irigasi adalah perkolasi (p). Gerakan air dari permukaan menuju lapisan tanah adalah perkolasi. Gerakan air menuju lapisan permukaan tanah dangkal untuk mengisi pori-pori tanah pada lapisan perakaran disebut *infiltrasi*. Pada tanah dengan kandungan liat tinggi yang didominasi oleh mineral liat kaolinit (Al : Si = 1:1), gerakan air dari permukaan tanah ke lapisan tanah yang lebih dalam sangat lambat (1,0-2,0 mm/hari). Pada kondisi seperti ini, infiltrasi lebih dominan dari perkolasi. Schwab *et. al.* (1966) mengilustrasikan proses infiltrasi seperti dalam Gambar 4.



Gambar 4. Contoh kurva infiltrasi dan *run off* berdasarkan data dari infiltrometer.

Sumber: Schwab *et. al.* (1966)

Tampak pada Gambar 4 bahwa proses *run off* dan infiltrasi berlangsung cepat, secepat air hujan mengisi pori-pori non kapiler dan pori-pori kapiler tanah. Proses infiltrasi dirumuskan:

$$f = fc + (fo - fc)^{-kt}$$

di mana:

f = kapasitas infiltrasi atau laju maksimum pada kondisi tanah tertentu mampu menyerap air di permukaan tanah (inc/jam)

fc = kapasitas infiltrasi konstan saat waktu mendekati batas kejenuhan air dari tanah

f_0 = kapasitas infiltrasi pada awal kejadian

k = konstanta positif tergantung jenis dan kondisi tanah

t = waktu (jam)

Konstanta (k) dari jenis tanah utamanya adalah struktur dan tekstur tanah. Kondisi tanah dapat berubah oleh perbuatan manusia berupa pengolahan tanah dan pemberian bahan organik.

5.2.5. Curah hujan

Kalau di area sawah tadah hujan (baru) di sekitar embung yang baru dibangun (30.000 embung) akan diestimasi suplesi air embung untuk mengairi tanaman pangan, tetapi di area itu belum ada data curah hujan, langkah-langkah berikut dianjurkan:

- Gunakan Atlas Sumberdaya Iklim Pertanian Indonesia skala 1:1.000.000 sebagai referensi, atlas ini diterbitkan oleh Badan Litbang Pertanian (Balitklimat, 2003)
- Tandai area tersebut pada atlas dan baca berada di lingkaran pola curah hujan apa. Pola curah hujan dari seluruh kepulauan telah dipetakan.

Atlas ini mengelompokkan pola curah hujan ke dalam 6 kategori: I (A, B, C), II (A, B, C), III (A, B, C), IV (A, B, C, D), V (A, B, C, D), VI (A, B, C, D).

Kategori pola curah hujan akan menentukan tentang pola tanam dan suplesi air embung.

Kalau pola curah hujan bulanan dalam jangka panjang diketahui (>10 tahun) analisis peluang terjadinya kekurangan air pada periode tertentu dalam satu tahun. Informasi ini digunakan untuk peringatan dini dalam penetapan alternatif pola tanam dan teknik budidayanya.

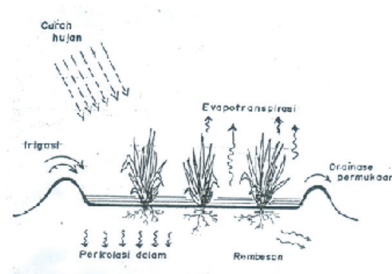
Hal yang sama dianjurkan untuk menetapkan teknik irigasi pada sawah bukaan baru di sekitar bendungan yang baru dibangun. Kalau pola curah hujan bulanan jangka panjang tersedia

(>10 tahun) analisis peluang berbagai intensitas curah hujan dalam satu tahun. Informasi ini digunakan untuk menetapkan kebutuhan air irigasi dan merancang teknik irigasi yang efektif dan efisien.

Contoh penggunaan data curah hujan dalam menetapkan sistem budidaya padi sawah dan pola tanam berbasis padi serta teknik irigasinya diuraikan dalam Bab VII. Untuk padi sawah irigasi, penggunaan data curah hujan dibahas dalam Bab X.

5.2.6. Pengukuran langsung konsumsi air oleh tanaman padi

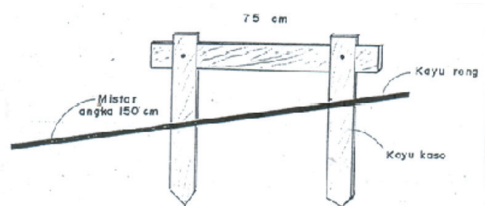
Volume ET, S & P dalam rumus kebutuhan air irigasi disebut juga sebagai air konsumsi oleh pertanian padi (*consumptive use of water*). Berbagai metode digunakan untuk mengukur *consumptive use of water*, antara lain: (1) pengamatan dengan lysimeter (antara lain *crop coefficient* diamati dengan metode ini); (2) pengukuran perbedaan kedalaman air tanah (*ground water*) di lapang; air dialirkan secara terbatas untuk mencegah *run off* dan *deep percolation set*; (3) pengukuran perbedaan tinggi genangan air di petak pertanian sesaat setelah irigasi dan beberapa hari setelah irigasi; (4) pengukuran secara terpadu untuk mengetahui ET, S & P dan tinggi air genangan; (5) pengukuran debit air yang masuk ke dalam hamparan pertanian (*inflow*) dan yang keluar dari hamparan petak pertanian (*outflow*); curah hujan diperhitungkan.



Gambar 5. Neraca air pada pertanian padi sawah irigasi.

Sumber: Fagi et al. (1987)

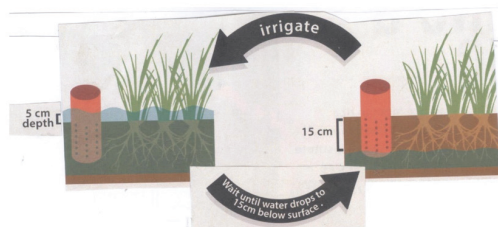
Neraca air pada petakan sawah irigasi yang ditanami padi diilustrasikan dalam Gambar 5. Anjuran genangan air adalah sedalam 5 cm, yang tujuannya untuk menekan pertumbuhan gulma. Pada permukaan petakan sawah ditanamkan alat pengukur dalam bentuk skala miring (Gambar 6). Tujuan skala miring adalah untuk memperbesar bacaan perbedaan perubahan kedalaman air.



Gambar 6. Alat pengukur kedalaman air genangan (skala miring).

Teknik ini mengukur konsumsi total (S & P dan ET). Curah hujan diukur dengan ombrometer dari stasiun klimatologi (di Kebun Percobaan) atau yang pasang di sawah dekat pengaturan tinggi genangan.

IRRI menggunakan cara yang lebih sederhana yaitu dengan menggunakan piezometer ditanam ke dalam tanah di tengah antara empat rumpun tanaman padi. Alat mengukur konsumsi air total, sekaligus menetapkan saat irigasi dalam teknik irigasi bergilir (Gambar 7).



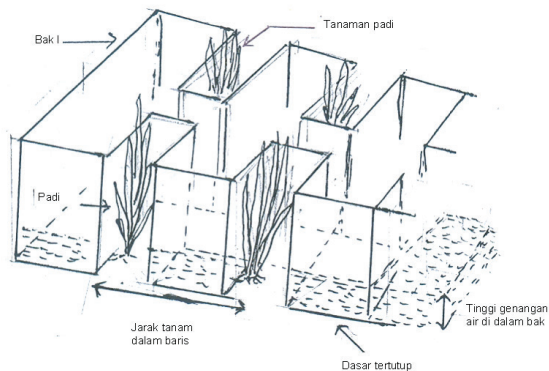
Gambar 7. Piezometer ditanamkan ke dalam tanah di petakan sawah antara rumpun tanaman padi.

Catatan: Piezometer ditanamkan di tengah-tengah antara 4 rumpun tanaman padi (lihat Lampiran 8)

Sumber: IRRI (<http://www.knowledgebank.irri.org>)

Perubahan tinggi genangan air dicatat dalam skala; air irigasi diberikan kalau kedalaman air dalam Piezometer mencapai ± 10 cm. Penjelasan lengkap lihat Lampiran 8.

Pengukuran evaporasi (E), transpirasi (T) dan perkolasi menggunakan alat yang dirancang secara khusus. Rancangan alat ini penulis gambar dari alat yang digunakan di Konosu Experimental Farm, Saitama Prefecture, Jepang, ketika penulis mengikuti pelatihan selama 9 bulan di Jepang. Alat tersebut ditunjukkan dalam Gambar 8 dengan tiga macam bentuk bak, maka perubahan tinggi genangan air akibat dari evaporasi (E), transpirasi (T) dan perkolasi (P) dapat diketahui. Rembesan air atau *seepage* (S) diabaikan kalau galengan batas antar petak pertanaman dipelihara dengan baik. Otoritas irigasi tidak menganggap rembesan sebagai kehilangan air, karena yang masuk ke petak lain digunakan oleh petani lain.



Gambar 8. Bak yang dirancang khusus untuk mengetahui perubahan tinggi air karena evaporasi (E), transpirasi (T), dan perkolasi (P).

Sumber: Fagi et. al. (1987)

Keterangan gambar:

bak I : Gambar 8

bak II : bahan dan rancangan sama dengan bak I; dasar bak terbuka dan ditanamkan ke dalam tanah ± 10 cm.

bak III : bahan sama dengan bak I dan bak II; bentuknya segi empat ($1,0 \times 1,0$ m² atau lebih); dasar terbuka dan dibanamkan ke dalam tanah (± 10 cm); tanaman padi berada dalam bak; perubahan tinggi genangan diukur dengan skala miring (Gambar 6).

Perhitungan evaporasi, perkolasi dan transpirasi = perubahan tinggi genangan air dalam bak I disebabkan oleh evaporasi, perubahan tinggi genangan air dalam bak II karena evaporasi dan perkolasi (P); beda tinggi genangan air antara bak II dan bak III akibat transpirasi.

Air yang menguap melalui transpirasi adalah air yang membawa unsur hara terlarut dalam air tanah untuk pertumbuhan tanaman, dan berfungsi dalam proses metabolisme karbon, antara lain fotosintesis. Makin panas suhu udara makin cepat laju evaporasi dan transpirasi. Kalau laju transpirasi lebih cepat dari laju serapan air oleh akar tanaman, akan terjadi fenomena mid-day wilting, khususnya pada MK. Daun tanaman padi menggulung dan layu pada siang hari justru pada keadaan sawah tergenang air. Daun laju/menggulung indikasi stomata tertutup, flux CO₂ terhambat dan fotosintesis akan terganggu. Sebaliknya pada suhu udara tinggi, respirasi berlangsung lebih cepat. Hal ini yang diduga sebagai penyebab dari hasil padi MK lebih rendah dari hasil padi MH, pada sekitar 1,0 juta sawah irigasi di pulau Jawa. Maka transpirasi dapat dijadikan indikator dari *heat tolerance* varietas padi untuk bahan pemuliaan tanaman padi yang cocok ditanam di MK.

Penelitian di sawah petani pada wilayah pengairan bendung Barugbug (Jatiluhur) menunjukkan bahwa besarnya transpirasi antara varietas umur pendek (IR54), umur sedang (Cikapundung), dan umur relatif panjang (Cisadane) pada fase vegetatif dan fase generatif tidak berbeda. Transpirasi pada fase generatif lebih tinggi dari fase vegetatif (Fagi *et. al.*, 1987). Fagi dan De Datta

(1981) mengamati hubungan korelasi yang positif antara radiasi matahari dengan hasil gabah IR26 dan IR28 pada 45 hari sebelum panen di MH dan MK. Hal ini menunjukkan bahwa fotosintesis untuk pengisian gabah membutuhkan cukup air. Dengan kata lain kekeringan akan menurunkan hasil gabah kalau terjadi pada fase generatif.

Kedalaman air dalam tanah (*ground water*) pada lahan sawah irigasi adalah *water table*. Piezometer (Gambar 7) adalah alat pengukur dinamika kedalaman dari *water table*.

Pengukuran dalam lysimeter berguna untuk pengetahuan dasar. Sering dipraktekkan pengukuran kebutuhan air tanaman padi dalam lysimeter berukuran besar. Hasilnya harus diinterpretasi secara hati-hati, karena pertumbuhan tanaman padi dalam lysimeter umumnya lebih baik dari pertumbuhan dipetakan sawah aslinya.

Konsumsi air palawija yang ditanam setelah padi dipanen dapat dihitung dari perbedaan/perubahan kandungan air tanah (*soil moisture*). Teknik ini perlu contoh tanah banyak yang diambil dan dimasukkan ke dalam cangkir alumunium (*alumunium can*). Alumunium can dimasukkan ke dalam oven sampai mencapai berat permanen. Selisih berat can + tanah lembab dengan can + tanah kering adalah air yang dikonsumsi total dalam bentuk ET.

Pengukuran selisih debit air masuk (*inflow*) dan debit air keluar (*outflow*) dilakukan dengan menggunakan pintu air pengukur (*weir*): *rectangular weir/Cipoletti weir* atau *V-notch 90° weir*. Metodenya dibahas dalam Bab VIII.

5.3. Metode Irigasi

Dalam irigasi pertanian banyak istilah yang digunakan berkenaan dengan praktek irigasi di lapang.

- Irigasi permukaan (*surface irrigation*); berdasarkan masuknya aliran air ke petakan pertanaman, dibedakan: (1) irigasi basin (*basin irrigation*) ~ air dialirkan ke petakan-petakan pertanaman yang antara petakannya dibatasi oleh galengan dengan tujuan agar air tidak melimpas dari satu petakan ke petakan lain yang pemiliknya berbeda; cara pemberian air ini digunakan dalam budidaya padi sawah, (2) irigasi furrow (*furrow irrigation*) ~ air dialirkan ke petakan pertanaman melalui alur sementara di antara dua barisan tanaman; alur-alur terbentuk karena tanaman ditanam pada barisan berbentuk guludan; cara ini umumnya digunakan pada tanaman sayuran atau tanaman palawija yang dikelola secara intensif, seperti pertanaman jagung dan kedelai pada lahan irigasi.
- Irigasi bawah permukaan (*sub-surface irrigation*); air dialirkan melalui pipa di bawah tanah; pipa-pipa dilubangi pada interval tertentu; lubang dibungkus dengan saringan agar pipa tidak dimasuki tanah; praktek seperti diterapkan pada tanah berpasir (tekstur ringan).
- Irigasi bertekanan (*pressurized irrigation*); tekanan diberikan dalam bentuk kekuatan aliran air yang diatur dengan menggunakan pompa (1) irigasi sprinkler (*sprinkler irrigation*); bermacam-macam sprinkler, adalah: portable sprinkler, traveling gun sprinkler, center pivot & linear sprinkler, permanent sprinkler; (2) irigasi tetes (*drip irrigation*); air disalurkan melalui pipa di atas atau bawah permukaan tanah; pipa dilubangi dan dipasang smitter; dengan cara ini air keluar setetes-setetes secara terputus-putus; cara ini digunakan pada budidaya tanaman buah-buahan bernilai ekonomi tinggi dengan kualitas yang tinggi.
- Irigasi tradisional; cara ini masih dipraktekkan oleh petani pada keadaan ketersediaan air untuk irigasi sangat terbatas: (1) **irigasi penyiraman** (*bucket irrigation*); air disiramkan ke

tanaman secara individual dengan menggunakan canting, ember atau gembor; (2) **irigasi pemendam buyung** yang dibuat dari tanah liat (*pitcer irrigation*); dibenamkan dekat perakaran tanaman; perbedaan tekanan matrik (*matric potential*) di mana tekanan matrik dari buyung berisi air lebih rendah dari tekanan matrik dari tanah sekitar perakaran (*interface soil-roots*), maka air akan merembes keluar dari buyung; air akan masuk ke dalam akar secara difusi, karena tekanan osmotik air dalam tanah di sekitar akar lebih besar dari tekanan osmotik air di dalam akar; di India teknik irigasi ini dipraktekkan pada tanah salin atau bergaram.

Pada padi sawah irigasi, irigasi permukaan (irigasi basin) adalah metode yang umum diterapkan, sedangkan irigasi furrow digunakan pada tanaman palawija, terutama jagung yang ditanam pada MK dalam pola tanam berbasis padi.

Irigasi bawah permukaan potensial diterapkan pada lahan sawah tadah hujan yang air hujannya ditampung dalam embung skala besar untuk tanaman hortikultura bernilai ekonomi tinggi setelah padi sawah tadah hujan dipanen.

Penyiaraman tanaman (irigasi tradisional) masih digunakan petani skala kecil untuk tanaman sayuran dengan menggunakan air embung.

Irigasi bertekanan juga relevan untuk tanaman palawija/ hortikultura dengan mempertimbangkan biaya pompanisasi. Hal ini tidak bermasalah bagi budidaya tanaman yang dikelola dengan orientasi bisnis.

Direktorat Bina Rehabilitasi dan Pengembangan Lahan (dulu Direktorat Perluasan Areal), Direktorat Jenderal Tanaman Pangan dan Hortikultura, mempunyai informasi lengkap tentang metode pemberian air pada lahan kering ~ lahan kering dengan sumber airnya air hujan, lahan kering yang kaya air tanah, lahan kering yang

sumber airnya selain curah hujan, juga mata air, danau/embung (Sinis Munandar, 1995; Schwab *et. al.*, 1966).

5.4. Efisiensi Penggunaan Air untuk Irigasi Pertanian

Hasil penelitian oleh *Agricultural Research Service* di Amerika Serikat tentang irigasi diacu oleh Schwab *et. al.* (1966), bahwa efisien penggunaan air irigasi pada sistem irigasi yang belum menerapkan teknik irigasi maju masih sangat rendah akibat dari banyaknya kehilangan air, seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.

Tabel 4 menunjukkan bahwa di negara majupun (Amerika Serikat) efisiensi penggunaan air untuk irigasi sangat rendah kalau sistem irigasi tidak dikelola dengan benar. Kehilangan air irigasi yang paling besar (48%) terjadi pada penyaluran air dan penggunaan teknik irigasi yang tidak tertata baik.

Tabel 4. Neraca air pada sistem irigasi yang belum menerapkan teknik irigasi maju di Amerika Serikat.

Parameter	Nilai equivalen kedalaman (feet)
Air yang masuk ke lahan pertanian	
- dari sumber air (sungai/waduk)	10,2
- dari curah hujan	0,7
Total	10,9
Air yang tidak terpakai	
- hilang dalam penyaluran & teknik irigasi	4,9
- hilang berupa aliran permukaan air	1,6
- hilang oleh perkolasi	2,4
- hilang oleh penguapan (evaporasi)	0,4
Total	9,3
Air yang digunakan tanaman	1,6

Sumber: Schab *et. al.* (1996); 1 feet = 30,48 cm

Pada lahan sawah irigasi yang datar, aliran air permukaan (*run-off*) tidak terjadi, tetapi dapat terjadi aliran air bawah permukaan secara horizontal atau *seepage*. *Seepage* tidak dianggap sebagai kehilangan air karena dimanfaatkan oleh petakan-petakan sawah di sekitar. Tetapi kalau setiap petani dipungut bayaran per m³ air yang digunakan, *seepage* menjadi bermakna secara ekonomis.

Pengertian tentang efisien yang berkenaan dengan penggunaan air irigasi menjadi sangat penting untuk menentukan metode penanggulangannya. Nilai efisiensi antara sistem irigasi yang satu dengan lainnya tidak sama, karena fisik tanah dan teknik budidaya, serta pola tanamannya juga bervariasi.

Hansen *et. al.* (1979) merumuskan efisiensi pengelolaan air irigasi. Dari banyak rumusan itu hanya 5 rumusan yang relevan dengan praktek irigasi sehari-hari. Rumus-rumus efisiensi berikut dapat digunakan sebagai pedoman dalam meningkatkan efisiensi air irigasi, dalam memantau pengelolaan irigasi dan mencari jalan pemecahan masalah dan kendala.

5.4.1. Efisiensi sistem irigasi

$$ES = \frac{Et + S + P}{Qa + Che} \times 100\%$$

di mana, Es = efisiensi sistem irigasi, Et = evapotranspirasi, S = *seepage* (aliran air atas permukaan), P = aliran air bawah permukaan atau perkolasi, Qa = volume atau debit air awal (air yang keluar dari sumber air) dan Che = curah hujan efektif.

Idealnya, Es dalam perhitungan akan naik, apabila Et, S dan P tetap, dan Qa + Che turun; Qa bisa turun, tetapi Che tetap. Qa akan turun apabila saluran primer dan sekunder terpelihara dan pintu-pintu air berfungsi baik, sehingga air irigasi yang masuk ke petak pertanaman sesuai dengan kebutuhan tanaman.

5.4.2. Efisiensi air di petakan sawah

$$WUE = \frac{Et + S + P}{Q_m + C_{he}} \times 100\%$$

di mana WUE = *water use efficiency* (efisiensi air di petakan pertanaman), Et, S, P sama dengan di atas, Q_m = volume atau debit air masuk ke petakan sawah.

Maka, agar nilai WUA naik Et + S + P tetap, C_{he} tetap dan Q_m turun. Q_m turun jika saluran-saluran tersier, saluran kuarter dan saluran cacing dan galengan sawah terpelihara dengan baik.

5.4.3. Efisiensi saluran air

$$E_c = \frac{Q_m}{Q_a} \times 100\%$$

di mana, E_c = *conveyance efficiency* (efisiensi saluran air)

E_c akan naik kalau Q_m tetap dan Q_a turun. Q_m dipertahankan tetap sesuai dengan kebutuhan tanaman melalui pemeliharaan galengan-galengan; sedangkan Q_a turun jika saluran air terawat baik.

5.4.4. Efisiensi produksi air

$$WYE = \frac{\text{Produksi}}{Q_a \text{ atau } Q_m} \times 100\%$$

di mana, WYE = *water yield efficiency* atau efisiensi produksi air, Q_a dan Q_m sama dengan di atas. Besaran produksi adalah kg/

ha/musim, dan besaran Q_a atau Q_m adalah mm air atau m^3/ha /musim air.

Dari rumus tersebut efisiensi dapat ditingkatkan dengan 3 pendekatan: (1) produksi naik melalui intensifikasi sedangkan Q_a atau Q_m tetap, (2) produksi tetap, tetapi Q_a atau Q_m turun, atau (3) produksi naik melalui intensifikasi dan ekstensifikasi, Q_a dan Q_m turun karena peningkatan efisiensi. Pendekatan ketiga yang paling ideal.

$$WYE \text{ tahun} = \frac{\sum_0^{n \text{ bulan}} (\text{padi} + \text{padi} + \text{palawija})}{\sum_0^{n \text{ bulan}} Q_a \text{ atau } Q_m}$$

WYE dapat pula dihitung dalam satu tahun atau dalam satu periode ketersediaan air. Dalam hal ini total produksi naik dengan menaikkan intensitas tanam. Sebagai contoh di wilayah irigasi Jatiluhur pada golongan tanam I dengan air irigasi yang tersedia selama 11 bulan, 9 bulan (golongan II) dan 7 bulan (golongan III).

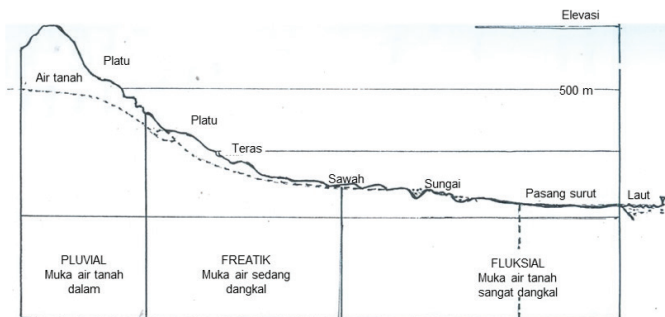
5.5. Makna dari Pengelolaan Air secara Terpadu Berbasis Ekoregional

5.5.1. Penyediaan dan penggunaan air

Sekitar 45% daratan Indonesia terdiri atas perbukitan dan pegunungan. Daerah perbukitan dan pegunungan adalah hulu sungai-sungai skala kecil, sedang dan besar. Air itu mengalir ke dataran sedang sampai dataran rendah langsung ke pengguna atau melalui danau alami, waduk buatan dan embung untuk berbagai keperluan: pertanian, domestik dan industri. Keterpaduan yang dimaksud adalah penerapan koordinasi, integrasi, sinkronisasi, dan sinergi (KISS) lintas sektoral dalam pengelolaan dan pemanfaatan air tersebut.

Gambar 9 mengilustrasikan toposekuen hubungan antara sumber air, konservasi air dan penggunaan air. Pelestarian sumberdaya air, konservasi air dan penggunaan air digambarkan

secara singkat berikut: wilayah DAS (daerah aliran sungai) dibagi menjadi 3 sub-wilayah dengan ciri-ciri khusus.



Gambar 9. Ilustrasi transek toposekuen dari Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan kedalaman air tanah yang berbeda.

Sumber: Fagi, A.M. dan I. Manwan (1992)

- Sub-wilayah pluvial

Sumber air : - zona tangkapan air hujan
 - air untuk pertanian (luasan terbatas): air hujan, air tanah (dalam), air limpasan (*run off*)

Kegunaan : - kehutanan (utama), padi gogo (luasan terbatas); padi sawah tadah hujan (terbatas) palawija dan sayuran

Masalah : - kurang pada MK
 - terancam degradasi tanah oleh erosi

- Sub-wilayah freatik

Sumber air : - zona konservasi
 - penerapan teknik konservasi (penterasan)

- Air untuk pertanian ~ air hujan, air tanah (kedalaman sedang), air limpasan, sungai, waduk, embung
- Kegunaan : padi gogo, padi sawah tadah hujan, padi sawah irigasi (luas terbatas), palawija, sayuran, aneka tanaman tahunan
- Masalah : - degradasi kesuburan tanah oleh erosi
- kekurangan air pada MK
- Sub-wilayah fluksial
 - Sumber air : - zona penggunaan air
- curah hujan, air tanah, air limpasan, air irigasi, air pasang-surut
 - Kegunaan : padi sawah irigasi, padi sawah tadah hujan, palawija, sayuran, padi lebak pasang-surut, aneka tanaman industri
 - Masalah : - sedimentasi sungai
- kurang air pada MK
- genangan air (banjir)

Gambar 9 menjelaskan pengaruh dari degradasi tanah dan air di DAS hulu (*pluvial*) dan DAS tengah (*freatik*) terhadap efisiensi air irigasi, yaitu:

WYE akan turun karena produksi turun akibat dari turunnya produksi pada MK yang disebabkan oleh debit air di saluran kurang dan produktivitas lahan dan tanaman turun

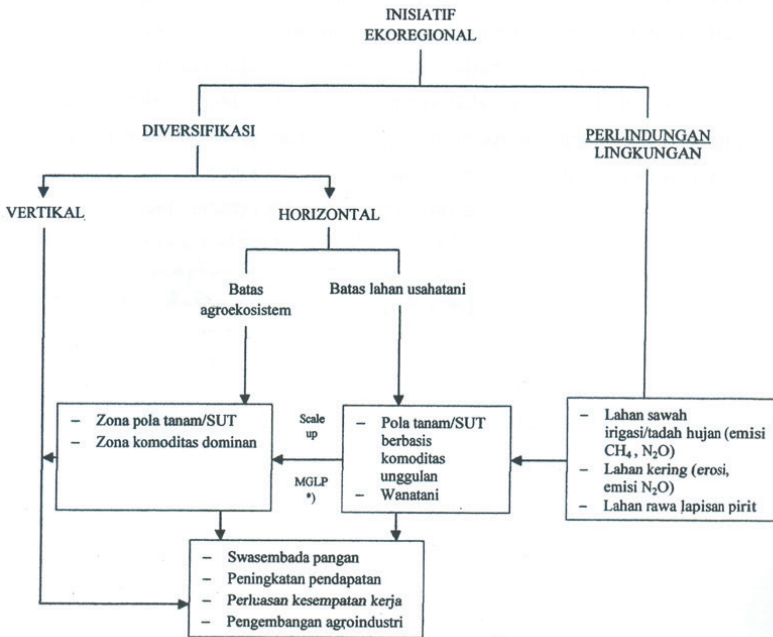
WYE tahunan juga turun karena intensitas tanam tidak terpenuhi akibat terbatas pasokan air irigasi

Konsekuensi dari semua itu adalah menurunnya produksi pangan dan ketahanan pangan. Upaya pemerintah dalam

merehabilitasi jaringan irigasi seluas 3,7 juta ha dan pembangunan waduk dan embung akan tidak optimal kalau DAS hulu dan DAS tengah rusak.

5.5.2. Diversifikasi pertanian dan industri

Inisiatif ekoregional yang dibahas dalam diskusi-diskusi (IRRI, 1997) menyangkut dua aspek, yaitu diversifikasi dan konservasi. Skema dari diversifikasi dan konservasi ditunjukkan dalam Gambar 10.



Gambar 10. Ilustrasi inisiatif ekoregional yang menunjukkan diversifikasi pada berbagai skala usaha dan pelestarian daya dukung lahan, serta pengolahan hasil. MGLP = Multiple Goals Linear Programming

Sumber: Fagi (2015)

Tampak dalam Gambar 10 bahwa inisiatif ekoregional menyentuh berbagai aspek: skala usahatani tingkat petani dan perluasannya sehingga terbentuk sistem usahatani pada hamparan lingkungan ekologis yang sama akan menghasilkan komoditas pertanian yang dominan. Komoditas tersebut kemudian diolah untuk meningkatkan nilai tambahnya.

Air berperan dan menentukan model sistem usahatani; sumberdaya air dan kualitas air dipertahankan. Masalah utama berbeda antara lahan irigasi dan tadah hujan, lahan kering dan lahan rawa/pasang-surut; pada lahan sawah irigasi mitigasi gas metana (CH_4) menjadi perhatian; erosi adalah masalah yang masih perlu perhatian karena dapat mengganggu ketersediaan air bagi pertanian, domestik dan industri. Inisiatif ekoregional menunjukkan perlunya KISS lintas sektoral dan sub-sektoral. (KISS: koordinasi, integrasi, sinkronisasi, dan sinergi). Istilah KISS diucapkan oleh Presiden Soeharto di hadapan para Menteri dalam kabinet yang dipimpinnya.

BAB VI

PERENCANAAN, PENGATURAN, DAN DISTRIBUSI AIR

6.1. Pengaruh Tipe Sistem Irigasi Terhadap Rencana Pengaturan Distribusi Air

Banyak faktor yang menentukan rancangan dan konstruksi infrastruktur irigasi untuk tujuan pengaturan dan distribusi air irigasi. Salah satu faktor tersebut adalah pola tanam. Pola tanam berkaitan erat dengan jenis tanaman yang akan ditanam pada awal musim tanam, puncak musim tanam dan akhir musim tanam pada musim hujan (MH) dan musim kemarau (MK).

Hal-hal yang dapat terjadi pada sistem irigasi baru dan sistem irigasi lama yang direhabilitasi adalah perubahan tipe sistem irigasi dari sistem gravitasi yang airnya disalurkan melalui saluran-saluran irigasi terbuka (*open gravity system*), ke sistem gravitasi tertutup yang airnya disalurkan melalui pipa-pipa dalam tanah (*close gravity system*) atau ke sistem irigasi sprinkler pada sebagian atau keseluruhan dari area pertanaman (*service area*). Tujuan dari perubahan atau modifikasi tipe sistem irigasi itu adalah untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air irigasi dan pemerataan distribusinya; *sprinkler irrigation* digunakan utamanya untuk jenis tanaman yang bernilai ekonomi tinggi seperti tanaman hortikultura (sayuran), dan jenis tanaman yang berkualitas untuk pakan ternak.

Fokus dari pedoman umum ini adalah pada sistem gravitasi terbuka untuk jenis tanaman yang bersifat populis, terutama tanaman padi dan sistem gravitasi tertutup spesifik dari sumber air terbatas yaitu embung (tandon air).

6.2. Sistem Irigasi Gravitasi Terbuka

Cara air irigasi disalurkan ke lahan pertanian pada sistem irigasi gravitasi terbuka harus ditentukan sejak perencanaan pembangunan infrastruktur dan perancangannya (*design*). Penyimpangan dari prosedur yang telah ditentukan akan menimbulkan masalah dan kesulitan di kemudian hari.

Sistem irigasi gravitasi perlu kelancaran aliran air melalui jejaring saluran air yang baik. Waktu yang diperlukan dalam penyaluran air akan berbeda berdasarkan jarak dari waduk, embung (tandon air) atau bendung ke lahan pertanian, kondisi saluran air dan luas pertanaman, maka jadwal penyaluran air (*water scheduling*) harus dirumuskan secara hati-hati. Sebagai contoh adalah jadwal penyaluran air di wilayah pengairan Jatiluhur (Jasa Tirta II). Wilayah pengairan dibagi menjadi 5 golongan tanam. Golongan tanam I menerima air mulai awal Oktober. Golongan II, III, IV dan V menerima air selang 15 hari, berturut-turut 15 Oktober, 1 Nopember, 15 Nopember, dan 1 Desember. Pada kenyataannya penjadwalan alokasi air atau area golongan tanam bisa menjadi VIII sampai XII, tergantung jarak dari saluran induk/saluran sekunder ke daerah sasaran, dan kondisi saluran air. Kalau saluran air melewati tanah bertekstur ringan atau saluran bocor atau ditumbuhi gulma, aliran air pasti terhambat.

Tiga metode pendistribusian air yang diterapkan oleh otoritas irigasi, yaitu: (1) penyaluran air berdasarkan permintaan (*demand method*); (2) penyaluran air terus menerus (*continuous flow method*); (3) penyaluran air secara bergilir (*rotation method*).

Pada kenyataannya, tidak semua sistem irigasi menerapkan satu metode tersebut; umumnya dijumpai modifikasi atau kombinasi dua atau tiga metode tersebut.

Penjelasan lebih rinci dari *demand method*, *rotation method* dan *continuous flow method* diuraikan seperti berikut:

6.2.1. Penyaluran air berdasarkan permintaan

Penyaluran air berdasarkan permintaan ~ volume dan waktu penyaluran air sesuai dengan permintaan dari petani (secara individual atau kelompok).

Kelebihan:

- (1) petani baik individual maupun kelompok dapat minta air irigasi kepada otoritas irigasi kapan saja yang dikehendaki
- (2) besarnya bayaran air berdasarkan volume yang disalurkan dapat dikalkulasi dengan lebih akurat
- (3) pada keadaan dimana persediaan air berlimpah permintaan air yang tidak teratur periodenya dapat dipenuhi, terutama pada awal dan akhir musim tanam (ini disebut *intermittent irrigation technique*).

Kekurangan:

- (1) perlu organisasi pengelolaan air yang profesional untuk memadukan secara tepat permintaan (*demand*) dan penyediaan (*supply*)
- (2) kesulitan akan dihadapi oleh otoritas irigasi jika permintaan alokasi air bersamaan dan melebihi kapasitas dari saluran air, sehingga perlu penjadwalan ulang.

Penyaluran air berdasarkan permintaan penulis jumpai di hampir semua sistem irigasi di Amerika Serikat yang tatakelola sumberdaya airnya telah moderen. Kelompok tani hamparan

mengajukan permohonan kebutuhan alokasi air secara tertulis kepada otoritas irigasi; permohonan tertulis itu berisi waktu dan volume penyaluran. Kebutuhan air di lokasi pemohon dievaluasi oleh tim dari otoritas irigasi. Tim mengelilingi lokasi/area pertanaman untuk mengukur suhu permukaan kanopi tanaman dengan *infra-red thermometer* (suhu permukaan kanopi berkorelasi dengan pembukaan/penutupan mulut daun sebagai indikator dari transpirasi atau kebutuhan air tanaman). Permintaan volume air oleh kelompok tani dikoreksi (kebutuhan air yang realistis). Air irigasi disalurkan sesuai kebutuhan yang realistis itu. Kalau kelompok tani menggunakan air irigasi secara berlebihan, mereka dikenai denda untuk setiap m³ air yang berlebihan.

Di Indonesia, khususnya di wilayah pengairan Jatiluhur, permintaan air irigasi oleh petani disalurkan melalui Panitia Irigasi secara bertingkat. Penggolongan tanam berdasarkan waktu penyaluran air diajukan kepada otoritas Jatiluhur dengan persetujuan Bupati, Pembantu Gubernur dan Gubernur. Akan tetapi kendali atau kontrol sangat lemah, apalagi kalau saluran irigasi tidak terpelihara dengan pintu-pintu kendali distribusi air yang tidak berfungsi.

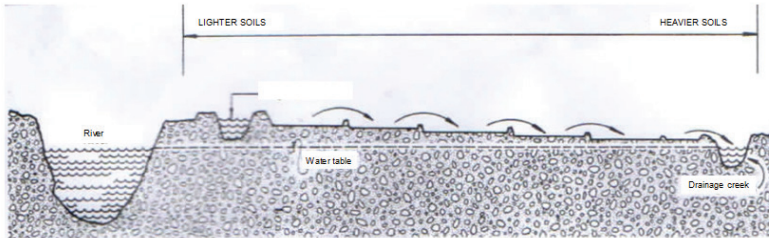
6.2.2. Penyaluran air secara terus-menerus

Pada teknik penyaluran air secara terus-menerus, air irigasi dialirkan terus-menerus baik diminta atau tidak diminta oleh petani.

Kelebihan:

- (1) penyaluran air secara terus-menerus tidak berarti bahwa air dimasukkan ke daerah pertanaman terus-menerus; air irigasi dialirkan ke area pertanaman kapan saja diminta oleh petani; ini dapat digolongkan sebagai *intermittent irrigation* (air waduk skala besar dialirkan terus untuk menggerakkan turbin pembangkit listrik).

- (2) penyaluran air secara terus-menerus diterapkan oleh petani padi pada sawah berteras-teras di lereng perbukitan/pegunungan; air mengalir bebas dari sumber air di DAS (daerah aliran sungai) hulu/tengah ke petakan-petakan sawah dari bagian atas sampai ke bagian bawah lewat bagian tengah (Gambar 11).



Gambar 11. Ilustrasi contoh dari pengairan terus-menerus dari petak ke petak sawah; sumber air dari sungai (tekstur tanah lebih berat dari petakan sawah yang letaknya paling rendah).

Sumber: Weekham dan Valera (1978)

Kekurangan:

- (1) teknik ini perlu saluran air pembagi yang kapasitas penyalurannya besar sesuai dengan kapasitas permintaan yang tidak terjadwal,
- (2) air yang mengalir akan terbuang ke saluran pembuangan kalau volume air yang diperlukan/diminta (*demand*) lebih sedikit dari yang disalurkan (*supply*)

Sistem penyaluran air secara terus-menerus umumnya tidak diterapkan, karena efisiensi penggunaan air yang relatif rendah.

6.2.3. Penyaluran air secara bergilir

Sampai sebelum buku ini ditulis, irigasi secara bergilir dimaknai sebagai *intermittent irrigation*, *alternate wet and dry irrigation*

technique diartikan secara umum sebagai teknik irigasi bergilir. Untuk menghindari kerancuan dalam mempraktekkan teknik irigasi bergilir penulis klarifikasi sebagai berikut:

- *intermittent irrigation* ~ penyaluran air irigasi berdasarkan permintaan dan penyaluran air secara terus menerus yang waktunya ditentukan berdasarkan permintaan petani; jadi waktu penyaluran tidak teratur; juga, bisa berupa penyaluran air secara terus-menerus yang dimodifikasi (dijadwal) karena *supply* air lebih besar dari *demand*, sehingga surplus air harus dibuang, yang pembuangannya tidak berdasarkan waktu yang teratur,
- *rotational irrigation* ~ penyaluran air yang dirancang secara bergilir pada waktu pergiliran yang teratur.

Sistem *intermittent irrigation* yang khas adalah pada lahan sawah tadah hujan, yang air hujannya disalurkan melalui irigasi perdesaan yang bersifat non-teknik. Air yang masuk ke petakan sawah tidak teratur datangnya, karena tergantung pada curah hujan. Sedangkan sistem irigasi rotational umum dipraktekkan pada sawah irigasi yang penyaluran airnya disalurkan secara teknis, artinya air yang disalurkan diukur volume atau debitnya.

6.3. Hukum Darcy dalam Penyaluran Air untuk Irigasi

Aliran air dari sumber air menuju petakan pertanaman mengikuti hukum Darcy (*Darcy's Law*), yang diekspresikan dalam rumus:

$$v = \frac{k \cdot h}{l}$$

di mana, V = kecepatan gerakan air ($\text{cm}^3/\text{cm}/\text{detik}$), h =beda tekanan (head) karena ketinggian sumber air, l = panjang saluran air, dan k = *hydraulic conductivity*.

Air irigasi yang mengalir bebas ke lokasi yang lebih rendah menyebabkan perbedaan tinggi (*head*); disebut sistem irigasi gravitasi. Dalam perjalanan air menuju petak pertanaman sasaran akan melalui saluran dengan tanah yang mempunyai nilai hydraulic conductivity tertentu; ini antara lain yang menyebabkan kehilangan air dalam perjalanan, dan menentukan efisiensi saluran air (*conveyance efficiency*).

Pada sistem irigasi non-teknik pada hamparan sawah yang berteras-teras aliran air dari hamparan petakan sawah di bagian atas ke hamparan petakan sawah dibagian bawah hukum Darcy dapat diamati dengan jelas.

Pada sistem irigasi teknikpun, hukum Darcy juga berlaku, tetapi aliran airnya lambat kalau beda ketinggian petakan sawah hamparan agak landai. Hal ini yang menyebabkan aliran air datang terlambat ke bagian-bagian petakan yang lebih jauh dari saluran air irigasi. Laju aliran air akan lebih lambat kalau saluran air ditumbuhi rerumputan atau bocor.

BAB VII

KIAT-KIAT PENYALURAN AIR IRIGASI SECARA BERGILIR

Penyaluran air secara bergilir adalah cara penyaluran air irigasi yang paling fleksibel, karena pengairan dijadwalkan dengan interval waktu yang teratur berdasarkan perhitungan kebutuhan air tanaman yang nyata, maka dianggap paling efisien. Basis dari pergiliran pengairan adalah kelompok tani atau gabungan kelompok tani per satuan petakan pertanaman (petak sekunder, petak tersier atau gabungan petak tersier) tergantung pada kapasitas penyediaan air waduk atau bendungan (debit air sungai) dan luas pertanaman.

Petakan pertanaman yang akan menerima air irigasi secara bergiliran disebut petakan pergiliran (*rotation blocks*). Dalam suatu wilayah golongan tanam harus ditentukan prioritas sub-wilayah sasaran yang akan mendapat pergiliran air irigasi dan batas dari petak pergiliran.

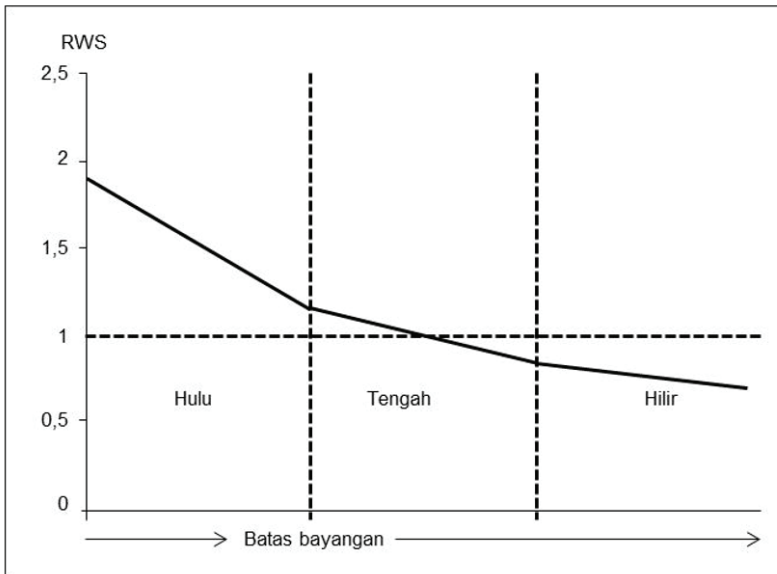
7.1. Prioritas Daerah Pergiliran Air

Daerah golongan tanam (dalam praktek disebut daerah golongan air) dibedakan posisinya/jaraknya dari saluran induk

atau saluran sekunder, yaitu: bagian hulu (*head*), bagian tengah (*middle*) dan bagian hilir (*tail*). Volume air yang masuk ke bagian hulu, tengah dan hilir diindikasikan dengan RWS (*Relative Water Supply*) dengan rumus:

$$RWS = \frac{Supply}{Demand}$$

RWS berbeda antara bagian hulu, tengah dan hilir seperti diilustrasikan dalam Gambar 12.



Gambar 12. Ilustrasi volume pendistribusian air diindikasikan dengan RWS.

Idealnya $RWS = 1$, tetapi pada kenyataannya di daerah hulu $RWS > 1$, di daerah tengah $RWS \leq 1,0$ dan di daerah hilir $RWS < 1,0$. Contoh dari RWS pada hamparan sawah di hulu, tengah dan hilir serta pengaruhnya terhadap hasil gabah ditunjukkan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Nilai RWS pada hamparan sawah pertanaman padi di bagian hulu, tengah dan hilir serta pengaruhnya terhadap hasil gabah (lokasi pada daerah irigasi macan, Binong (Subang), Jawa Barat).

Lokasi	Nilai RWS	Hasil gabah (t/ha; 14% k.a)
Bagian hulu	2,26	3,6 a
Bagian tengah	1,68	3,1 ab
Bagian hilir	1,32	2,8 b

+/ Angka yang diikuti huruf sama tidak berbeda secara statistik pada taraf 5% dengan LSD

Sumber: Farhan (1999)

Pertanaman padi di daerah hilir dan sebagian daerah tengah paling rawan kekurangan air irigasi, terutama pada musim kemarau, lebih-lebih jika terjadi anomali iklim *El Nino* (kemarau panjang). Selain itu datangnya air irigasi ke petakan-petakan sawah di sebagian daerah tengah dan seluruh daerah hilir bisa terlambat lebih dari seminggu. Hal ini yang menyebabkan golongan tanam/golongan air bertambah sampai golongan VIII-XII.

Kurva RWS dalam Gambar 12 dibuktikan oleh Farhan (1999) dari hasil penelitiannya (Tabel 5).

Kecukupan air irigasi lintas golongan tanam berimplikasi pada pola tanam dan varietas padi yang ditanam dan teknik budidayanya. Pola tanam yang sesuai bagi daerah-golongan tanam sampai saat ini belum ditata dengan benar.

7.2. Penentuan Batas dan Jumlah Petakan Rotasi

Konsep *stress day* diusulkan untuk dijadikan dasar bagi penentuan jumlah petakan rotasi (Fagi dan Sanusi, 1983). Penelitian pada tanah *hidromorf* kelabu di Kebun Percobaan (KP) Sukamandi,

Balai Penelitian Tanaman Pangan Sukamandi (sekarang Balai Besar Penelitian Tanaman Padi) menghasilkan data seperti dalam Tabel 6. Pengairan 5-9 hari sekali atau 1-5 *stress day* tidak menurunkan hasil padi. Dalam praktek pengairan 4-5 hari sekali umumnya dijumpai.

Stress day

Jumlah hari tanpa genangan dihitung 2-3 hari setelah air di petakan sawah pada kondisi macak-macak

Tabel 6. Pengaruh selang pemberian air irigasi terhadap hasil padi sawah (rata-rata dari varietas IR36 dan Cipunegara) di KP Sukamandi, MK 1982.

Selang pemberian air irigasi (periode <i>stress day</i>)	Hasil gabah (ton/ha) ^{++/}
- Kontrol (selalu tergenang)	5,3 b
- 5 hari sekali (1- <i>stress day</i>)	5,4 b
- 9 hari sekali (5- <i>stress day</i>)	5,3 b
- 13 hari sekali (9- <i>stress day</i>)	5,0 ab
- 17 hari sekali (13- <i>stress day</i>)	4,6 a
- 21 hari sekali (17- <i>stress day</i>)	4,4 a

^{+/} Jenis tanah *Vertic Aquic Tropaquults* atau *Hidromorf kelabu*

^{++/} Angka yang diikuti huruf sama tidak berbeda secara statistik pada taraf 5% dengan LSD

Sumber: Fagi dan Sanusi (1983)

Lama interval pengairan tergantung pada tekstur tanah. Pada tanah bertekstur ringan-sedang interval pengairan lebih pendek. Pengairan 5 hari sekali (1 = *stress day*), sampai 9 hari sekali (5 = *stress day*) tidak menurunkan hasil gabah. Hamparan sawah sasaran dibagi menjadi 5-9 petakan rotasi (*rotation block*). Pada petakan yang

rotasinya 5, air irigasi untuk petakan pertama disalurkan pada hari ke-6; ini disebut *6-day rotation*. Cara yang sama diterapkan pada hamparan yang petakan rotasinya 9 (*10-day rotation*).

Faktor K yaitu perbandingan debit air tersedia dan debit air yang dibutuhkan pada sadap tersier adalah dasar penentuan pengairan di petak kuarter, tersier atau sekunder. rotasi pengairan diberlakukan kalau nilai $K < 0,7$ (Tabel 7).

Tabel 7. Pembagian air irigasi secara bergilir berdasarkan nilai K.

Nilai faktor K	Kriteria	Posisi rotasi pembagian air irigasi
0,70-1,25	Baik	Kontinu
0,50-<0,70	Cukup	Rotasi kuarter
0,25-<0,50	Buruk	Rotasi tersier
<0,25	Sangat buruk	Rotasi sekunder

Sumber: Subari (2008)

Baver (1966) menggunakan data meteriologi untuk menentukan interval irigasi atau irigasi bergilir, untuk mencegah dampak negatif dari deplesi air tanah, yang dapat menimbulkan cekaman air bagi tanaman dengan konsep *degree-day*.

Degree-day

Jumlah selisih suhu udara antara suhu harian maksimum dan 700F untuk waktu atau periode tertentu dalam derajat Fahrenheit

Rotasi irigasi berdasarkan nilai pengamatan *degree-day*:

- akumulasi *degree-day* adalah jumlah *degree-day* harian untuk waktu atau periode tertentu.
- akumulasi sekitar 350 *degree-day* dalam satu periode antara interval irigasi adalah optimum; artinya, irigiasi berikutnya

diberikan setelah periode tertentu (hari); telah mencapai akumulasi degree-day 350.

Thornthweit dalam Baver (1966) menggunakan kedalaman muka air tanah pada batas maksimum 10 cm; menurut pengamatannya air tanah yang dijerap tanaman maksimum sampai turun mencapai 10 cm, pada semua jenis tanah. IRRI menggunakan kedalaman air tanah 10 cm untuk mengairi padi sawah sampai tanah jenuh air pada kedalaman air genangan tertentu.

Handoko dan Irsal Las (1995) menggunakan *degree-day* atau *heat unit* atau *thermal unit* dalam memprediksi umur tanaman. *Degree-day* dari varietas padi pada berbagai stadia tumbuh adalah dasar pemilihan varietas padi untuk ditanam pada kondisi iklim ekstrem. Dengan cara ini, tanaman padi terhindar dari cekaman kekurangan air pada kondisi iklim ekstrem yang dapat menyebabkan tanaman kekeringan.

7.3. Implikasi dari Penetapan Prioritas Daerah Pergiliran Air dan Stress Day

Tahap 1: Batas daerah/unit pergiliran

- Buat batas daerah pergiliran pada sebagian dari daerah tengah dan seluruh daerah hilir (Gambar 12).
- Acu peta wilayah golongan air; tentukan dalam tiap golongan air zone hulu, tengah dan hilir; luas dari tiap-tiap zone tergantung pada kapasitas penyediaan air dari sumber daya air sungai (bendung) atau waduk

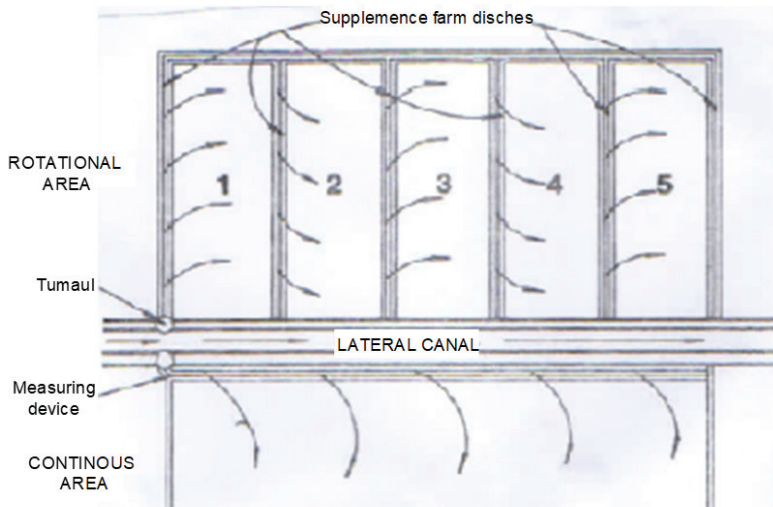
Tahap 2: Batas dan jumlah petakan rotasi

- Gunakan data jangka panjang profil penyediaan/ketersediaan air sungai/waduk
- Diasumsikan pergiliran air 4-5 hari sekali; bagi petak tersier atau sekunder (tergantung kapasitas sumber air, luas pertanaman

dan rancang-bangun saluran dan kapasitas aliran), menjadi 4-5 petakan pergiliran

- Contoh pembagian petakan pergiliran pada petak tersier seluas 50 ha; petak tersier dibagi menjadi 5 petak pergiliran @ 10 ha (Gambar 13); setelah petak 1 penuh digenangi air, pintu air masuk ditutup, dan pintu air masuk ke petak 2 dibuka; demikian seterusnya.
- Maka, petak 1 akan menerima air irigasi kembali pada hari ke-6; teknik pergiliran air demikian disebut *6-day-rotation*.

Pada kenyataannya ukuran dan bentuk petak pergiliran tidak teratur seperti Gambar 13. Petakan-petakan sawah asli milik petani tidak perlu ditata ulang.



Gambar 13. Contoh pembagian petakan pergiliran dalam blok irigasi tersier seluas 50 ha.

Sumber: Wickham dan Valera (1978)

Keunggulan irigasi bergilir yang ditata seperti dalam Gambar 13 di lokasi penelitian di *Upper Pampanga Research Project* (Philippines) diuraikan dalam Tabel 8.

7.4. Contoh Penerapan Teknik Irigasi Bergilir di Lokasi SRI, Desa Salabu, Kecamatan Mangunreja, Tasikmalaya

Pelandaian, bahkan penurunan laju kenaikan produksi padi dialami oleh negara-negara produsen beras di Asia tropis. Penerapan teknologi intensif (teknologi Revolusi Hijau) dengan pemupukan berat terus menerus diduga sebagai penyebabnya karena fenomena tanah sakit atau *soil sickness/soil fatigue*. Penelitian kerja sama internasional yang dikoordinasikan oleh IRRI dengan tema *Reversing Trends of Declining Productivity of Rice* menghasilkan komponen teknologi yang setelah dikombinasikan dengan teknologi yang dihasilkan oleh Balai Penelitian Tanaman Padi (Balittan) Sukamandi, kemudian menjadi Balai Besar Penelitian Tanaman Padi (BB Padi) menjadi Teknologi Pengelolaan Tanaman Terpadu (PTT) pada padi sawah irigasi (Fagi *et. al.*, 2002).

Bersamaan dengan perhatian terhadap pelandaian/penurunan laju kenaikan produksi padi, ilmuwan Jepang meneliti teknologi padi lahan basah di dataran tinggi di Madagaskar yang hasilnya sangat rendah karena petani menggunakan teknologi tradisional dan tanahnya keracunan unsur hara mikro (Fe, Al). Introduksi teknologi berupa penanaman bibit muda (sebelumnya petani menanam varietas padi lokal, umur bibit 60 hari), pemupukan organik dengan takaran tinggi untuk mengikat unsur mikro (Fe, Al) dan pengairan berselang untuk menekan kelarutan unsur mikro dalam air irigasi, meningkatkan hasil padi secara spektakuler. Komponen teknologi tersebut dinamai teknologi SRI (*System of Rice Intensification*) (Subari, 2008).

Teknologi PTT digunakan oleh Departemen Pertanian dalam program P2BN sejak MT 2007/2008 dan berlanjut sampai akhir

2013/2014. Departemen PUPR tertarik kepada teknologi SRI, karena salah satu komponennya adalah penerapan teknik irigasi bergilir (dipopulerkan sebagai teknologi hemat air). Direktorat Jenderal PSP (Prsarana dan Sarana Pertanian) mengadaptasi teknologi SRI, sementara Direktorat Jenderal Tanaman Pangan mengadopsi teknologi PTT.

Yayasan Padi Indonesia (Yapadi) mengevaluasi dampak dari teknologi SRI di Garut dan Ciamis (Saubari, 2005).

Informasi yang dikumpulkan dari evaluasi tersebut, adalah:

- Adopsi teknologi SRI dalam kurun 2000-2005 hanya mencapai 78 ha dari luas sawah 104.000 ha di Ciamis, dan 50 ha dari 109.000 ha luas sawah di Garut.
- Rendahnya adopsi disebabkan oleh kesulitan dalam mengumpulkan bahan baku kompos dan MOL, biaya mengolahnyapun mahal (perlu tenaga dari luar rumah tangga) untuk menghasilkan sekitar 10 ton pupuk organik,
- Hasil gabah dari teknologi SRI lebih rendah dari hasil gabah dari teknologi intensif petani, demikian pula keuntungannya,
- Teknologi irigasi bergilir alterasi basah (*wet*) – kering (*dry*) menghemat penggunaan air irigasi.

Buresh dan Dobermann (2009) mengamati bahwa pemupukan organik pada lahan sawah irigasi tidak efektif menambah unsur hara N, kecuali P dan K pada tanah-tanah tertentu. Alasan tersebut memodifikasikan anjuran pemupukan pada teknologi SRI (di Madagaskar seluruh pupuk berupa organik, di Indonesia kombinasi pupuk anorganik dan organik).

Saubari (2005) dan Fagi (2013) menilai bahwa komponen teknologi SRI dan PTT tidak banyak berbeda. Persamaan yang nyata adalah kedua teknologi menganjurkan penerapan teknik irigasi bergilir. Hal ini berarti bahwa di lokasi SRI, desa Salabu, kecamatan Mangunreja, Tasikmalaya, dapat diterapkan juga di

lokasi PTT pada lingkungan tumbuh yang sama di sentra produksi di luar Tasikmalaya. Pelopor SRI di Indonesia memodifikasi komponen teknologi SRI Mandagaskar menjadi komponen teknologi SRI Indonesia. Yang terpenting adalah mengganti anjuran pemupukan organik saja menjadi pemupukan anorganik dan organik. Pertanyaan yang timbul adalah masihkah nama SRI digunakan di Indonesia? Indonesia telah menerapkan sistem intensifikasi padi sejak MT 1969/70, yaitu BIMAS, INMAS, INSUS, SUPRA INSUS atau yang terakhir adalah P2BN (Peningkatan Produksi Beras Nasional), inilah yang sebenarnya SRI, dan komponen teknologinya 10 jurus Paket D pada Supra Insus, dan PTT pada P2BN.

7.5. Keunggulan Irigasi Bergilir

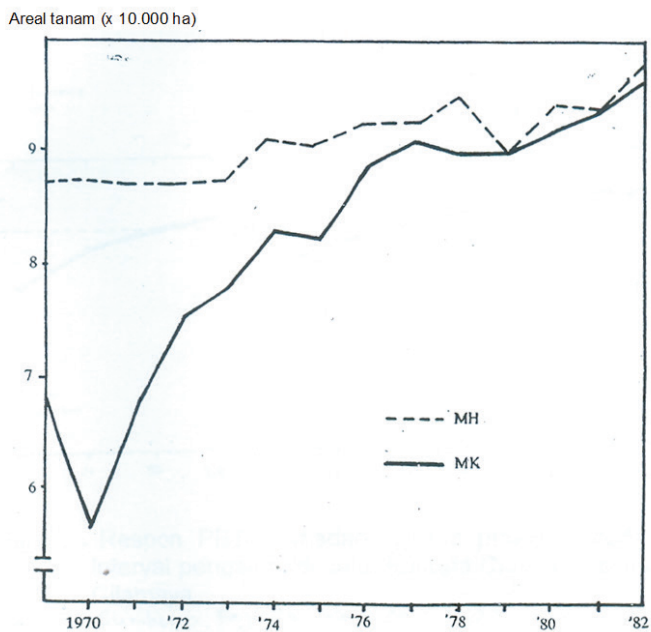
Informasi tentang keunggulan teknik irigasi bergilir membuktikan bahwa teknik irigasi ini bukan teknik irigasi yang diintraduksi dari Madagaskar ke Indonesia dan dipopulerkan sebagai teknologi yang bernuansa ekologi, teknologi hemat air atau teknologi adaptif terhadap perubahan iklim seperti diuraikan berikut.

7.5.1. Jasatirta II: Waduk Jatiluhur

Perum Otorita Jatiluhur (sekarang Jasatirta II) telah lama menerapkan teknik irigasi secara bergilir. Sebagai contoh di Otorita Tarum Timur di Subang, Jawa Barat.

Air di Waduk Jatiluhur ditampung dari sungai Citarum dan suplesi dari sungai-sungai kecil langsung ke Saluran Induk. Air dari sungai di Kabupaten Subang disalurkan ke hamparan sawah berdasarkan debit air sungai; pergiliran air irigasi diatur seperti berikut: (1) debit air sungai 60% dari normal~pergiliran air 2-3 hari sekali, disebut gilir glontor, (2) debit air $\leq 40\%$ ~pergiliran air 4-5 hari sekali, disebut gilir giring

Sebelum teknik irigasi bergilir diterapkan, area pertanaman padi sawah 90.000 ha pada musim hujan (MH) dan sekitar 50.000 ha musim kemarau (MK). Beberapa musim tanam setelah irigasi bergilir diterapkan, area tanam pada MK mendekati area tanam pada MH. Artinya, air irigasi yang dihemat karena irigasi bergilir pada MK digunakan untuk memperluas area tanam pada MK seperti ditunjukkan dalam Gambar 14.



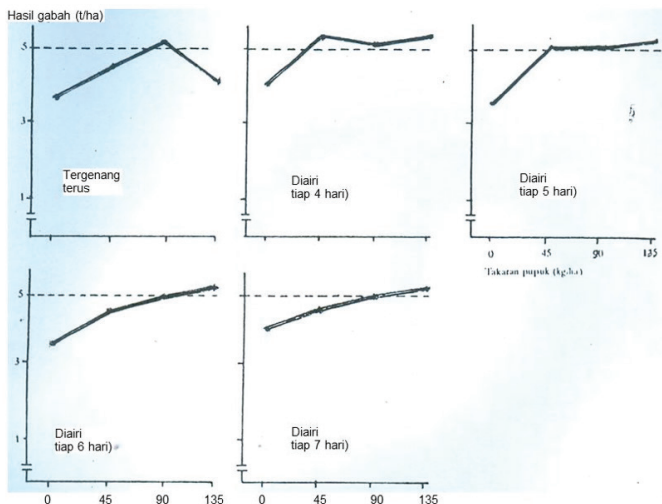
Gambar 14. Luas areal tanam padi sawah di wilayah pengairan Timur, sistem irigasi Jatiluhur, pada MK setelah diterapkannya irigasi bergilir.

Sumber: Fagi dan Manwan (1992)

7.5.2. KP. Sukamandi ~ sub-sistem irigasi Tarum Timur

Teknik irigasi bergilir menghemat penggunaan air irigasi. Pada tanah hidromorf kelabu KP Sukamandi untuk menghasilkan gabah varietas padi unggul $\geq 5,0$ ton GKG/ha perlu pupuk urea

45 kg N/ha kalau irigasi bergilir 4-5 hari sekali diterapkan. Kalau irigasi tergenang terus (*continuous flow-flooding*) diterapkan, perlu pupuk 90 kg N/ha untuk menghasilkan gabah $\geq 5,0$ ton GKG/ha pada MK (Gambar 15).



Gambar 15. Respon PB36 terhadap takaran pupuk urea pada berbagai interval pengairan di jalur Pantura Ciasem, sistem irigasi S. Cilamaya.

Sumber: Fagi dan Manwan (1992)

Periode kering pada irigasi bergilir meningkatkan kapasitas oksidasi akar tanaman padi (*oxidizing power*), maka akar dapat menyerap hara tanah secara optimum. Akibat dari periode kering yang lain adalah larutan di dalam akar menjadi lebih kental dari larutan dalam tanah di sekitar akar tanaman. Segera tanah menjadi basah setelah air irigasi dimasukkan ke petak pertanaman, air melarutkan atau mengencerkan larutan tanah yang mengandung unsur hara, dan akar lebih aktif menyerap air tanah. Secara ilmiah aliran air itu terjadi secara cepat akibat dari perbedaan potensi kimia, potensi air dan tekanan osmosis seperti diuraikan dalam Bab sebelumnya.

Tabel 6 menunjukkan bahwa tanaman padi sawah tidak perlu digenangi terus-menerus untuk menghasilkan gabah yang cukup tinggi. *Stress day concept* diterapkan pada MK yang ketersediaan airnya kritis. Pada MH genangan air macak-macakpun (kedalaman air 0 cm) dapat diterapkan secara bergilir dengan genangan anjuran (5 cm) pada stadia tumbuh tertentu. Prospek irigasi bergilir tidak teratur demikian ditunjukkan dalam Tabel 8.

Tabel 8. Hasil gabah, konsumsi air irigasi dan efisiensi penggunaan air irigasi (rata-rata varietas padi Bogowonto, IR36, IR52, IR54) karena irigasi intermitten di Sukamandi, wilayah Jatiluhur MH 1984/85 dan MK 1985.

Teknik ¹⁾ pengairan	MH 1984/85				MK 1985			
	Hasil gabah ka.14% (t/ha)	Konsumsi air irigasi ²⁾		Efisiensi produksi (kg/ha.mm)	Hasil gabah ka.14% (t/ha)	Konsumsi air irigasi		Efisiensi produksi (kg/ha.mm)
		mm	%			mm	%	
Genangan 3-6 cm terus-menerus	7,2 a	676	100	10,7	4,4	734	100	5,9
Macak-macak selama 35-50 HST	7,1 a	597	88	11,9	4,4	654	89	6,8
Macak-macak selama 50-85 HST	6,9 a	585	87	11,8	4,5	638	87	7,1
Macak-macak selama 35-85 HST	6,8 a	403	60	17,0	4,5	490	66	9,2
Macak-macak	7,0 a	346	51	20,2	4,5	436	59	10,2

- 1) Genangan air setinggi 3-6 cm dipertahankan selain periode macak-macak (0-2 cm);
- 2) Hasil gabah yang diperoleh dari 5 teknik pengairan tidak berbeda nyata pada taraf 5%;
- 3) Konsumsi air irigasi diukur dengan pintu air tipe V-notch, air dimasukkan sampai genangan mencapai tinggi ditetapkan.

Sumber: Fagi et. al. (1992)

Tampak dalam Tabel 8 bahwa tanaman semua varietas padi yang digenangi air irigasi macak-macak dari fase vegetatif sampai fase generatif menghasilkan gabah yang tidak berbeda dengan yang digenangi 3-6 cm pada periode yang sama pada MH dan

MK. Secara rata-rata genangan air macak-macam itu menghemat air irigasi 49%. Efisiensi produksi air irigasi pada MH dan MK berturut-turut 20,2 dan 10,2 kg/ha.mm. Akan tetapi keadaan genangan air macak-macam perlu penyiangan gulma lebih intensif.

Irigasi bergilir juga diterapkan pada mina padi untuk itu kolam pengungsian (*refugee pond*) dibangun di sudut petakan pertanaman padi yang ukurannya tidak terlalu mengganggu populasi tanaman padi. Tujuannya adalah ikan berenang ke arah kolam ketika tiba gilirannya sawah dikeringkan sampai macak-macam. Ikan mas dipanen 35 hari setelah *fingerlings* disebar ke sawah. Hasil pengamatan terhadap konsumsi air irigasi selama 35 hari ditunjukkan dalam Tabel 9.

Tabel 9. Neraca air pada 3 cara teknik irigasi pada minapadi di KP Sukamandi, MH 1988/1989 dan MK 1989.

Lokasi	Konsumsi air total*) (cm ³ /ha/35 hari)	Curah hujan (cm ³ /ha/35 hari)	Konsumsi air irigasi (cm ³ /ha/35 hari)
MH 1988/89			
• Irigasi berselang (intermittent)	5.950	3.677	2.273
• Irigasi tergenang diam	6.335	3.677	2.658
• Irigasi tergenang mengalir	6.965	3.677	3.288
MK 1989			
• Irigasi berselang (intermittent)	3.115	1.450	1.655
• Irigasi tergenang diam	5.915	1.450	4.465
• Irigasi tergenang mengalir	6.160	1.450	4.710

*) Perhitungan konsumsi air 35 hari karena ikan dipanen pada 35 hari setelah sebar
Sumber: Fagi et. al. (1992)

Kesimpulan yang dapat ditarik dari Tabel ini:

- Irigasi berselang pada mina-padi sampai ikan dipanen menghemat konsumsi air irigasi sekitar 15% dari irigasi tergenang diam pada MH, dan 33% pada MK.
- Irigasi tergenang mengalir paling boros penggunaan air.

7.5.3. KP. Jakenan

Di KP Jakenan, Balingtan (Pati) teknik irigasi bergilir (*intermittent irrigation*) diterapkan pada penelitian pengaruh teknik budidaya terhadap hasil padi dan emisi GRK. Hasil penelitian ditunjukkan dalam Tabel 10.

Tabel 10. Perbandingan hasil dan GWP dari pengaruh paket teknologi budidaya dan teknik irigasi di KP Jakenan, Balingtan, MK dan MH.

Perlakuan Paket Teknologi	Hasil (ton GKG/ha)	GWP (ton CO ₂ e/ha)	Hasil (ton GKG/ha)	GWP (ton CO ₂ e/ha)
Non-PTT tergenang	4,66 a	13.552	7,28 ab	8,3 a
Non-PTT intermittent	4,51 ab	7.394	7,99 a	4,7 b
PTT tergenang	4,31 b	8.131	7,42 ab	5,4 ab
PTT intermittent	4,18 b	7.976	7,83 a	3,4 b
SRI intermittent	2,31 d	6.191	4,74 c	3,4 b
Semi-SRI intermittent	3,07 c	9.108	6,20 bc	6,2 ab

Angka dalam lajur yang diikuti huruf sama berarti tidak berbeda nyata pada taraf 5% dengan LSD.

Sumber: Balingtan (2015)

Keterangan: GWP (Global Warming Potential) adalah:

- Angka untuk menyetarakan nilai potensi pemanasan global dari CH₄-C dan N₂O-N di setarakan dengan nilai CO₂-C; $GWP (CO_2e/ha) = (N_2O-N \times 293 + CH_4-C \times 21) + (CO_2-C \times 1)$.
- Angka dalam lajur yang diikuti huruf yang sama berarti tidak berbeda nyata pada taraf 5% dengan LSD.

Kesimpulan dari hasil penelitian adalah:

- Teknologi PTT dan SRI (*System of Rice Intensification*) menekan GWP dengan nyata; tetapi hasil dari teknologi SRI dan semi-SRI lebih rendah dari hasil gabah dari teknologi non-PTT dan teknologi PTT.

- Irigasi bergilir menekan emisi GRK diindikasikan dengan GWP. Pada keadaan sawah tergenang dekomposisi aerob bahan organik menghasilkan metan (CH_4); pada keadaan kering influks O_2 menekan emisi CH_4 (dekomposisi aerob) (IRRI: <http://www.knowledgebank.irri.org>)
- Karena hasil gabah dari teknologi SRI dan semi-SRI yang rendah maka indeks GWPnya masih tinggi, sebanding dengan indeks GWP dari teknologi non-PTT yang digenangi terus-menerus.

7.5.4. Upper Pampanga River Project

Hasil penelitian dan praktek yang diterapkan di KP Sukamandi dan di Waduk Jatiluhur (Jasa Tirta II) sejalan dengan hasil penelitian IRRI (*International Rice Research Institute*) di *Upper Pampanga River Project* di Propinsi Nueva Ecija, Filipina.

Teknik irigasi bergilir dan irigasi terus menerus dibandingkan pengaruhnya terhadap konsumsi air, hasil gabah dan efisiensi hasil (*yield efficiency*). Perbandingan ditunjukkan dalam Tabel 11.

Tabel 11. Perbandingan volume penggunaan air irigasi, hasil gabah dan efisiensi hasil antara irigasi bergilir dan pengairan terus menerus pada *Upper Pampanga Research Project*, Filipina, MK 1974.

Lokasi	Penggunaan air total (mm)	Hasil gabah (ton/ha)	Efisiensi hasil (kg gabah/m ³ air)
Kaliwangan			
• Pergiliran air	1668	3,67	0,22 (0,13)
• Pengairan terus menerus	1885	3,66	0,20 (0,12)
Gomez			
• Pergiliran air	842	3,45	0,41 (0,23)
• Pengairan terus menerus	872	3,11	0,36 (0,21)
Santa Arcadia			
• Pergiliran air	684	3,14	0,46 (0,24)
• Pengairan terus menerus	690	2,97	0,43 (0,21)

Lokasi	Penggunaan air total (mm)	Hasil gabah (ton/ha)	Efisiensi hasil (kg gabah/m ³ air)
Rata-rata			
• Pergiliran air	1065	3,42	0,36 (0,18)
• Pengairan terus menerus	1149	3,25	0,33 (0,16)

$$\text{Efisiensi hasil} = \frac{\text{Hasil gabah (kg)}}{\text{Konsumsi air (m}^3\text{)}}$$

Sumber: Wickham dan Valera (1978)

Wickham dan Valera (1978) menyimpulkan data dalam Tabel 11, sebagai berikut:

- irigasi bergilir dapat diterapkan di *Upper Pampanga River Project*, meningkatkan efisiensi hasil akibat dari lebih rendahnya konsumsi air dan naiknya hasil gabah.
- kedua teknik irigasi di lokasi proyek lebih baik kinerjanya dari teknik pengairan tradisional (sebelum proyek) karena penyaluran air diatur secara tepat oleh adanya pintu-pintu pembagi yang dapat mengatur pembagian air secara lebih tepat sesuai dengan kebutuhan tanah dan tanaman, seperti ditunjukkan dalam rumus:

$$I = ET + S \& P - Ch \text{ (efektif)}$$

di mana, I adalah kebutuhan air irigasi, ET adalah evapotranspirasi, S adalah *seepage* (gerakan/keluaran air horizontal) dan P (gerakan air ke bawah atau perkolasi), Ch (curah hujan).

7.6. Pergiliran Air Irigasi pada Sistem Gravitasi Tertutup dan Pipanisasi

Peningkatan efisiensi penggunaan air terus diupayakan berdasarkan kenyataan, bahwa: (a) tanaman tertentu tumbuh pada tanah bertekstur ringan, karena drainase alaminya cukup baik, (b) sumber air terbatas (sungai/waduk skala kecil/tandon air atau embung), dan (c) air harus dialirkan melalui jaringan irigasi

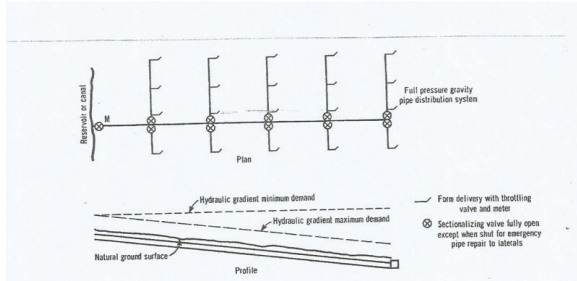
terbuka pada tanah bertekstur ringan (di bendung Barugbug, sistem Irigasi Jatiluhur, Jatisari, Karawang, kehilangan air di saluran air mencapai $\geq 30\%$).

Upaya penghematan air itu diwujudkan dengan penyaluran air lewat pipa yang ditanam di bawah tanah atau air waduk/bendungan dipompa dan dialirkan melalui pipa dan disebar dengan *sprinkler* atau *big-gun*.

7.6.1. Hamparan lahan agak landai: sistem pipanisasi tertutup

Perbedaan tinggi lahan pertanian (*height gradient*) memperlancar aliran air dari waduk/tandon air di ketinggian. Ada dua cara penyaluran air pada keadaan seperti ini:

Arus aliran air agak lambat pada keadaan kapasitas tampung waduk/tandon air rendah dan lahan yang akan dialiri tidak luas. Gambar 16 menunjukkan skema penyaluran air ke petak-petak pertanian secara bergilir.



Gambar 16. Perbedaan muka air di waduk/tandon air dan permukaan lahan pertanian rendah (*low head*) atau agak datar.

Sumber: Bureau of Reclamation (1975)

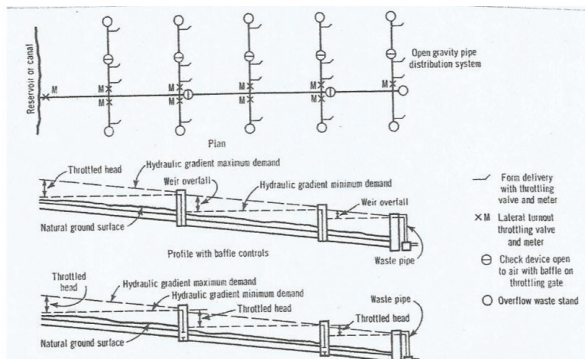
Pengaturan air ke petak-petak pertanian sama dengan uraian dalam Gambar 13. Berapa volume air atau lama penyaluran air ke masing-masing petak? Aspek yang perlu dipertimbangkan, adalah:

- Lihat rumus kebutuhan air irigasi
 - Pada MK, Ch efektif = 0

- ET minimum untuk padi 6,6 mm/hari (200 mm/bl); untuk palawija 3,3 mm/hari (100 mm/bl)
- Rejim air tanah yang akan dicapai adalah kapasitas lapang
- *Furrow irrigation* diterapkan pada palawija
- Komponen teknologi budidaya untuk menekan ET, adalah:
 - Mulsa serasah tanaman dan mulsa tanah (tanah digaru untuk memotong kapilarisasi ruang-ruang di antara butir-butir tanah) untuk menekan laju evaporasi.
 - Penanaman jenis atau varietas tanaman yang tahan kering (*sorghum*) dan yang berakar dalam (a.l. kacang hijau).

7.6.2. Hamparan lahan agak landai sistem pipanisasi semi terbuka

Caranya sama dengan sistem pipanisasi tertutup, tetapi pada jarak tertentu dipasang pipa tengah (diameter cukup besar untuk mengatur kecepatan aliran air ke petakan-petakan yang terletak di bagian bawah dari hamparan lahan pertanian (Gambar 17). Sistem ini jarang digunakan karena rumit walaupun pipa PVC relatif lebih murah.

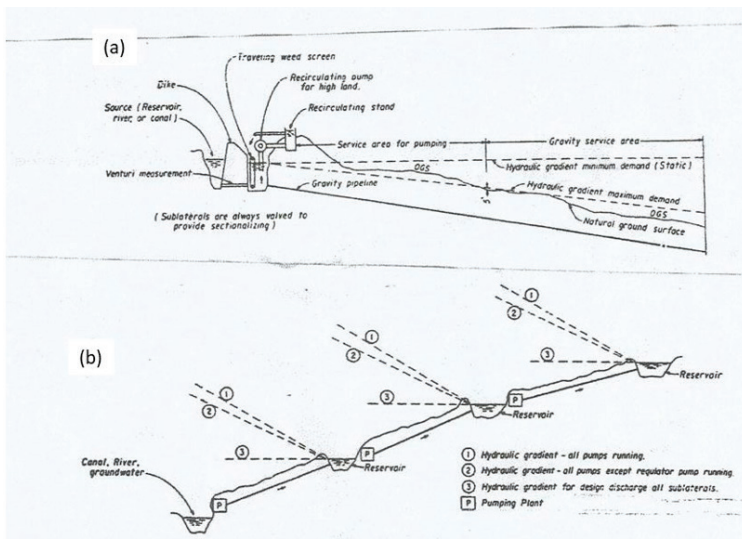


Gambar 17. Pengaturan air dengan pipanisasi semi-terbuka pada perbedaan muka air di waduk (tandon air) rendah atau agak datar.

Sumber: Bureau of Reclamation (1975)

7.6.3. Lahan pertanian berlereng agak terjal

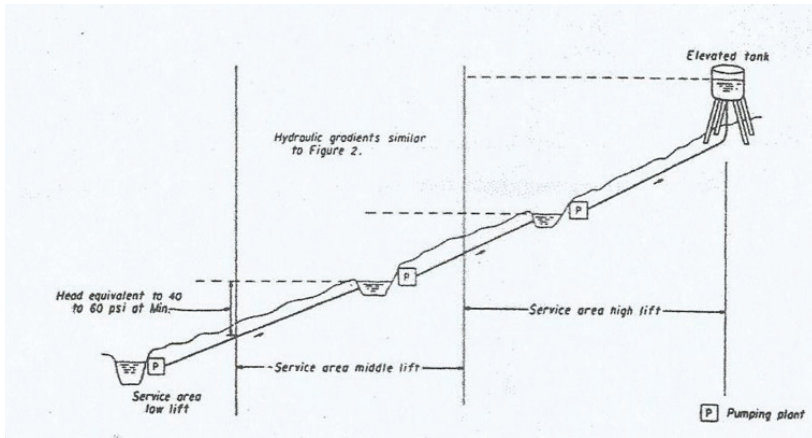
Waduk/tandon air berada pada ketinggian yang lerengnya agak terjal. Perbedaan tinggi muka air dalam waduk/tandon air dengan muka lahan pertanian paling bawah cukup besar (*high head*). Air dalam waduk/tandon air dialirkan melalui pipa dalam tanah dan ditampung dalam embung-embung yang lebih kecil di lokasi yang letaknya lebih rendah (Gambar 18).



Gambar 18. Skema pengangkutan air dan ditampung di penampung untuk dialirkan ke lahan pertanian (a); contoh tiga tingkat penampungan air untuk lahan yang makin rendah (b).

Sumber: Bureau of Reclamation (1975)

Untuk meningkatkan tekanan aliran air melalui pipa, pada waduk/tandon air di atas dibangun penampung air yang ditinggikan, sehingga tekanan air lebih besar (Gambar 19). Tujuannya untuk pengairan curah (*sprinkler irrigation*)



Gambar 19. Penampung ditinggikan berupa tangki agar tekanan ke daerah lebih rendah mampu menggerakkan sprinkler.

Sumber: Bureau of Reclamation (1975)

Jadi, cara pengairan pada sistem seperti dalam Gambar 18 dan 19, adalah: pengairan permukaan tanah (*surface irrigation*), pengairan curah (*sprinkler irrigation*) atau pengairan bawah tanah (*subirrigation*). Definisi dari ketiga cara irigasi tersebut, adalah:

- Irigasi permukaan: air irigasi dialirkan ke seluruh permukaan secara merata atau melalui bagian yang sengaja digali dengan interval tertentu, misalnya melalui bagian lahan rendah di antara guludan pertanaman (*partial flooding*).
- Irigasi curah: air dialirkan melalui pipa yang ujungnya dipasang alat curah atau spray; volume air yang disemprotkan lebih rendah dari laju infiltrasi, sama dengan laju infiltrasi atau lebih besar dari laju infiltrasi; maka, laju infiltrasi harus diketahui terlebih dahulu.
- Irigasi bawah tanah: irigasi cara ini disebut irigasi perakaran untuk menaikkan tinggi air tanah (*water table*); pipa di bawah tanah (ditanam dangkal dan dilubangi); lubang dibungkus

dengan jala-jala halus agar tidak tertutup butiran tanah; irigasi tetes (*drip irrigation*) dan *trickle irrigation* adalah modifikasi dari irigasi bawah tanah.

7.7. Kasus di KP Jakenan

Kementerian Desa Pembangunan Daerah Tertinggal dan Transmigrasi dari Pemerintah periode 2015-2019 mengalokasikan dana Rp. 20 triliun pada tahun 2017 untuk membangun 30.000 embung (*small farm reservoir*). Presiden mengarahkan agar setiap desa di daerah tertinggal menggunakan dana itu untuk membangun embung supaya indeks pertanaman naik dari 1,4 menjadi 2-3 kali per tahun (Kompas, 3 Maret 2017).

Sebelum gagasan tentang pembangunan embung secara massal itu direncanakan, KP (Kebun Percobaan) Jakenan, Balingan, telah membangun embung untuk mensuplesi air hujan dalam mengairi tanaman padi dan palawija pada pola tanam berbasis padi. Embung yang semula dibangun dalam skala/ukuran kecil, dilanjutkan menjadi skala sedang, kemudian menjadi skala cukup besar. Air embung ini multifungsi: pengairan padi dan palawija, tanaman hortikultura (sayuran dan buah-buahan), peternakan ruminansia (sapi) dan unggas (bebek), dan perikanan, serta keperluan kantor dan rumah tangga.

Alasan dari pembangunan embung dan pemanfaatannya diuraikan secara singkat berikut ini:

7.7.1. Profil KP Jakenan

Lokasi

KP Jakenan terletak di desa Sidomukti, Kecamatan Jakenan, Kabupaten Pati, Propinsi Jawa Tengah, pada posisi 111°-151°1'BT dan 6°8'-9°3' LS. Luas KP Jakenan 30,8 ha yang digunakan untuk

lahan penelitian dan pengembangan laboratorium, perkantoran, perumahan dan embung.

Lahan penelitian tergolong dalam ekosistem sawah tadah hujan. Kabupaten Pati menyumbang sekitar 11% (39,383 ha) sawah tadah hujan di Propinsi Jawa Tengah (358.124 ha). Sebagian besar lahan sawah tadah hujan di Kabupaten Pati berada di Kecamatan Jaken, Jakenan, Winong dan Pucakwangi. Jadi KP Jakenan mewakili lahan sawah tadah hujan di Kabupaten Pati dan Propinsi Jawa Tengah.

Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian (Badan Litbang Pertanian), Kementerian Pertanian, menerapkan KP Jakenan sebagai salah satu dari Taman Sains Pertanian (*Agriculture Science Park*). Maka KP Jakenan dapat disebut sebagai monumen keberhasilan dari penelitian tanaman pangan di lahan sub-optmial.

Topografi dan jenis tanah

Umumnya topografi Kecamatan Jakenan bergelombang dan berombak, maka sulit membangun saluran irigasi. Saluran irigasi yang dibangun berfungsi untuk menyalurkan air hujan yang berupa aliran permukaan ke bagian yang letaknya lebih rendah berupa persawahan.

Bagian dari Kabupaten Pati yang datar menerima air dari sungai Juwana, dan sebagian dari waduk Kedung Omboh. Luas sawah dialiri mencapai 20.598 ha.

Tanah KP Jakenan tergolong jenis Planosol yang terbentuk dari endapan pasir pantai dan bahan endapan (*Aluvial*). Sifat fisik tanah jelek, permeabilitas lambat dan peka erosi pada lahan yang berlereng. Kesuburan tanahnya ditunjukkan dalam Tabel 12.

Lahan pertanian dengan karakteristik sifat fisik dan kimia tanah seperti dalam Tabel 12 masuk kategori kapabilitas lahan P III s. Jenis tanah kategori P III s membatasi pilihan jenis tanaman dalam

pola tanam berbasis tanaman padi (FAO, 1974).

Tabel 12. Analisis fisik dan kimia tanah KP Jakenan di lokasi penelitian INSURF.

Tekstur tanah (%)	Nilai
- Pasir	40
- Debu	43-47
- Liat	13-15
pH tanah	
- Dalam air	4,6-5,2
- Dalam KCl	3,5
C-organik (%)	0,33-0,68
Kandungan N (%)	0,07
P tersedia (ppm)	12,0-14,0
Kation dapat dipertukarkan (me/100 g)	
- K	0,03-0,10
- Na	0,13
- Ca	2,04
- Mg	0,22
KTK (me/100 g)	4,0-5,98

Sumber: Fagi (1990), Wihardjaka et. al. (1998)

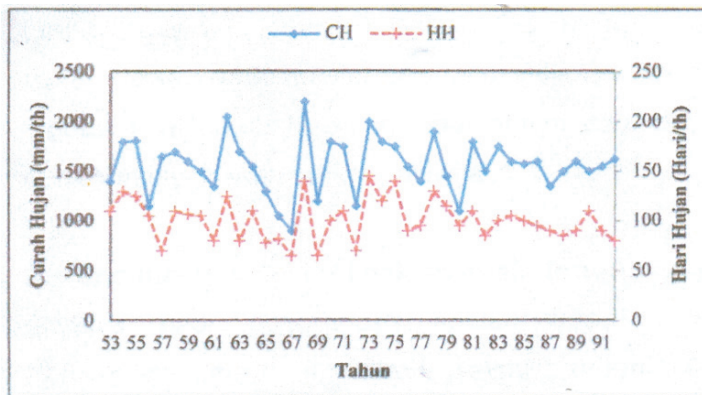
INSURF = International Network on Sustainable Rice Farming

Iklm dan curah hujan

Curah hujan dan suhu udara adalah unsur iklim utama yang menentukan sebaran jenis tanaman sebagai penciri dari tipologi lahan – tropik basah, stepa (padang rumput), semi-padang pasir dan padang pasir. KP Jakenan berada pada daerah beriklim kering.

Berdasarkan Atlas Sumberdaya iklim (Balit Agroklimat dan Hidrologi, 2003), iklim KP Jakenan tergolong tipe II A dengan curah hujan tahunan berkisar 1000-2000 mm. Data curah hujan tahunan di KP Jakenan selama 40 tahun (1952-1992) ditunjukkan dalam Gambar 20. Tampak bahwa curah hujan normal, di atas

atau bawah normal tidak mengikuti interval waktu yang teratur. Hal ini berarti bahwa keberhasilan atau kegagalan pola tanam yang dirancang oleh petani menghadapi ketidakpastian. Ketidakpastian ini akan berdampak terhadap ketahanan pangan dan ekonomi rumah tangga.



Gambar 20. Fluktuasi curah hujan dari tahun 1953-1991 di KP Jakenan, Balingtan, Pati, Jawa Tengah.

Sumber: Balingtan (2015a, b)

Untuk tujuan pengambilan keputusan dalam menentukan teknik budidaya yang tepat menghadapi pola curah hujan tahunan selama 40 tahun itu digunakan untuk membedakan antara tahun basah dan tahun kering dengan menggunakan perhitungan berikut:

Tahun basah

- Curah hujan 200 mm/bulan adalah curah hujan bulanan minimum untuk pertumbuhan padi sawah (diestimasi dari evapotranspirasi 6,6 mm/hari)
- Berdasarkan perhitungan selama setahun, curah hujan ≥ 1500 mm/tahun adalah indikator dari tahun basah, karena bisa menanam padi 2 kali dalam setahun.

Tahun kering

- Curah hujan 100 mm/bulan adalah curah hujan untuk tanaman palawija (evapotranspirasi 3,3 mm/hari)
- Curah hujan <1500 mm/tahun adalah indikator dari tahun kering pada total curah hujan ini padi hanya bisa ditanam sekali per tanun diikuti oleh tanam palawija.

7.7.2. *Escape mechanism* dari cekaman air dengan gogoranch

Teknik budidaya padi gogoranch adalah kearifan lokal yang dikembangkan oleh petani di lahan sawah tadah hujan untuk mengantisipasi ketidakpastian curah hujan. Teknik ini diteliti oleh Giessen (1942).

Sampai tahun 1990-an penggunaan teknik budidaya gogoranch masih sangat terbatas areanya. Fakultas Pertanian, Universitas Gajah Mada bekerja sama dengan BP Bimas mengkajinya di lahan petani dengan menggunakan varietas padi unggul lokal Dewi Ratih, dibandingkan dengan varietas unggul baru PB5 dan C4-63. Hasilnya menunjukkan bahwa PB5 dan C4-63 dapat dibudidayakan dengan teknik budidaya gogoranch pada lahan sawah bertekstur ringan (*Oxisols* atau *Latosol*) dan bertekstur berat (*Vertisol* atau *Grumusol*).

Penelitian teknik budidaya padi gogoranch di KP Jakenan mulai dirintis pada MH 1973/1974, dengan pendekatan *minus-one*. Hasil penelitian dalam Tabel 13 menunjukkan bahwa produktivitas lahan sawah tadah hujan di KP Jakenan dengan tanah yang tidak subur bisa ditingkatkan melalui teknik budidaya inovatif – penanaman padi varietas unggul baru C4-63, teknik budidaya gogoranch yang dipupuk lengkap N,P,K: jadi dapat dikatakan bahwa Revolusi Hijau mulai menyentuh lahan sawah sub-optimal pada MH 1973/74.

Tabel 13. Pengaruh pemupukan N, P, K terhadap hasil gabah varietas C4-63 gogorancah pada tanah planosol KP Jakenan, MH 1993/94.

Perlakuan pemupukan	Hasil gabah (t/ha)
N	1,2 a
P	1,4 a
K	1,7 ab
PK	1,4 a
NP	1,6 ab
NK	3,6 b
NPK	3,8 c
Tanpa pupuk	1,4 a

N = 90 kg/ha, P2O5 = 45 kg/ha, K2O = 30 kg/ha varietas padi C4-63
Sumber: Fagi (1977)

Sampai tahun 1970-an desa-desa di Kecamatan Jaken, Jakenan, Winong dan Pucakwangi tergolong desa-desa miskin. Varietas padi lokal ditanam pindah dengan pemupukan organik (pupuk kandang), maka hasilnya hanya 1,5-2,0 ton/ha.

Studi yang lebih komprehensif menunjukkan bahwa padi gogorancah menghasilkan gabah lebih tinggi dari padi varietas yang sama pada teknik tanam pindah (Tabel 14). Data dalam Tabel 14 menunjukkan bahwa (a) teknik budidaya gogorancah lebih sesuai dipraktekkan pada lingkungan KP Jakenan dari pada tanam pindah, (b) padi gogorancah ditugal pada lahan yang diolah kering sebelum MH tiba, maka dipanen lebih awal, sedang padi tanam pindah ditanam pada tanah berlumpur pada bulan Januari; fase generatif menghadapi cengkraman kekurangan air: (c) pupuk organik dan pupuk anorganik meningkatkan hasil: pupuk organik mensuplai unsur K dan seefektif pupuk KCl.

Tabel 14. Pemupukan organik dan anorganik pada padi varietas IR64 di KP Jakenan.

Perlakuan pemupukan	MH 1994/95	MH 1995/96	MH 1996/97
	(ton GKG/ha)		
Padi gogoranchah			
- Tanpa pupuk (kontrol)	2,35 a	3,03 a	1,51 a
- Pupuk kandang	4,87 d	4,53 b	2,56 b
- NP	3,38 b	5,67 cd	3,79 c
- Pupuk kandang + NP	5,47 e	6,67 e	4,36 cd
- NPK	4,00 c	5,49 c	3,81 c
- Pupuk kandang + NPK	5,31 e	6,11 de	3,80 d
Padi tanam pindah			
- Tanpa pupuk (kontrol)	1,47 a	0,46 a	-
- Sisa tanaman kedelai	2,03 b	0,71 a	-
- NP	3,12 c	1,29 b	-
- Sisa tanaman kedelai + NP	3,67 d	1,83 c	-
- NPK	3,78 d	1,15 b	-
- Sisa tanaman kedelai + NPK	3,92 d	1,82 c	-

Angka dalam kolom yang diikuti oleh huruf sama berarti tidak berbeda nyata dengan LSD pada taraf 5%.

- Takaran pupuk NPK berturut-turut 120 N, 18 P, dan 75 K kg/ha, pupuk kandang 5,0 t/ha
- Tanaman kedelai dipupuk 30 N, 18 P dan 50 K kg/ha;
- Tanaman padi gogoranchah digenangi air 6 minggu setelah benih ditugal.

Sumber: Balingtan (2015a, b)

7.7.3. Peluang kekeringan pada pola tanam berbasis padi dan langkah antisipatif

KP Jakenan menarik perhatian dari IRRI (*International Rice Research Institute*), Los Banos, Philippines, dan dipilih sebagai lokasi penelitian pada lahan sawah tadah hujan, kerjasama yang pernah dirintis adalah:

- *Integrated Water Management (IWM)* – berkenaan dengan aspek *water harvesting* (embung)

- *International Network on Sustainable Rice Farming (INSURF)* – aspek pola tanam diteliti kaitannya dengan ketersediaan air dan pemupukan
- *Rainfed Lowland Rice Research Consortium (RLRRC)* – pengembangan dari IWM dan INSURF, termasuk pengelolaan dana bersama, diskusi/pelatihan dan peralatan.
- *Green House Gass (GHG) Emission and Mitigation* – peralatan, pelatihan/diskusi, analisis data.

Tabel 14 adalah bagian dari data penelitian pola tanam (INSURF); data tentang neraca hara dari pola tanam telah dilaporkan dan dipublikasi (Wihardjaka *et.al.* 1998).

Dari data curah hujan periode 1953-1991 (Gambar 20), dianalisis peluang terjadinya kekeringan (Tabel 15). Pada tahun basah dan tahun kering peluang kekeringan cukup besar, pada tanaman padi walik jerami dan tanaman palawija. Dari Tabel 15 disimpulkan bahwa peluang kekeringan cukup besar dapat menimpa tanaman palawija pada tahun basah. Pada tahun kering peluang kekeringan besar dapat terjadi pada tanaman padi walik jerami dan tanaman palawija. Masalahnya adalah kejadian tahun basah dan tahun kering belum dapat diprediksi.

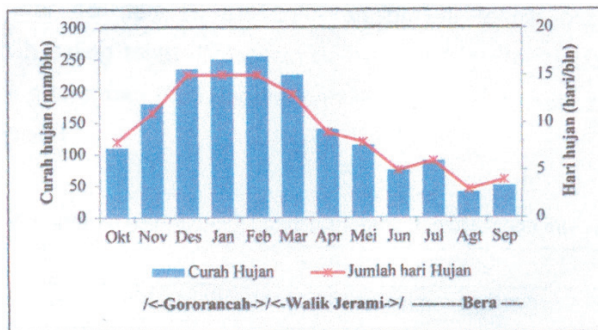
Tabel 15. Peluang terjadinya kekeringan pada pertanaman padi walik jerami dan palawija di KP Jakenan; analisis dibuat dari data curah hujan selama 40 tahun (1953-1992).

Intensitas hujan (mm/bulan)	Jumlah tahun	%	Jumlah hari hujan	Jumlah tahun	%	Jumlah hari hujan
Masa tanam padi						
walik jerami		April			Mei	
- >200	7	17,5	11	3	7,5	14
-300	20	50	11	12	30	10
-150	7	17,5	7	13	32,5	6
- <50	20	15	5	12	30	4

Intensitas hujan (mm/bulan)	Jumlah tahun	%	Jumlah hari hujan	Jumlah tahun	%	Jumlah hari hujan
Masa tanam palawija						
>200	0	0	0	0	0	0
-300	7	17,5	8	9	22,5	9
-150	10	25	6	6	15	4
<50	23	57,5	3	25	62,5	2

Sumber: Balingtan (2015a, b)

Peluang kejadian kekeringan akan lebih dipahami dengan melihat pola tanam pada tahun basah (Gambar 21) dan pola tanam pada tahun kering (Gambar 22). Selama 40 tahun, tahun basah terjadi 22 tahun dan tahun kering 18 tahun. Kalau teknik budidaya padi tanam pindah dipraktekkan, petani harus menunggu curah hujan bulanan 200-250 mm hal ini berarti bahwa petani mulai mengolah tanah bulan Desember dan tanam bulan Januari berikutnya.



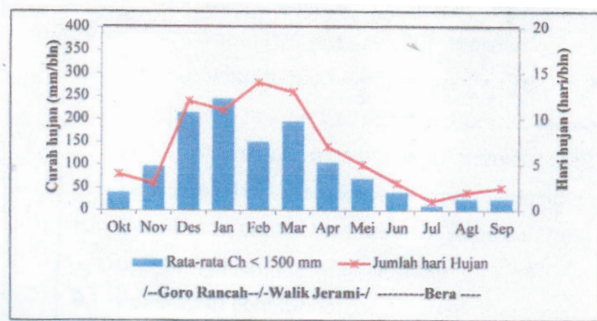
Gambar 21. Pola distribusi curah hujan bulanan pada tahun basah (rata-rata 22 tahun) di KP Jakenan, Balingtan.

Sumber: Balingtan (2015a, b)

Kalau yang ditanam adalah varietas padi berumur sedang (± 120 hari), panen akan terjadi pada pertengahan Mei. Tanaman

padi walik jerami mulai akhir Mei. Risiko kekeringan cukup besar, karena curah hujan bulanan ≤ 100 mm.

Pada tahun kering pertanaman padi tanam pindah akan menderita cekaman kekurangan air pada fase reproduktif. Informasi ini menjelaskan mengapa padi tanam pindah menghasilkan gabah sangat rendah pada MH 1995/96: pada MH 1995/96. Indonesia dilanda oleh kemarau panjang akibat El Nino.



Gambar 22. Pola distribusi curah hujan bulanan pada tahun kering (rata-rata 18 tahun) di KP Jakenan, Balingtan.

Sumber: Balingtan (2015a, b)

Gambar 21 dan 22 menunjukkan bahwa teknik budidaya padi gogorancah paling tepat diterapkan dan dianjurkan. Komponen teknologi pengelolaan tanaman padi gogorancah (PTT Padi Gogorancah) disajikan dalam Tabel 16.

Penjelasan komponen 7:

- Petak pertanaman padi jangan digenangi air ketika tanam padi berumur kurang dari 2 minggu setelah benih disebar (sebar langsung dalam baris atau tunggal) walaupun hujan lebat: umur terbaik untuk penggenangan adalah 4-6 minggu setelah biji berkecambah.

- Kalau hujan baru turun lebat sampai tanaman berumur 10 minggu tanaman dipertahankan tumbuh seperti padi gogo: pada umur 10 minggu, tanaman padi memasuki stadia primordia bunga; penggenangan akan mengganggu komponen hasil (mengurangi jumlah gabah isi per malai).

Tabel 16. Komponen teknologi PTT padi gogorancah pada lahan sawah tadah hujan.

Status	Komponen teknologi
Dasar	1. Pengolahan tanah kering secara sempurna.
	2. Penanaman varietas padi unggul yang adaptif terhadap sistem budidaya padi gogorancah.
	3. Penggunaan benih berkualitas dan bersertifikat.
	4. Pemupukan anorganik dan organik secara berimbang dengan kandungan hara tanah dan kebutuhan tanaman.
	5. Pengendalian gulma secara terintegrasi.
	6. Pengendalian hama/penyakit dengan prinsip PHT.
Pilihan	7. Pengaturan tata air dengan membangun saluran drainase sederhana untuk memudahkan konversi rejim air dari kering ke basah, khusus pada tanah bertekstur berat
	8. Tata tanam untuk memperoleh populasi tanaman yang optimal (rektangular atau legowo)
	9. Penerapan pola tanam yang berpeluang pasar dan secara agronomis menekan gulma dan penyediaan pakan ternak
	10. Pengelolaan panen dan pascapanen yang sesuai dengan kondisi sosial ekonomi setempat

Sumber: Balingtan (2015)

7.7.4. Panen air hujan dan air limpasan dengan embung

Sebaran intensitas curah hujan bulanan (Gambar 21) adalah rata-rata curah hujan bulanan selama 22 tahun. Total jumlah curah hujan ≥ 1500 mm/tahun, sebagai indikator dari tahun basah tidak menjamim bahwa tanaman padi gogorancah bebas dari kekeringan. Dapat terjadi bahwa pada fase pertumbuhan tanaman padi dari sejak tanam pada bulan Nopember sampai panen pada bulan Maret tahun berikutnya distribusi hujan tidak merata: ada

bulan dimana curah hujan <200 mm/bulan selama beberapa hari (istilah jawa “betatan”). Fase pertumbuhan dari tanaman padi walik jerami akan menghadapi fluktuasi curah hujan lebih parah dari fase pertumbuhan padi gogorancah.

Untuk mengantisipasi keadaan yang fluktuatif curah hujan bulanan pada masa pertumbuhan tanaman padi gogorancah dan padi walik jerami pada tahun basah, lebih-lebih pada tahun kering perlu ada cadangan air yang disimpan dalam embung. Logika dari ide untuk membangun embung adalah sebagai berikut:

- Jumlah curah hujan tahunan 1500 mm/tahun, hanya sebagian yang masuk ke dalam tanah melalui perkolasi dan dimanfaatkan oleh tanaman (lihat diskusi dalam bab-bab sebelumnya), sebagian lagi mengalir ke luar
- Aliran air hujan ke luar petakan pertanaman adalah air limpasan permukaan (*run-off water*): koefisien air limpasan permukaan (*coefficient run-off*) pada tanah yang permeabilitasnya lambat dari tanah Planosol diperkirakan 0,3-0,5 yang berarti air hujan yang mengalir ke luar petak pertanaman adalah 4500-7500 m³/ha. Jumlah ini sangat besar kalau diperhitungkan dalam satu hamparan lahan pertanian, dsb.
- Air limpasan ini ditampung dalam embung; jadi air dalam embung berasal dari curah hujan langsung dan dari air limpasan permukaan. Embung inilah yang diartikan sebagai *rainfall and run-off water harvesting*.

Di KP Jakenan, Balingtan (Pati), waduk skala kecil/embung atau tandon air dibangun untuk lebih menjamin ketersediaan air bagi tanaman pangan, khususnya pada MK (Balingtan, 2015). Luas dasar embung 3,8 ha terdiri atas beberapa embung. Total daya tampung air dari embung 108.615 m³.

Berbeda dengan posisi waduk/embung yang diilustrasikan sebelumnya, letak beberapa embung di KP Jakenan lebih rendah dari lahan pertanian, dan ada yang permukaan air embung lebih rendah dari permukaan hamparan lahan pertanian.

Air embung digunakan untuk mengairi petak-petak percobaan secara bergilir yang luasnya <100 m² dengan pompa tekanan rendah. Untuk mengairi tanaman jagung dan sorgum seluas ≥10 ha digunakan pompa tekanan tinggi. Selain itu air embung mampu mencukupi kebutuhan air untuk kantor dan kebutuhan air rumah tangga penghuni rumah dinas di kompleks KP Jakenan.

KP Jakenan, sebagai Tanaman Sains Pertanian menjadi objek agrowisata domestik. Kunjungan murid Sekolah Taman Kanak-kanak, murid SMP/SMA, mahasiswa dan penyuluh serta pejabat daerah adalah momentum untuk mempromosikan pembangunan pertanian ramah lingkungan sebagai salah satu landasan bagi pembangunan ekonomi hijau atau *green economy*.

7.7.5. Rancang bangun embung pada kondisi KP Jakenan

Air di dalam embung 30% berasal dari air hujan langsung dan 70% berasal dari air limpasan, maka perlu daerah tangkapan hujan yang cukup untuk mengisi air dalam embung. Kapasitas tampung air dari embung memperhatikan luas area yang akan diairi dan luas area tangkapan hujan.

Beberapa asumsi untuk perhitungan (Syamsiah dan Fagi. 1997), adalah:

- Air limpasan terjadi pada musim hujan (Oktober-Maret)
- Masa pertanaman padi walik jerami MK 1 dan palawija pada MK II
- Kedalaman embung minimal 1,5 m

Kapasitas tampung air dari embung (ST), sebelum tanaman palawija:

$$ST = (1,5 + TLS - RF) \times CS$$

di mana: 1,5 = kedalaman embung (dalam m), TLS = kehilangan air embung karena perkolasi dan evaporasi (dalam m, pada periode

Oktober-Juni), RF = curah hujan (dalam m, dari Oktober-Juni), CS= luas dasar embung (dalam m²)

Luas daerah tangkapan hujan (CA) untuk mengisi air dalam embung

$$CA = \frac{ST}{RF1} \times RC$$

di mana: RF1 = curah hujan (dalam m, dari Oktober-Maret), RC = koefisien *run-off*

Luas area pertanaman yang akan diairi (A): pertanaman palawija:

$$A = \frac{(ST - LS)}{(CR - RF2)} \times 10^4$$

di mana:

LS = kehilangan air embung (dalam m, dalam 3 bulan dari Juli-September), CR= kebutuhan air tanaman (m³/ha), RF2= curah hujan (dalam m, dari Juli-September)

Untuk memperoleh informasi yang lengkap, pembaca dianjurkan menelaah Petunjuk Umum: Embung, Tandon Air untuk Pertanian Skala Kecil (Balington, 2015).

7.7.6. Kerapatan embung, ukuran dan area tangkapan air hujan

Kerapatan embung adalah jumlah embung dalam suatu hamparan lahan. Kalau manfaat dari embung telah dirasakan oleh petani, maka dapat terjadi bahwa banyak petani yang akan membuat embung, baik yang berupa embung individual atau embung milik bersama (embung korporasi). Sebab itu pembangunan embung dalam suatu hamparan lahan harus ditata agar tidak terjadi konflik antar petani untuk menguasai daerah tangkapan air hujan.

Tabel 17 adalah petunjuk bagaimana menata embung-embung dalam hamparan lahan berdasarkan ukuran embung. Luas daerah

tangkapan air hujan bergantung pada koefisien run off (*run off coefficient*), yaitu persentase air hujan yang tidak masuk ke dalam tanah, maka air hujan mengalir ke bagian lahan yang letaknya lebih rendah; koefisien run off dipengaruhi oleh tekstur tanah, drainase internal dan kemiringan lahan (Lihat Gambar 4). Contoh pemanfaatan air embung adalah untuk mengairi tanaman jagung. Dengan menyiram tanaman jagung pohon per pohon, konsumsi air tanaman jagung varietas unggul di KP Jakenan sekitar 1200 m³/ha/musim. Embung dengan kapasitas tampung air 873 m³ dapat mengairi tanaman jagung seluas 7,4 ha.

Tabel 17. Ukuran embung, luas daerah tangkapan air hujan dan luas tanaman jagung varietas lokal yang dapat diairi dengan teknik penyiraman.

Ukuran embung	Kapasitas tampung m ³	Kebutuhan luas daerah tangkapan hujan (m ²)			Luas lahan terairi (ha) w
		Koefisien limpasan			
		0,85	0,24	0,1	
20	35	30	99	238	0,30
40	70	60	198	476	0,60
60	105	89	298	714	0,89
80	140	119	397	952	1,19
100	175	149	496	1.190	1,49
120	210	179	595	1.429	1,79
140	245	208	694	1.667	2,08
160	279	238	794	1.905	2,38
180	314	268	893	2.143	2,68
200	349	298	992	2.381	2,98
220	384	327	1.091	2.619	3,28
240	419	357	1.190	2.857	3,57
260	454	387	1.290	3.095	3,67
280	489	417	1.389	3.333	4,17
300	524	446	1.488	3.571	4,47
320	559	476	1.587	3.809	4,76

Ukuran embung	Kapasitas tampung m ³	Kebutuhan luas daerah tangkapan hujan (m ²)			Luas lahan terairi (ha)
		Koefisien limpasan			
		0,85	0,24	0,1	
420	734	625	1.984	5.000	6,25
440	769	655	2.083	5.238	6,55
460	803	684	2.182	5.476	6,85
480	838	714	2.361	5.714	7,15
500	873	744	2.480	5.952	7,44

Tanaman yang diairi jagung dan kuaci (umur 50-60 hari) dengan cara disiram dekat akar saja

Sumber: Syamsiah et. al. (1993)

Dengan menggunakan Tabel 17, tata letak dari embung-embung dan kerapatan embung dalam satu hamparan lahan lebih mudah diatur. Langkah-langkah yang perlu ditempuh, adalah:

- 1) Kelompok Tani mengumpulkan petani yang berminat untuk membuat embung dan bentuk *Village Working Group* (VWG),
- 2) VWG memetakan hamparan lahan dan garis konturnya, dan lacak alir air permukaan (*run off water*),
- 3) Bagi-bagi hamparan lahan itu menjadi luasnya disesuaikan dengan ukuran dari masing-masing embung; buat batas-batas tangkapan air hujan tersebut ditandai dengan patok-patok bamboo/kayu),
- 4) Batas-batas tangkapan air hujan disetujui oleh semua petani peminat diketahui oleh VWG dan Kelompok Tani, kemudian disahkan oleh Kepala Desa.

Embung-embung desa (*small farm reservoir*) dengan batas-batas daerah tangkapan air hujan adalah infrastruktur pertanian. Dana desa dapat digunakan untuk membiayai pembangunan embung komunal.

BAB VIII

PENGUKURAN DEBIT AIR PADA SALURAN IRIGASI

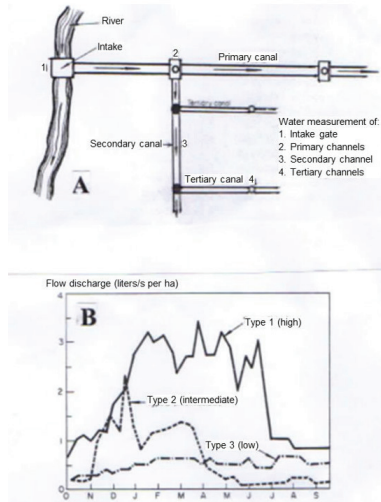
Mengingat tujuan dari pembangunan sistem irigasi baik waduk maupun sungai adalah untuk menyediakan air irigasi dengan jumlah atau volume dan kualitas yang ditentukan pada lahan pertanian di suatu wilayah/daerah irigasi, perhatian khusus harus diberikan kepada pengukuran dan pengawasan air baik di dalam sumber air (waduk/sungai), dan dalam penyalurannya ke lahan irigasi (pengguna air).

Pengawasan yang ketat dan pengukuran aliran air irigasi yang akurat dari sumber air ke jaringan irigasi sampai ke lahan pertanian adalah indikator dari manajemen tataguna air untuk memperoleh obligasi legalistik berkenaan dengan kelayakannya dalam hal: (a) konservasi air, (b) pemerataan pembagian air, dan (c) hubungan yang saling menghormati antara instansi yang berwenang (pemilik air), operator dan pengguna air (petani).

Dalam pengelolaan air sehari-hari harus diketahui penggunaan air harian kaitannya dengan stok air di waduk atau debit air sungai untuk mencegah penggunaan air secara berlebihan dan mencegah praktek penggunaan air yang membahayakan. Saat ini 52 sungai strategis telah tercemar buangan limbah industri, limbah rumah tangga dan sedimen akibat dari erosi (Kompas, 2015).

8.1. Di mana dan Bagaimana Arus Aliran Air Irigasi Diukur

Air irigasi disalurkan ke sawah petani dari sungai atau waduk skala sedang dan besar ke sawah petani melalui jaringan saluran air. Contoh jaringan saluran air diilustrasikan secara sederhana dalam Gambar 23. Kalau sumber irigasi berupa waduk, sungai adalah saluran induk (dibuat secara sengaja), saluran primer adalah saluran sekunder, saluran sekunder adalah saluran tersier dan saluran tersier adalah saluran kuartier. Satuan yang digunakan dalam ukuran arus aliran air adalah liter/detik.



Gambar 23. Contoh jaringan saluran irigasi; sumber air adalah sungai (A); contoh hasil pengukuran debit air sepanjang tahun dari 3 saluran tersier dengan debit air tinggi (*high*), sedang (*intermediate*) dan rendah (*low*) (B).

Sumber: Pasandaran (1978)

Kementerian Pertanian cq Direktorat Jenderal Prasarana dan Sarana Pertanian bertanggung jawab dalam pengelolaan air yang disalurkan ke petak-petak tersier; termasuk pengukuran volume air pada saluran tersier dan saluran kuartier.

Beberapa alat pengukur arus aliran air, adalah: (1) *parshall flumes*, (2) current meter, (3) pintu air atau *weirs* dan (4) rongga pipa terbenam (*submerged orifices*). Untuk tujuan pergiliran air ke petak-petak tersier, yang terbagi menjadi beberapa petak kuarter; dalam uraian berikut hanya pintu air (selanjutnya disebut *weir*), yang dijelaskan.

Pada lahan sawah tadah hujan dengan sumber air adalah curah hujan dan suplesi dari tandon air/embung, pintu air digunakan untuk mengukur debit air. Embung yang terletak di bagian hamparan yang lebih tinggi (Gambar 16, 17, 18, dan 19) airnya disalurkan ke petakan-petakan pada bagian atas, bagian tengah, dan bagian hilir secara bergiliran dan terukur; pengukuran volume air adalah dengan pintu air.

Pompanisasi hanya digunakan untuk menyalurkan air dari embung yang permukaan airnya lebih rendah dari permukaan lahan sawah.

8.2. Pintu Air - *Weir*

Pintu air atau *weir* adalah struktur bangunan pintu air yang telah lama digunakan, paling sederhana dan tepat untuk mengukur aliran air di saluran tersier dan saluran kuarter (*ditches*) (Bureau of Reclamation, 1975).

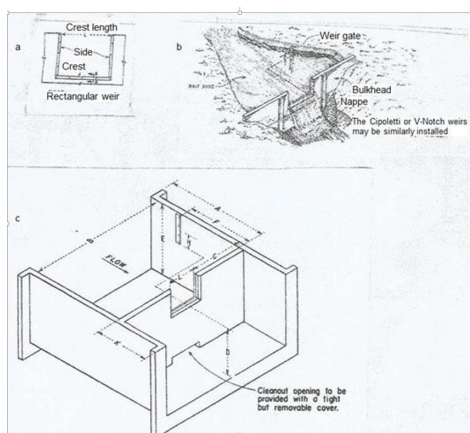
Berdasarkan bukaan pintu, dibedakan 3 bentuk *weir* yaitu *rectangular weir*, *trapezoidal weir* dan *triangular weir*, dsb. Tiga bentuk *weir* ini yang paling banyak digunakan. Penggunaan *weir* paling efektif kalau ada perbedaan ketinggian saluran yang kalau dibendung akan menyebabkan terjunan setinggi 0,5 foot atau 15,2 cm; tetapi kadang digunakan juga walaupun terjunan kurang dari 15,2 cm.

Contoh dari 3 bentuk *weirs*, persyaratan dan perhitungan debit air diuraikan secara singkat berikut ini. Para pihak yang tertarik dapat berkonsultasi dengan otoritas pengairan setempat (kabupaten/propinsi).

Gambar 16, 17, dan 18 ditampilkan untuk menunjukkan bagian-bagian dan operasionalisasi dari pintu air yang digunakan dalam rumus perhitungan debit air.

8.2.1. Rectangular weir

Gambar 24, a, b dan c ditampilkan untuk menunjukkan bagian-bagian dan operasionalisasi dari *rectangular weir* (pintu air rektanguler), yang digunakan dalam rumus perhitungan debit air.



Gambar 24. Penampang vertikal dari *rectangular weir* (a); pemasangan *rectangular weir* pada saluran irigasi (b) dan *rectangular weir* dalam box (c).

Sumber: Bureau of Reclamation (1975)

Beberapa persyaratan dalam pembangunan pintu air rektanguler adalah:

- Untuk penggunaan yang permanen-semi-permanen *rectangular weir* dibuat dari lembar metal anti karat; pinggiran dari dasar pintu (*crest*) dan pinggiran dari pintu harus halus dan agak lancip (ketebalan 1-2 mm),

- Sudut pertemuan antara dasar dan tepi pintu harus tegak lurus (90°).

Perhitungan debit air menggunakan Francis formula berikut:

$$Q = 3,33 H^{3/2} (L - 0,2 H)$$

Formula lain kalau kecepatan arus air sebagai pertimbangan:

$$Q^1 = 3,33 [(H + h)^{3/2} - h^{3/2}] (L - 0,2 H)$$

di mana:

Q = debit air (*second-feet*), tanpa pertimbangan kecepatan arus air
(1 *second feet* = 0,028317 m³/detik)

Q¹ = debit air (*second-feet*), dengan pertimbangan kecepatan arus air

L = lebar pintu *weir* dalam *feet* (1 *feet* = 30,48 cm)

H = tinggi muka air di pintu *weir* dalam *feet*

h = tinggi muka air kalau kecepatan arus air dipertimbangkan,
= $\frac{V^2}{29} = 0,0156V^2$

- Potongan melintang dari saluran air setidaknya 8 kali lebar aliran air di atas dasar pintu air pada jarak 15-20 kali lebar aliran air di atas dasar pintu.
- Aliran air dalam saluran menuju *weir* harus tenang, atau tidak beriak dan bergelombang.
- Aliran air yang melewati dasar pintu harus berupa terjunan air (*nappe*); di balik terjunan air harus ada rongga udara.
- Dasar dari *weir* dibenamkan ke dalam saluran, demikian pula pinggiran lempeng dari *weir* yang dibenamkan ke dalam pinggiran saluran.
- Jarak antara dasar *weir* (pada batas pembedaman ke dalam dasar permukaan saluran) ke dasar pintu tidak kurang dari 2 kali tinggi permukaan air di atas dasar pintu; demikian pula jarak antara tepian *weir* (pertemuan antara tepi *weir* dengan tepi saluran).

Kode-kode dalam formula lihat Gambar 24c.

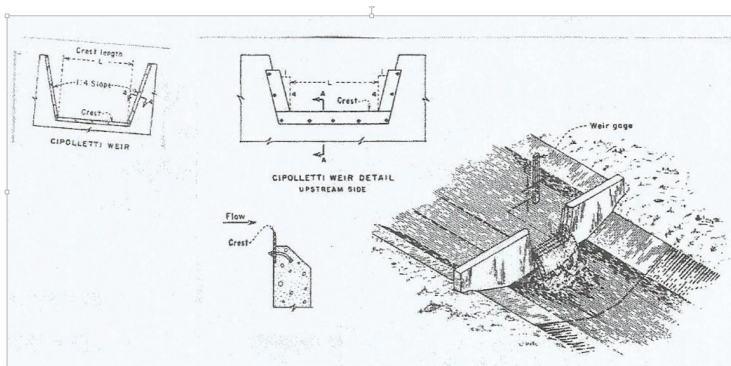
Hasil perhitungan komponen dari formula dapat dilihat dalam Lampiran 4.

Rectangular weir tidak akurat digunakan kalau tinggi muka air (H) kurang dari 0,2 foot atau 6,1 cm karena terjunan air yang keluar dari pintu (nappe) tidak melengkung sempurna, tetapi menetes.

8.2.2. Trapezoidal weir

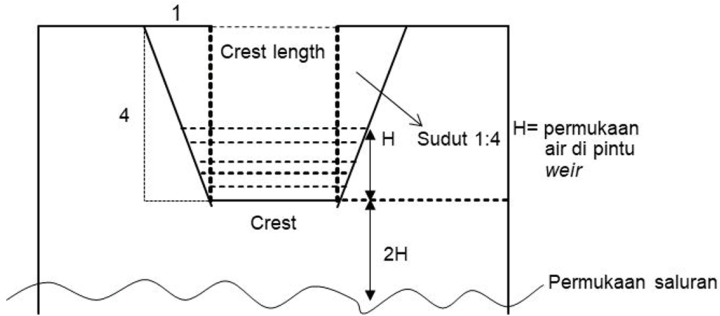
Trapezoidal weir disebut juga *Cipoletti weir* yang bentuknya seperti dalam Gambar 25, pemasangannya di saluran air ditunjukkan dalam Gambar 25b. Ada beberapa persyaratan kalau trapezoidal weir ini akan digunakan, yaitu:

- Sisi dari pintu melebar di atas dan membentuk sudut dari perbandingan horizontal dan vertikal 1:4 (Gambar 26)
- Weirs ini tidak dapat digunakan kalau tinggi muka air di pintu weir (H) kurang dari 0,2 foot atau 6,1 cm; pengukuran tidak akurat kalau terjunan air tidak membentuk lengkungan yang sempurna.



Gambar 25. Contoh bentuk dari *trapezoidal weir* dan pemasangannya secara permanen pada saluran air.

Sumber: Bureau of Reclamation (1975)



Gambar 26. Ilustrasi konstruksi dari *trapezoidal weir* (*Cipoletti weir*).

Sumber: *Bureau of Reclamation (1995; dimodifikasi)*

Formula Cipoletti (koefisien dari Francis formula dinaikkan 1%) tanpa pertimbangan terhadap kecepatan arus aliran air, adalah:

$$Q = 3,367 L H^{3/2}$$

Kalau kecepatan arus aliran air digunakan, maka formula menjadi:

$$Q^1 = 3,367 L (H+1,5h)^{3/2}$$

di mana:

Q^1 = debit air dalam *second feet* ($1 \text{ second feet} = 0,028317 \text{ m}^3/\text{detik}$)

L = panjang dari pintu dalam *feet* ($1 \text{ feet} = 0,3048 \text{ m}$)

H = tinggi muka air di atas dasar pintu dalam *feet*

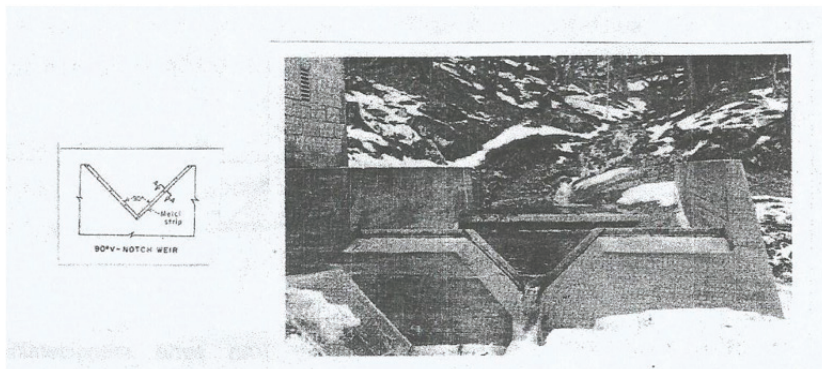
h = tinggi muka air dengan mempertimbangkan kecepatan arus, $= \frac{V^2}{29} = 0,0156V^2$; $V = \frac{Q}{A}$ dimana V = kecepatan aliran arus air dalam *feet persecond*; Q = debit air dalam *second feet*; A = luas area dari penampang lurus saluran yang dipenuhi aliran air atau luas genangan air pada daerah sekitar pintu air (*weir*).

Ketelitian pengukuran arus aliran air dengan menggunakan formula tersebut kurang dibanding dengan hasil pengukuran dari *rectangular* dan *90°V-notch weirs*. Namun demikian *Cipoletti weir* masih dapat digunakan.

Persyaratan lain dari penggunaan *Cipoletti weir* sama dengan *rectangular weir*.

8.2.3. 90° V-notch weir

Pintu pengukur debit air berbentuk *90° V-notch weir* seperti ditunjukkan dalam Gambar 27 adalah alat pengukur yang paling baik/tepat bagi debit air yang rendah (kecil) kurang dari 1 second-foot atau kurang dari $0,02831 \text{ m}^3/\text{detik} = 28,31 \text{ l/det}$; alat ini seakurat dua alat sebelumnya dalam mengukur debit air pada kisaran 1-10 second feet atau $0,02831 - 0,2831 \text{ m}^3/\text{det}$.



Gambar 27. Skema bentuk dari *90° V-notch weir* (a), dan operasionalisasinya di lapang; struktur bangunan permanen.

Sumber: Bureau of Reclamation (1975)

Dua formula digunakan untuk menghitung debit air dengan *90° V-notch weir*, yaitu: Cone formula dan Thomson formula. Tetapi,

otoritas pengairan di Amerika Serikat menganggap Cone formula yang lebih wajar untuk digunakan.

$$Q = 2,49 H^{2,48}$$

di mana:

Q = debit air masuk pintu dalam *second feet* ($1 \text{ second feet} = 0,028317 \text{ m}^3/\text{detik}$)

H = tinggi muka air masuk di atas dasar dari pintu air dalam *feet* ($1 \text{ feet} = 30,48 \text{ cm}$)

Biasanya *V-notch weirs* tidak terpengaruh oleh kecepatan arus aliran air, kalau konstruksinya benar.

8.3. Perawatan Weirs

- Weirs dan bagian genangan air di sekitar *weirs (weir pond)* harus bersih dari gulma dan sampah; weir pond harus tidak ada sedimentasi lumpur/tanah
- Kedalaman dasar dari saluran di sekitar *weir* harus dipertahankan agar kedalaman dari dasar pintu (*crest*) ke permukaan saluran konsisten dua kali tinggi air masuk ke *crest*.
- Posisi *crest* harus selalu datar, maka harus selalu diamati secara periodik; dasar yang digunakan adalah pengukuran dari angka 0 (*zero*) dari meteran pengukur ketinggian air (*gage*).
- Cegah jangan sampai ada kebocoran melalui pertautan dari lempengan pintu dengan tebing dari saluran air; bagian yang bocor harus segera ditutup.
- Harus dijaga agar posisi dari seluruh unit pintu air tidak bergeser dari posisi awal dan hindari kebocoran air dari retakan-retakan.

8.4. Pompanisasi dan Pipanisasi

8.4.1. Aspek non-teknik

Dalam Bab VII telah diuraikan aspek teknik dari pompanisasi secara garis besar. Bab VIII ini menguraikan tentang aspek non tekniknya.

Untuk mengangkat air dari sumber air (sungai, waduk/tandon air) yang permukaan airnya lebih rendah dari permukaan hamparan lahan pertanian perlu pompanisasi yang digerakkan dengan mesin pompa atau arus listrik. Selanjutnya air disalurkan ke petakan pertanian melalui pipa di bawah tanah atau melalui saluran air terbuka lapis tanah atau ditembok. Maka, operasionalisasi dalam penyaluran air sama dengan sistem penyaluran secara gravitasi yang lain.

Elemen pembiayaan pompanisasi berbeda dengan sistem penyaluran secara gravitasi yang lain. Aspek ekonomi berkenaan dengan energi penggerak pompa harus diperhitungkan dengan volume air yang masuk ke petakan-petakan pertanian dan penggunaannya dalam sistem usahatani dan komponen teknologi budidayanya.

Penyaluran air yang dipompakan ke petakan pertanaman berdasarkan permintaan harus diatur secara bergilir kalau kapasitas penyaluran dari pipa atau saluran sangat terbatas. Persyaratan yang perlu perhatian, adalah:

- Kapasitas dari gardu pompa disesuaikan dengan total volume air yang diperlukan dalam petakan-petakan rotasi,
- Perlu pengawasan dan supervisi yang ketat terhadap penyaluran air agar penggunaan air tidak berlebihan, untuk mencegah kelebihan.
- Pompa yang digerakkan dengan arus listrik supaya dilengkapi dengan perlengkapan protektif, terutama untuk mengantisipasi turunnya voltase.

8.4.2. Pompanisasi kapasitas rendah

Pompanisasi cara ini dipraktekkan di KP Jakenan untuk menyalurkan air ke petakan-petakan percobaan. Air dari embung/ tandon air dipompakan ke petakan percobaan secara bergilir untuk mengairi tanaman padi dan palawija yang kebutuhan airnya berbeda.

Air yang keluar dari pipa plastik yang posisinya bebas dipegang oleh teknisi dan mengarahkan air ke petak-petak percobaan; debit air dari pipa plastik; dikalibrasi dalam satuan m³/detik atau liter/detik.

8.4.3. Pompanisasi kapasitas tinggi

Pompanisasi air sungai atau waduk skala sedang dilengkapi dengan saluran gravitasi (*gravity channel*) yang ditembok; elevasi saluran bisa lebih tinggi atau lebih rendah dari lahan pertanian. Kalau hamparan pertaniannya luas dengan ketinggian bervariasi, dibangun unit-unit gardu pompa pada interval jarak tertentu. Kekuatan arus air diatur agar tercapai tekanan *sprinkler*. Selain itu dibangun kolam kecil sebelum air masuk ke gardu pompa untuk pengendapan lumpur (*desilting ponds*) dan untuk penyaringan sampah agar tidak mengganggu pompa.

Unit-unit gardu pompa dibangun juga dengan kekuatan lebih rendah pada interval jarak tertentu; kekuatan arus air diatur agar tekanan kuat irigasi *sprinkler* untuk memfasilitasi distribusi air ke hamparan yang lebih sempit.

Di KP Jakenan telah dipasang pompanisasi air embung kapasitas tinggi untuk mengairi tanaman jagung dan sorghum pada MK dengan big-gun. Big-gun ini berfungsi sebagai sprinkler yang pancarannya mencapai sekitar 20 m. Air dipompakan ke lahan pertanian dengan big-gun melalui jaringan pipa PVC. Pada interval tertentu pipa PVC dibuka dan disambung ke pipa *big-gun*

lain agar pancaran air terbagi rata ke seluruh petakan pertanaman jagung dan sorghum seluas sekitar 10 ha.

8.4.4. Bahan Pipa

Saluran bertembok mulai diganti dengan pipa. Popularitas pipanisasi meningkat setelah adanya jenis pipa yang kuat tetapi lebih murah seperti *veny-clad* aluminium dan PVC.

8.5. Satuan-satuan Pengukuran Standar Internasional dan Nasional

Dalam literatur internasional satuan-satuan dari komponen formula perhitungan debit air diekspresikan dalam *British Units*. Sementara, di negara-negara di Asia Tenggara, termasuk Indonesia, yang digunakan adalah *metric units*.

Untuk memudahkan konversi satuan dari *British units* ke *metric units*, tabel-tabel dalam lampiran memandunya.

Lampiran 1 : faktor konversi dari ukuran panjang (*length*), luas permukaan (*surface*) dan isi (*volume*).

Lampiran 2 : faktor konversi hidrolika dari unit pengukuran British ke metric untuk panjang, luas, volume, massa/berat (*mass*), percepatan (*acceleration*), berat jenis (*mass/volume*), kecepatan (*velocity*), arus (*flow*), tenaga (*power*).

Lampiran 3 : debit air yang dialirkan lewat pintu air tergantung dimensi dari *weirs* (a) *rectangular* dan *cipolette weir*, dan (b) panjang dasar pintu (*weirs*) atau kapasitas *weirs* (dalam *second-feet*).

Lampiran 4 : debit air yang keluar dari pintu air pada *rectangular weirs* berdasarkan tinggi air masuk ke dalam pintu air (*head*) dan panjang pintu (*length of weirs*) dihitung dengan formula Francis.

- Lampiran 5 : debit air yang keluar dari pintu air pada Cipoletti weirs (dalam *second-feet*) berdasarkan tinggi air masuk ke mulut pintu dan panjang dasar pintu.
- Lampiran 6 : debit air yang keluar dari pintu air pada $90^\circ V$ -notch weir (dalam *second-feet*) berdasarkan tinggi air masuk ke mulut pintu air.
- Lampiran 7 : terjemahan

BAB IX

ORGANISASI PENGELOLAAN AIR DI TINGKAT LAPANG

Dua macam pengambilan keputusan dalam pengelolaan air irigasi di tingkat lapang atau tingkat usahatani, yaitu perencanaan (*planning*) dan pelaksanaan (*operation*). Aspek dari perencanaan dan pelaksanaan:

- Perencanaan~potensi ketersediaan air irigasi diestimasi (dari rumus kebutuhan air irigasi) berdasarkan pola tanam berbasis padi untuk mengoptimalkan penggunaan air irigasi.
- Pelaksanaan~berkenaan dengan alokasi dan distribusi air irigasi ke lahan pertanian yang telah ditanami, keputusan distribusi dan alokasi kritis kalau ketersediaan air terbatas.

Perencanaan dan pelaksanaan lebih realistis diperhitungkan dengan konsep pasten atau *pasten concept*.

9.1. Konsep Pasten

Konsep pasten dikemukakan secara lebih rinci berdasarkan pengalaman di Proyek Pekalen Sampean, sistem irigasi Begalsari,

Pasten diduga berasal dari bahasa Jawa yang artinya adalah pembagian air secara merata yang dialirkan melalui saluran irigasi

Bondowoso-Jawa Timur (Pasandaran, 1978). Jadi, konsep pasten menyangkut hubungan antara penyediaan air irigasi melalui saluran irigasi, yang diukur di pintu-pintu air (*supply*) dan kebutuhan air tanaman pada pola tanam berbasis padi (*demand*). Rumus tentang RWS menunjukkan distribusi/alokasi air irigasi secara umum.

Pasten diduga berasal dari bahasa Jawa yang artinya adalah pembagian air secara merata yang dialirkan melalui saluran irigasi

Kebutuhan air irigasi tanaman secara lebih rinci dihitung dengan rumus *Relative Irrigation Requirement* (RIR) (Pasandaran, 1978).

$$P = \frac{Q}{A}$$

di mana: P = indeks pasten, Q = laju aliran air (liter/detik; data diambil dari kurva penyaluran air atau *discharge flow curve* yang sifatnya fluktuatif) dan A = luas area pertanian yang diairi (dalam ha)

Dengan menggunakan RIR, formula pasten menjadi lebih detail

$$P = \frac{Q}{RIR(A)} = \frac{Q}{RIR_i A_i}$$

di mana, i adalah jenis tanaman. RIR mengasumsikan bahwa petakan pertanian diberi air irigasi penuh sesuai kebutuhan; pada pertanian padi sawah, petakan pertanian padi digenangi sepanjang pertumbuhannya. Proyek Pekalen Sampean mengestimasi indeks RIR pada berbagai fase pertumbuhan tanaman padi, tebu dan tanaman palawija (Tabel 18). Beberapa asumsi digunakan untuk menghasilkan data dalam Tabel 18, adalah:

- Pesemaian walaupun tidak luas, tetapi letaknya tersebar dan selama pembuatannya limpasan air permukaan (*seepage*) dan limpasan air vertikal atau perkolasi (*percolation*) sangat besar.
- Pengolahan tanah memanfaatkan *seepage* dan *percolation* saat pembuatan persemaian; setelah persemaian padi terujud,

hujan mulai turun, maka nilai indeks RIR pengolahan tanah sekitar sepertiga dari nilai indeks RIR persemaian.

- Indeks RIR pertumbuhan tanaman padi hanya seperlima indeks RIR persemaian, karena tanah telah melumpur dan basah akibat dari pengolahan tanah dan air hujan.
- Tebu dan palawija (jagung, kedelai) paling rendah nilai indeks RIR-nya, karena tanaman ini menggunakan sisa air tanah (*residual moisture*) dan sisa air hujan.

Tabel 18. Kebutuhan air tanaman relatif (RIR) dari tanaman padi, tebu, dan palawija, Proyek Irigasi Pekalen Sampean, 1973-1974.

Jenis tanaman	Indeks RIR
Padi sawah	
- persemaian	20,0
- pengolahan tanah	6,0
- pertumbuhan	4,0
Tebu	1,5
Palawija	1,0
Pertanaman padi liar (di luar pola tanam resmi)	1,0

Sumber: Pasandaran (1978)

Catatan: Kebutuhan air irigasi menggunakan satuan liter/detik/ha

Dengan menggunakan nilai indeks RIR dalam Tabel 4 rumus perhitungan kebutuhan air irigasi dari pola tanam berbasis padi (diawali oleh pertanaman palawija dan tebu) pada MK, memasuki pertanaman padi sawah pada MH, formula pasten menjadi lebih detail:

$$P = \frac{Q}{1,0A_{pl} + 1,5A_t + 20,0A_{ps} + 6,0A_{pt} + 4,0A_{pr} + 1,0A_{lr}}$$

di mana:

P = indeks pasten

Q = laju aliran air dalam saluran air (dalam liter/detik)

A_{pl} = luas area pertanaman palawija (MK)

A_t = luas area pertanaman tebu (MK)

A_{ps} = luas area persemaian padi sawah (MH)

A_{pt} = luas area pengolahan tanah untuk padi sawah (MH)

A_{pr} = luas pertanaman padi setelah tanam pindah (*transplanting*)

A_{lr} = luas pertanaman padi liar (tidak tercantum dalam pola tanam berbasis padi yang resmi)

Indeks pasten adalah cara memperhitungkan distribusi dan alokasi air irigasi yang tepat jenis, tepat volume, dan tepat waktu agar air irigasi digunakan secara lebih efektif dan efisien, pada kondisi penyediaan air cukup, sehingga lahan pertanaman padi sawah selalu tergenang air. Pada saat itu (tahun 1970-an, dst), tinggi genangan air yang dianggap kecukupan air adalah 5 cm.

Pengertian kecukupan air berubah setelah definisi *stress day* berganti dari semula seperti yang dimaksud oleh Tabbal dan Wickham (1978).

Stress day (definisi awal)

Jumlah hari rata-rata per minggu di mana petakan pertanaman padi sawah tidak tergenang oleh air.

Dengan berpedoman kepada definisi *stress day* yang baru Fagi dan Sanusi (1983) membuktikan melalui penelitian bahwa tanaman padi sawah pada petakan yang tidak digenangi air selama 4-5 hari setelah genangan air macak-macak tidak menurunkan hasil gabah, bahkan meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk nitrogen dan urea (Fagi dan Manwan, 1992). Jadi kecukupan air dengan indikator genangan ± 5 cm berubah menjadi genangan air macak-macak.

Kesimpulan:

- Konsep pasten dapat diterapkan pada teknik irigasi bergilir
- Penyaluran air pada gilirannya adalah petakan sawah basah sampai petakan pertanaman pada kondisi genangan macak-macak (genangan air macak-macak berarti tanah telah jenuh air, karena pori-pori tanah telah tertutup oleh air)

9.2. Harmonisasi Kelompok Tani dan P3A

Dua organisasi petani pada tingkat lapang yang kegiatannya perlu diharmonisasikan sehubungan dengan penerapan irigasi bergilir. Tugas pokok dan fungsi dari dua organisasi petani yaitu Poktan dan P3A ditunjukkan dalam Tabel 19.

Tabel 19. Pembagian tugas antara Poktan dan P3A pada hamparan padi yang menerapkan irigasi bergilir.

Organisasi petani	Deskripsi tugas
Poktan (tanggung jawab organisasi vertikal di bidang pertanian ~Dinas Pertanian/ Bapelluh)	<ul style="list-style-type: none">- meningkatkan keterampilan dan pengetahuan teknik budidaya tanaman- mengorganisasikan dan memfasilitasi penerapan teknik budidaya pertanian intensif- memfasilitasi komunikasi dan dialog dengan PPL dan PPS
P3A(tanggung jawab organisasi vertikal di bidang tataguna air irigasi ~Dinas Pengairan)	<ul style="list-style-type: none">- terlibat dalam mengidentifikasi petak rotasi atau gabungan petak-petak rotasi- mengatur dan memfasilitasi penerapan irigasi bergilir- mewakili petani dalam dialog atau berkomunikasi dengan otoritas pengairan

Sumber: Fagi (2013)

Perencanaan potensi ketersediaan air untuk irigasi pertanian dan alokasi air irigasi yang didistribusikan dari sumber (sungai atau waduk/embung) dan pelaksanaan alokasi air ke lahan pertanian dengan berpedoman pada konsep pasten tidak mungkin ditangani oleh Poktan yang telah sibuk menata teknik budidaya tanaman intensif. Langkah-langkah yang perlu diambil diuraikan oleh Fagi (2013), yaitu:

Langkah 1

- Revitalisasi P3A; 'ulu-ulu banyo (perangkat desa untuk mengawasi pembagian air irigasi)' dan anggota Poktan dimasukkan dalam Tim Penerapan Irigasi Bergilir.
- Peningkatan pengetahuan Tim tentang teknologi PTT (Pengelolaan Tanaman Terpadu), pengelolaan air irigasi maju melalui Sekolah Lapang Tataguna Air Irigasi.
- Insentif perlu diberikan sebagai bagian yang tak terpisahkan dari Peraturan Presiden (Perpres) No. 61/2011 tentang peningkatan produksi padi dengan emisi GRK melalui antara lain perbaikan infrastruktur irigasi yang mencakup lahan sawah 1,34 juta ha dan pemeliharaan jaringan irigasi pada lahan sawah seluas 2,32 juta ha.

Langkah 2

- Organisasi vertikal Tim supaya dibentuk juga yang meliputi selain petak tersier, juga petak sekunder sampai seluruh sistem irigasi.
- Anggota Tim pada petak tersier (representasi dari Poktan) menjadi anggota Tim petak sekunder, dst.

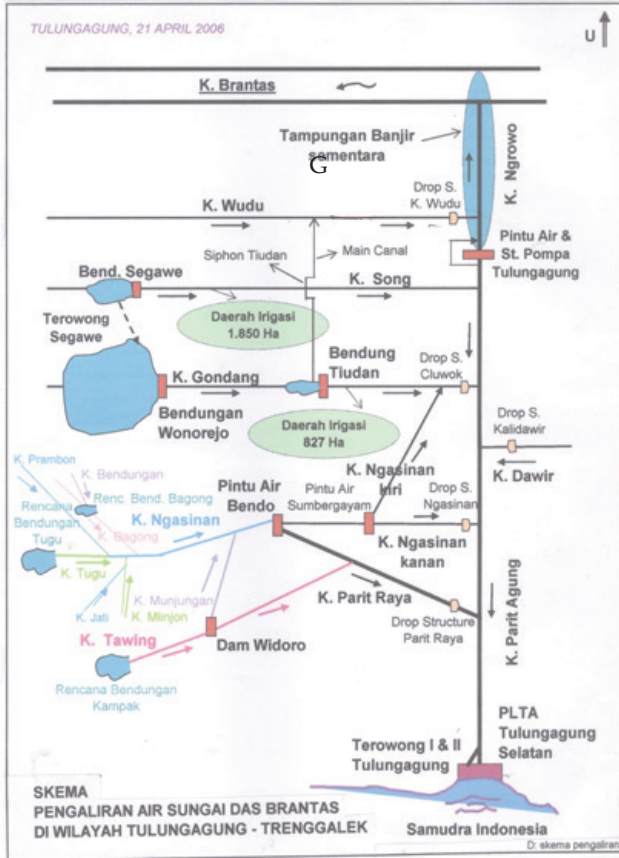
- Seluruh Tim berkesempatan untuk berkomunikasi/berinteraksi dengan otoritas irigasi.

Langkah 3

- Pelatihan, sarasehan dan saling berkunjung antar lapang (petak tersier, petak sekunder, dst) supaya diupayakan untuk saling bertukar pengalaman.
- Disarankan adanya dialog internasional dengan negara-negara yang telah berhasil menerapkan sistem irigasi maju (modern), seperti Taiwan, Korea Selatan dan Jepang.

Begitu rumitnya jaringan irigasi, seperti contoh skema pengaliran air sungai DAS Brantas di wilayah Tulungagung-Trenggalek (Gambar 28), maka organisasi pengelolaan air perlu dipertimbangkan secara serius agar irigasi bergilir terlaksana.

Peta wilayah irigasi (Gambar 28) dibagi-bagi menjadi daerah irigasi sekunder yang didalamnya terdiri atas petak tersier dan petak kuarter. Pada MK, ada atau tidak ada El Nino debit air yang masuk ke petak tersier diukur. Autoritas irigasi disana mempunyai data kebutuhan air irigasi pertanaman padi sawah. Kemudian hitung nilai K-nya. Gunakan Tabel 5 untuk menentukan pada petakan mana sekunder, tersier atau kuarter pergiliran air itu akan diterapkan. Petakan yang akan menerima air irigasi secara rotasi dibagi menjadi 5 atau 9 blok rotasi bergantung kecepatan aliran air. Air irigasi diberikan pada hari ke-6 atau 10 dihitung sejak irigasi di stop dan disalurkan ke blok rotasi lainnya. Penjelasan ini perlu dikaji pada kondisi aktual di lapang yang kompleks (*ekperimentasi*).



Gambar 28. Contoh jaringan irigasi di wilayah irigasi Tulungagung-Trenggalek, pengaliran air DAS Brantas.

9.3. Partisipasi Petani dalam Pengelolaan Air Irigasi di Tingkat Usahatani

Operasi dan pemeliharaan (O & P) jaringan irigasi memerlukan dana yang sangat besar. Akibat dari keterbatasan anggaran Pemerintah untuk O & P jaringan irigasi, pada 2003 kualitas pelayanan dan pendistribusian air ke sawah petani hanya

memenuhi 60% dari fungsi operasionalnya (Balitbang Kimpraswil, 2003). Bahkan kondisinya pada 2008 lebih buruk (Pawitan et. al. , 2008). Maka, balitbang Kimpraswil menyelenggarakan diskusi pada Juli 2003 dengan tema Penyertaan masyarakat dalam Pembiayaan dan Pengelolaan Irigasi. Tujuan dari diskusi tersebut adalah untuk mewujudkan Inpres No. 3/1999 dan PP No. 77/2001. Inti dari pembaruan kebijakan pengelolaan irigasi (PKPI) adalah bahwa O&P yang meliputi lahan sawah irigasi seluas 500-1000 ha diserahkan kepada petani (Arif, 2003). Dalam diskusi perhatian difokuskan ke aspek teknik pengelolaan irigasi dan penunjangnya, yaitu sumber pendanaan dan mekanisme pembiayaan O&P, serta aspek kelembagaan pengelolaan irigasi (organisasi, kapasitas SDM dan peraturan perundang-undangan). Aspek ekonomi dan yang berkaitan dengan itu tampaknya belum dikuasai oleh peserta diskusi.

Penulis mereview hasil studi dari Pradhan dan Pingali (1994) pada sistem irigasi Khageri dan Pithuwa di dataran Tarai Chitwan (Nepal). Kesimpulan dari studi tersebut, adalah: (1) walaupun penanganan O&P oleh petani adalah strategi yang tepat, tetapi penerapannya tidak dapat berlangsung lama kalau semua biaya diperhitungkan, dan sensitif terhadap perubahan kebijakan ekonomi pemerintah, (2) perbaikan pengelolaan system irigasi harus diupayakan secara bersamaan dengan pengelolaan system produksi. Dari kesimpulan hasil studi ini, tampak bahwa perlu sinkronisasi dan harmonisasi kegiatan Poktan dan P3A.

BAB X

PENGEMBANGAN LAHAN DAN PENCETAKAN SAWAH IRIGASI BARU

Luas lahan sawah produktif semakin berkurang akibat dari pembangunan jalan baru, perluasan perkotaan, kawasan perumahan dan industri. Data yang tepat tentang pengurangan luas lahan sawah itu belum ada, karena perbedaan pernyataan dari berbagai sektor dan waktu atau tahun kapan pernyataan itu diucapkan. Kegiatan pembangunan non-pertanian memang sangat dinamis dan berubah dari tahun ke tahun. Sementara itu masih cukup luas lahan yang dapat dikonversi menjadi lahan sawah irigasi. Upaya itu dipersiapkan oleh Pemerintah dengan membangun 62 bendungan baru.

Bab ini ditulis dengan mengacu kepada pengembangan dan pencetakan lahan kering bergelombang menjadi sawah irigasi Kebun Percobaan (KP) Sukamandi, Balai Besar Penelitian Tanaman Padi (BB Padi) yang terletak antara desa Patok Beusi dan desa Sukamandi, Kecamatan Ciasem, Subang, Jaa Barat (IRRI, 1984).

Tujuan dari penulisan bab ini, adalah:

- (1) Membantu perencanaan pengembangan dan pencetakan sawah baru sejalan dengan pembangunan bendungan baru.

- (2) Menunjukkan metode pengembangan dan pencetakan sawah baru secara profesional dan bebas dari rekayasa yang merugikan negara.
- (3) Memanfaatkan KP Sukamandi sebagai area bagi peneliti dalam menghasilkan teknologi budidaya padi yang digunakan dalam program intensifikasi produksi padi (BIMAS, OPSUS, INSUS, SUPRA INSUS, dan P2BN).

Swasembada beras pada 1984 dan 2009 tercapai penggunaan teknologi budidaya padi yang antara lain dihasilkan oleh BB-Padi. Cukup luas pembukaan dan pengembangannya yang diikuti oleh pencetakannya menjadi sawah irigasi baru, terutama di luar Jawa, yang gagal (Tabel 20).

Tabel 20. Neraca lahan sawah irigasi periode 1981-1999.

Wilayah	Alih fungsi (ha)	Pencetakan baru (ha)	Selisih (ha)
Jawa	1.002.053	518.224	483.831
Luar Jawa	625.459	2.702.939	2.077.480
Indonesia	1.627.514	3.221.163	1.593.649

Sumber: Fagi (2007)

Sampai tahun 1999 pencetakan sawah baru dan alih fungsinya berlangsung bersamaan. Secara agregat pencetakan sawah baru justru menambah luas lahan sawah sekitar 1,6 juta ha. Lahan sawah bukaan baru tidak dimanfaatkan karena tanahnya bereaksi masam dan tidak subur, lokasi terpencil, atau konstruksi bangunan irigasinya tidak tepat. Contoh sawah bukaan baru yang terlantar berupa foto ditunjukkan oleh Fagi *et. al.* (1993) di Sulawesi Tengah.

Untuk tidak mengulangi kegagalan pembukaan, pengembangan dan pencetakan sawah penulis menguraikan pengalaman pengembangan dan pencetakan sawah baru yang diresmikan

menjadi KP Sukamandi. Presiden Suharto meresmikan Balai Penelitian Tanaman Pangan Sukamandi (Balittan Sukamandi) pada 10 Agustus 1982.

10.1. Kronologi Kegiatan Pengembangan dan Pencetakan Lahan Sawah Irigasi KP Sukamandi

Pengembangan lahan (*land development*) dan pencetakannya menjadi sawah membutuhkan keahlian bidang teknik sipil basah. Tetapi sering terjadi salah pengertian antara pengembangan lahan dan perataan lahan. Pengertian itu diklarifikasi sebagai berikut (IRRI, 1984) yaitu:

- Pengembangan lahan: pekerjaan pada watu bidang lahan untuk memperbaiki atau mengubah kondisi fisik; pekerjaan ini meliputi survei lahan, pemetaan lahan, perataan lahan, pembangunan saluran drainase dan jaringan irigasi, dan kontruksi jalan.
- Perataan lahan: bagian dari kegiatan pengembangan lahan dan pencetakan lahan menjadi sawah.

10.1.1. Survei lokasi sasaran pengembangan lahan

Survei dilaksanakan oleh dua tim. Tim pertama membuat gambaran umum dari lahan sasaran. Data penting yang harus diketahui adalah status hukum dari lahan: milik negara atau milik warga (hak ulayat), ada tidaknya sengketa lahan, kondisi umum pertanian/perkebunan di sekitar lahan, akses jalan dan akses ke sumber air untuk irigasi, tingkat kesuburan tanah, dan iklim (curah hujan dan intensitas/distribusi hujan, serta aspek kependudukan).

10.1.2. Survei mendetail

Setelah pengetahuan dasar dari lokasi diketahui, survei mendetail dilaksanakan. Data dikumpulkan untuk membuat:

- Photomosaik skala 1: 15.000 dari fotografi skala vertikal 1 9000 (penborong Techdata, Ltd, Bangkok (Thailand)).
- Photomosaik ini digunakan untuk membuat peta topografi skala 1:2.000 dengan garis kontur 0,5 m, kemudian peta topografi dipersempit menjadi skala 1:1000 dengan garis kontur 0,25 m (PT. Geodata).
- Peta topografi direvisi menjadi skala 1:2500, 1: 5000 dan 1: 10.000 dengan garis kontur digambar pada interval 1:1,10 m (mulai agak datar).

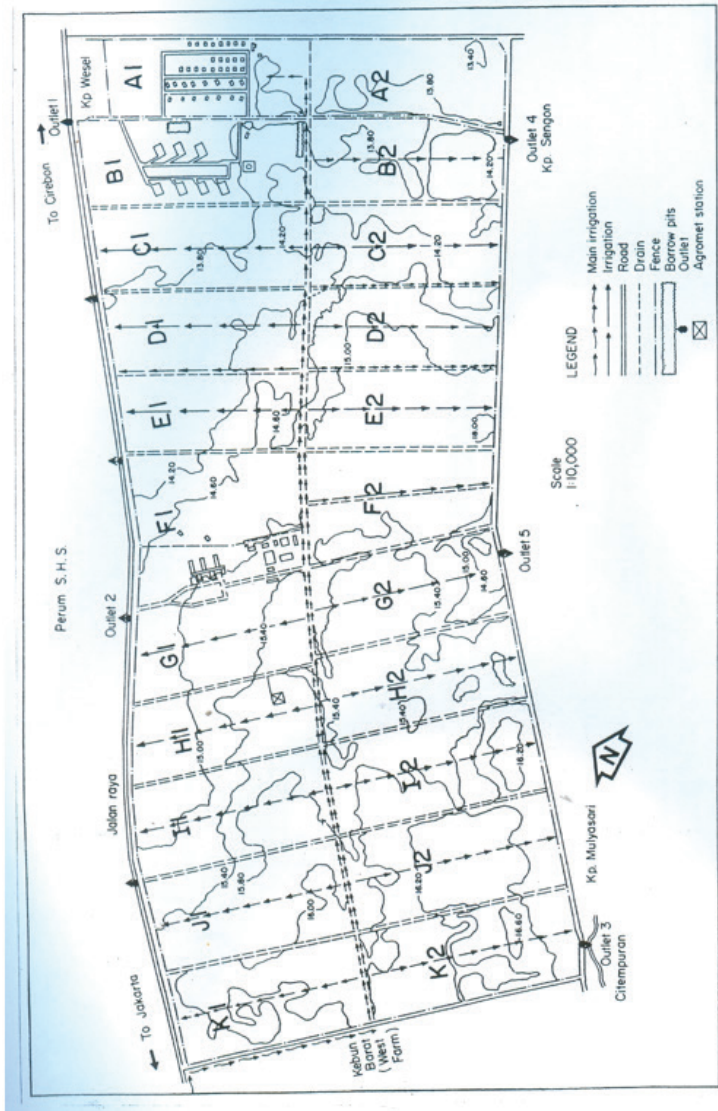
Peta topografi ini digunakan untuk mendata hamparan lahan, ditandai dengan memasang patok-patok yang posisinya terukur.

10.1.3. Tata letak petakan-petakan sawah

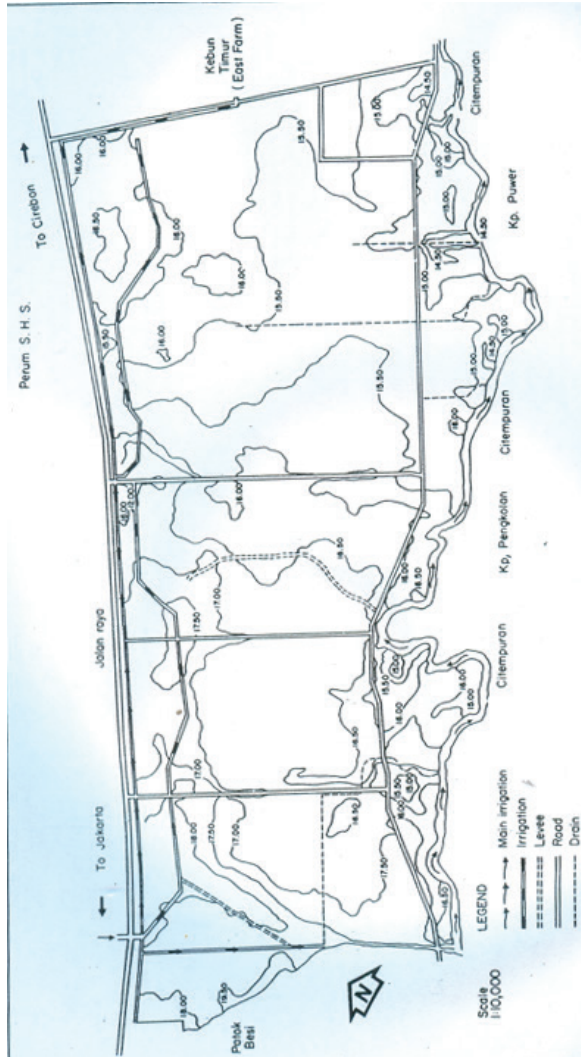
Perataan tanah per petakan dikerjakan menggunakan atau berpedoman pada garis kontur. Lahan sawah KP Sukamandi dikelompokkan menjadi kebun timur dan kebun barat. Kebun timur terletak disebelah timur tanggul besar. Komplek perkantoran dan perumahan terletak di kebun timur (Gambar 29). Hamparan sawah yang dicetak dibagi-bagi menjadi beberapa blok (luas \pm 0,5 ha) dengan saluran irigasi yang ditata sedemikian rupa untuk digunakan sebagai petakan-petakan penelitian (Gambar 29).

Kebun barat berbatasan dengan desa Patok Beusi dan sungai Citempunan. Hamparan tidak dibagi-bagi menjadi blok-blok 5 ha (Gambar 30). Perbedaan ketinggian garis kontur makin sempit mendekati sungai Citempunan (Gambar 30). Sawah seluas 80 ha diserahkan kepada Balai Penelitian Ikan Air Tawar (Balitkanwar) yang sekarang bernaung di bawah Kementerian Kelautan dan Perikanan.

Haparan sawah di kebun barat tidak dipatok-patok teratur seperti di kebun timur. Galengan yang memisahkan petakan-petakan sawah mengikuti garis kontur. Garis-garis lurus dalam Gambar 29 adalah saluran air dan drainase.



Gambar 29. Hasil pengembangan lahan, pencetakan dan perataan lahan menjadi blok-blok sawah irigasi di KP Sukamandi, Balittan Sukamandi (Kebun Timur).

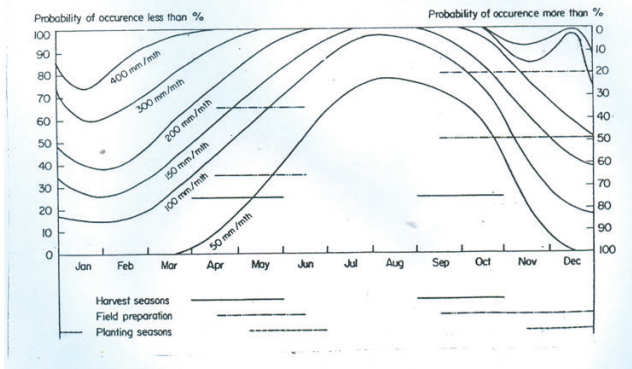


Gambar 30. Hasil Pengembangan lahan, pencetakan dan perataan lahan menjadi blok-blok sawah irigasi dari KP Sukamandi (Kebun Barat), sebagian blok (± 80 ha) ke arah desa Patok Beusi diserahkan kepada Balai Penelitian Ikan Air Tawar.

Sumber: IRRI (1984)

10.1.4. Drainase

Jenis tanah KP Sukamandi tergolong podzolik, lengkapnya adalah Isothermie Aquic Tropaquults. Kandungan liat 1:1 atau Al/Si = 1 yaitu kaolinit atau amorfus dominan. Di luar kebun timur petani menggunakan tanah ini untuk bahan baku batu bata/genteng. Laju perkolasi air sangat lambat (1,0-2,0 mm/hari), maka drainase permukaan diutamakan. Drainase permukaan perlu karena peluang kejadian hujan dengan intensitas tinggi pada saat pengolahan tanah, pertumbuhan dan menjelang panen (Gambar 31). Curah hujan tinggi pada pengolahan tanah pada bulan Oktober, Nopember, Desember diikuti penanaman akan menyebabkan petakan sawah tergenang air cukup dalam yang menyulitkan proses pelumpuran dan tanam pindah. Genangan air yang berlebihan harus dikurangi dengan drainase permukaan.



Gambar 31. Kurva peluang berbagai intensitas curah hujan di KP Sukamandi, BB-Padi.

Sumber: IRRI (1984)

Rancangan bangun sistem drainase ditentukan oleh beberapa faktor yang urutannya paling rendah, yaitu: (a) topografi, (b) pengendalian air yang dikehendaki, (c) biaya, (d) banyaknya dan tipe struktur fisik penunjang, (e) gerakan tanah yang terkait dengan

faktor (a) dan (b), dan (f) lokasi penampungan buangan air. Dari 9 alternatif sistem drainase dengan pembuangan air melalui pintu 1, 3, 4, dan 5. Air yang berlebihan disalurkan ke sungai Citempuran dan lembah Blanakan.

Spesifikasi dari pembuangan air dihitung dengan menggunakan Manning's Formula. Formula ini digunakan untuk menghitung kecepatan aliran air dalam saluran drainase.

$$V = \frac{R^2 / s^{1/2}}{n}$$

di mana: V = kecepatan (m/det), R = radius hidraulik, s = kemiringan (m/m) dan n = koefisien kekasaran dari saluran atau *roughness coefficient*.

Di KP Sukamandi, rancangan kapasitas drainase atau modulus drainase = 8 l/det per ha; laju gerakan limpasan air sesuai dengan air masuk (*discharge*) sebesar 75 mm/hari. Kalkulasi khusus untuk dimensi pengeringan utama.

$$\begin{aligned} \text{Luas untuk dikeringkan} &= 125 \text{ ha} \\ \text{Modulus drainase} &= 8 \text{ l/det per ha} \\ \text{Kapasitas pengeringan} &= 125 \text{ ha} \times 8 \text{ l/det/ha} \\ &= 1.000 \text{ l/det} \\ &= 1,0 \text{ m}^3/\text{det} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan Manning's Formula, dengan estimasi $R = 0,52$, $S = 0,001$, $n = 0,040$, maka:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{0,040} \times (0,52)^{2/3} \times (0,001)^{1/2} = 25 \times 0,647 \times 0,031 \\ &= 0,515 \text{ m/det} \end{aligned}$$

Kalau lebar dasar saluran drainase $2,0 \text{ m}^2$, maka kapasitas pengeringan $Q_d = V \times A = 0,515 \text{ m/det} \times 2,0 \text{ m}^2 = 1,03 \text{ m}^3/\text{det}$. Mekanik tampak bahwa kapasitas drainase rancangan (Q) tidak terlalu berbeda dengan kapasitas drainase perhitungan (Q_d)

10.2. Aspek Teknik Budidaya Padi

10.2.1. Kebutuhan air irigasi tanaman padi dan palawija

Air untuk irigasi tanaman padi di KP Sukamandi di sediakan oleh Perum Otorita Jatiluhur (POJ). Bangunan pengatur air untuk KP Sukamandi dan Perum Sang Hyang Seri (PSHS) berkapasitas 5,2 m³/detik. KP Sukamandi mendapat jatah 0,8-1,0 m³/detik. Jadi, secara teori suplai air dari POJ untuk KP Sukamandi dinilai cukup.

Saluran air di hamparan sawah untuk PSHS dan KP Sukamandi terdiri atas saluran untuk irigasi dan saluran untuk drainase. Pengaturan irigasi dan drainase di rancang dalam satu pintu. Kalau air berlebihan, palang pintu pengatur diangkat dan air akan keluar. Cara ini menguntungkan bagi PSHS, tetapi bermasalah bagi KP Sukamandi pada MK II, ketika palawija ditanam dalam pola tanam padi-padi palawija. Tanaman Palawija pada MK II sering kekurangan air. Untuk mengatasi kekurangan air dari tanaman palawija dibangun embung-embung. Penelitian tanaman palawija dipusatkan pada petakan-petakan sawah di kebun timur di sekitar embung.

Peluang curah hujan dalam Gambar 31 adalah dasar perhitungan dari kebutuhan air untuk tanaman padi dan palawija, dan juga alokasi jatah 0,8-1,0 m³/detik. Dari perhitungan itu, kebutuhan air untuk tanaman padi pada MH dan MK dirumuskan dengan catatan waktu tanam MH adalah minggu ke-4 bulan Nopember atau minggu awal bulan Desember. Waktu tanam pada MK adalah pertengahan bulan Mei tahun berikutnya.

10.2.2. Komponen teknologi budidaya

Satelah sawah dicetak dan air irigasi tersedia, penelitian kamponen teknologi budidaya padi dan palawija dimulai. Paket

teknologi yang tepat akan meningkatkan efisiensi produksi air. PSHS perlu memperhatikan efisiensi produksi air. PSHS harus membayar setiap m³ air kepada POJ.

Di antara komponen teknologi budidaya, pemupukan adalah yang paling dinamis. Dari hasil-hasil penelitian pemupukan tanaman padi diperoleh informasi sebagai berikut:

- Pada tahun-tahun awal padi ditanam hasil padi hanya 3,0-4,0 ton/ha GKG. Perataan tanah podzolik di KP Sukamandi menggerus lapisan permukaan walaupun dilakukan secara hati-hati. Lapisan tanah yang tertinggal bereaksi masam (pH $\leq 5,0$). Beberapa tahun kemudian pH tanah naik menjadi $\geq 6,0$. Hal ini terjadi karena air irigasi dari Jatiluhur mengandung cukup tinggi. Ca yang terlarut dalam air irigasi diikat oleh tanah dilapisan olah. Artinya, tanah KP Sukamandi semakin subur.
- Urea adalah pupuk yang harus diberikan pada tanaman padi MH dan MK pada takaran 90-135 kg N/ha. Pupuk TSP atau SP-36 dapat diberikan setiap 4 musim sekali. Pupuk KCI perlu pada setiap kali terjadi anomali iklim EL-Nino yang menyebabkan suplai air irigasi sangat berkurang, terutama pada MK.
- Jerami padi bermanfaat sebagai pupuk organik, efeknya baru terlihat pada pemberian jerami $> 10,0$ ton/ha.
- Penanaman kedelai dan kacang hijau meningkatkan kesuburan tanah dan meningkatkan efisiensi unsur N, kalau brangkasnya diberikan sebagai pupuk organik.

Di KP Sukamandi, dan beberapa sentra produksi padi di Jawa, hasil padi pada MK selalu lebih rendah dari hasil padi MH, walaupun air irigasi pada MK cukup tersedia.

Tabel 21 menunjukkan kebutuhan air tanaman padi per tahun dalam hitungan mm dan liter/detik per ha.

Tabel 21. Kebutuhan air tanaman padi di KP. Sukamandi, BB Padi (dulu LP3 Cabang Sukamandi).

Kebutuhan air irigasi	Bulan											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Kebutuhan air (mm/bulan)	-70	-12	73	121	152	160	204	206	222	220	122	81
Kebutuhan air (mm/hari)	0	0	2,35	4,03	4,9	5,33	6,8	6,85	7,4	6,76	4,06	2,68
Kebutuhan air (l/det per ha)	0	0	0,27	0,47	0,57	0,62	0,79	0,79	0,86	0,78	0,47	0

Sumber: IRRI (1984)

Kebutuhan air total dalam Tabel 20 dirinci menjadi kebutuhan air pesemaian, pengelohan tanah dan pertumbuhan tanaman padi.

- o Tanaman padi MH
 - Pesemaian 40-60 mm
 - Pengelohan tanah 200-250 mm (20-30 hari)
 - Pertumbuhan 6 00-700 mm (110 hari; 5,5-6,5 mm/hari)
 - Total 840-1010 mm

- o Tanaman padi MK
 - Pesemaian 50-70 mm
 - Pengelohan tanah 250-280 mm (20-30 hari)
 - Pertumbuhan 825-950 mm (110 hari; 7,5-8,5 mm/hari)
 - Total 1125-1300 mm

Perhatian untuk KP Sukamandi: tambahan alokasi air dari POJ setiap 3 dari 4 tahun untuk setiap bulan dalam setahun, kecuali pada bulan Februari, karena iklim KP Sukamandi tergolong Zone E3, berdasarkan klasifikasi agroklimat dari pulau Jawa.

Uraian dalam Bab ini menunjukkan bahwa pengembangan lahan untuk sawah irigasi harus dirancang secara benar dan teliti agar kegagalan-kegagalan yang sama tidak terulang. Sebaliknya hasil padi di sentra-sentra produksi yang berada di sebelah utara katulistiwa ($>10^{\circ}\text{LU}$) dan di daerah Sub-tropika. Fenomena ini dapat dijelaskan dengan rumus berikut (Yoshida, 1983, dalam Fagi dan Makarim, 1990).

$$\Delta W = \frac{Eu \times T \times S}{K} \times 10^4$$

dimana:

ΔW = kenaikan bahan kering tanaman (g/m^2) yang dapat dikonversi ke kenaikan hasil gabah

Eu = efisiensi penggunaan energi matahari pada fotosintesis (Eu tertinggi 3,5%; Eu sedang 2,5%)

T = periode pengisian gabah (25 - 0 hari sebelum panen)

S = rata-rata intensitas cahaya matahari yang sampai ke permukaan daun

K = panas pembakaran hidrat arang atau karbohidrat (kal/g); nilainya 4.000 kal/g pada proses respirasi

Dengan rumus ini lebih rendahnya hasil padi pada MK, yaitu karena suhu siang dan malam yang tinggi menyebabkan nilai K juga tinggi. Sampai saat buku ini ditulis belum ada varietas padi yang sesuai untuk kondisi MK.

Komponen teknologi lain yang belum mantap adalah pengendalian hama/penyakit dengan pendekatan PHT (Pengendalian Hama/Penyakit Terpadu). Pendirian untuk memegang prinsip Zero pestisida dalam PHT tidak dapat

dipertahankan, dan beralih ke penggunaan pestisida secara bijaksana. Hal ini perlu diklarifikasi.

Peningkatan efisiensi penggunaan air mulai dirintis. Penelitian menghasilkan konsep "*stress day*" untuk mengurangi volume penggunaan air dan memperluas area tanam dengan teknik irigasi bergilir (lihat Bab di depan).

BAB XI

PENUTUP

Indonesia telah memasuki pertanian moderen pada budidaya padi sawah dengan diterapkannya teknologi Revolusi Hijau. Pendekatan *high-input commercial rice farming* adalah ciri dari teknologi budidaya padi intensif (teknologi Revolusi Hijau). Dalam komponen teknologi intensif pada program ~ Bimas, Opsus, Insus, Supra Insus dan P2BN, irigasi adalah salah satu komponen utamanya, selain penanaman varietas padi unggul, pemupukan dan PHT. Walaupun irigasi memberi sumbangan terbesar (26%) terhadap laju kenaikan produksi padi dibandingkan dengan varietas padi unggul (5%) dan pemupukan (4%) sampai swasembada beras tercapai untuk pertama kalinya pada 1984, pengelolaan air irigasi masih belum menunjukkan pengelolaan yang moderen. Sebab itu irigasi belum mampu menstabilkan laju kenaikan produksi padi pada saat terjadi kemarau panjang akibat dari El Nino, karena stok air untuk irigasi tidak mencukupi kebutuhan pertanaman padi pada MK.

Penggunaan air irigasi untuk padi sawah masih belum efisien, terutama disebabkan oleh kehilangan air di saluran yang besar dan penggunaan air yang boros. Irigasi tergenang diam pada tinggi genangan 5,0 cm masih diterapkan dalam program intensifikasi produksi padi. Padahal teknik irigasi bergilir ~ *intermittent* atau *rotational irrigation techniques* pada interval pemberian air yang terukur tidak menurunkan hasil, tetapi menghemat penggunaan

air irigasi. Tetapi teknik irigasi bergilir memerlukan jaringan irigasi yang terpelihara dan dilengkapi dengan pintu pembagi air yang terukur. Disiplin pengguna dan pengatur pembagian diawali dengan membentuk Federasi Kelompok Tani dan P3A-Mitra cai.

Modernisasi pengelolaan sumberdaya air membuka peluang bagi perluasan area tanam dan panen, serta perluasan pola tanam berbasis tanaman padi. Data berikut mendukung optimasi menuju swasembada beras dan kemandirian pangan. Ketersediaan air total 15.000 m³/kapita/tahun atau 25 kali ketersediaan dunia (600 m³/kapita/tahun), baru dimanfaatkan 93 m³/kapita/tahun. Upaya untuk memanfaatkan ketersediaan air yang melimpah diwujudkan dengan membangun 62 bendungan baru, 30.000 embung dan pembangunan saluran yang ada untuk menambah luas area tanam/panen seluas 3,7 juta ha.

Dampak negatif dari cekaman kekurangan air diuraikan secara ilmiah, dan kiat-kiat peningkatan efisiensi penggunaan air diuraikan dalam buku ini.

EXECUTIVE SUMMARY

Almost all rice production gains since rice intensification programs have been launched from 1968/69 now, have come through improvement in irrigated rice farming. It is unlikely that farmers would have planted high yielding rice varieties and such high levels of fertilizers without the assurance of irrigation water supply.

However, climate region of Indonesia belongs to type II B (Huke, 1976). Rice producing countries under such region are reliable producers of rice, if the countries are able to control supply of water for irrigation. Unpredictable of erratic rainfall, a specific characteristics of monsoonal climate, is frequently less than the ideal condition for successful rice intensification programs. It may be worsen by the unfavorable fact of climate change.

Adaptive Rice Cultivation Technology

Flooded rice fields are thought to be significant sources of trace gases, especially CH_4 . Recent estimates place the annual emission CH_4 from flooded rice cultivation at between 20 and 200 Tg CH_4 or 4 - 20% of the total global sources.

Indonesia commits to reduce green house gas (GHG) emission by 29%. With respect to increasing rice production and reducing GHG emission, it is directed in the Annex of Presidential Decree

No.61/2011, the importance of consolidation of national food security through increased rice production with lower GHG emission by the application of agricultural land management and cultivation, as well as optimum CO₂ absorption.

There are three major cultivation techniques that fulfil the direction of Presidential Decree No. 61/2011: (a) grow rice varieties (HYV) potential in reducing CH₄ emission, (b) apply mature animal manure in combination with inorganic fertilizers, and (c) use intermittent irrigation technique, preferably under direct seeding rice in perfectly cultivated fields. Among this cultivation techniques, intermittent irrigation shows the greatest amount (about 50%) of CH₄ emission reduction.

Technical and Institutional Improvement for Rotational Irrigation

Technical aspects

The terms wet and dry irrigation techniques have to be clarified for ease of their implementation in the fields:

- intermittent irrigation – it is an irregular time of irrigation water allocation; appropriate to be used in rainfiled lowland rice (simple, non-technical or semi technical irrigation) where rain water is considered as reliable water source.
- rotational irrigation ~ it is a regular time of irrigation water allocation commonly practiced in irrigated rice areas with technical irrigation method.

Rotational irrigation has been applied at the Jatiluhur irrigation system for years, with the following advantages:

- (a) more efficient use of irrigation water in the dry season causing planted area of rice in the dry season approaching planted area of rice in the wet season.

- (b) more efficient use of fertilizer nitrogen; to obtain rice gain yield over 5,0 tons/ha, only 45 kg N/ha is required under 4-5 day irrigation rotation, while under continuous flooding (stagnant standing water) it requires 90 kg/ha.

Two alternative methods are proposed to implement rotational irrigation:

- 1) The depth of residual soil water in the rice fields
 - when residual soil water in the rice field reaches about 15 cm depth, it is the time to irrigate the fields.
 - this method does not show the position of rotational irrigation blocks; it is not easy to identify these block using this method.
- 2) The stress day concept
 - Stress day is the number of days 2-3 days after the fields are under saturation (macak-macak); soil moisture regime at 2-3 days after saturation is under field capacity,
 - RWS is a tool to identify water adequacy, and the border of head, middle, and tail sub-commads,
 - 1 to 2 stress days or 4-5 days after saturation will not harmful to the rice crops, without additional irrigation water.

Good irrigation infrastructures are prerequisite to implement rotational irrigation. Rehabilitation and maintenance of irrigation canals covering 1,34 million ha and 2,32 million ha of rice fields, respectively, are the right momentum to modernize irrigation system.

The targets of irrigation infrastructure rehabilitation and maintenance are to make efficient use of irrigation water, and to anticipate the worse effects of climatic anomalies (El Nino). The steps needed, are:

- all irrigation canals have to be completed with measuring devices of water flow and allocation, using appropriate weirs.
- inventory of the present status (success of failure) or rotational irrigation has been applied, including the problems and constraints.

Institutional aspects

Harmonize responsibility and understanding of Farmers Groups and Water User Association (WUA) with regard to implementation of rotational irrigation, through:

- establishment of Farmers Group and WUA Federation at village and system levels.
- job description of Farmers Group and WUA.

Regular meetings between irrigation authority and Federation have to be initiated during the growing season.

Where and How Rotational Irrigation May be Recommended

Irrigated rice areas in Indonesia are concentrated in Java. About 60% of the total national rice production come from Java, while this island has only 4,5 % of the total water for irrigation, domestic and other usages. Conversion of productive irrigated rice areas to non-agricultural purposes, and degradation of upper river watersheds are alarming.

The command of irrigation systems both reservoir systems and run-off-the river systems are grouped into three sub-commands:

- Head parts: close to main or secondary canals, with RWS (relative water supply) is generally more than 1 ($RWS > 1,0$).
- Middle parts: relatively-moderately farther from the main or secondary canals with RWS is $\leq 1,0$.

- Tail parts: far from main or secondary canals, with RWS is < 1,0.

From the two circumstances, rotational irrigation technique is recommended to be practiced in Java, and are prioritized at the tail parts of irrigation command.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Civil Engineer. 1980. Operation and Maintenance of Irrigation and Drainage Systems: ASCE Manuals and Reports, an Engineering Practise No. 57, 127 p.
- Arif, S. Supadmo. 2003. Tanggapan atas Bahan Diskusi Pembiayaan dan Pengelolaan Irigasi. Diskusi Panek ke-2, Balitbang Kimpraswil, 18 September 2003.
- Balingtang (Balai Penelitian Lingkungan Pertanian). 2015a. Petunjuk Teknis. Budidaya Padi Gogoranchah : (Peluang Intensifikasi dan Ekstensifikasi) — Penerbit — P.T.Kanisius: — Website www.kanisiusmedia.com
- Balingtang. 2015b. Petunjuk Umum: Embung ~ Tandon Air untuk Pertanian Skala Kecil. Penerbit P.T.Kanisius: Website www.kanisiusmedia.com
- Balingtang. 2015. Component 1: Effectiveness of ICM and SRI on Grain Yields of Lowland Rices and on GHG Emission Reduction. Collaboration between Balingtang and International Center for Research on Agroforestry (unpublished report).
- Balitbang Kimpraswil. 2003. Penyertaan Masyarakat dalam Pembiayaan dan Pengelolaan Irigasi. Diskusi panel, Jakarta, Juli 2003.
- Balitklimat (Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi). 2003, Atlas Sumber Daya iklim Pertanian, skala 1 : 1.000.000. Badan Litbang Pertanian.

- Bank Dunia (World Bank). 1982. Indonesia: Review of Irrigation Sector Work Program: An Issue Paper. C 97252/J103045/D3632/44, 20p.
- Baver, L.D. 1966. Soil Physics. Third Edition: Modern Asia Edition. John Wiley & Sons, New York 487 p.
- Brady, N.C. 1974. The Nature and Properties of Soils Macmillan Pub. Co.Inc., New York, Collier Macmillan Pub., London, 639 p.
- Bureau of Reclamation. 1975. Water Measurement Manual: A Water Resources Technical Publication. United States of the Interior (2nd eds.), 327 p.
- Buresh, R.J. and A Dobermann. 2009. Organic material and rice. In Annual Rice Forum 2009: Reversing the Organic Fertilizer Issue in Rice Phil Rice & SEARCA – SEAMEO, p. 17-33.
- David, W.P. 2003. Averting the Water Crisis in Agriculture: Policy and Program Frame work for Irrigation Development in the Philipinnes The University of the Philippines and Asia Pasific Policy Center, 168 p.
- Denmead, O.T. 1995. Measuring Fluxes of Green House Gases Between Rice Fields and The Atmosphere. In Climate Change and Rice. Springer-Vorlag and the Environment, Berlin (Peng et.al.eds), IRRI, pp 15-29
- Fagi, A.M. 1977. Peningkatan Produksi Pertanian Melalui Penelitian : Tantangan dalam Pelita. Ekonomi dan Keuangan Indonesia, Vol. XXV, No. 3, hal. 199 – 212. Fakultas Ekonomi, Universitas Indonesia.
- Fagi, A.M. dan S.A. Sanusi W. 1983. Meningkatkan Efisiensi Air Irigasi dengan Teknik Budidaya Tanaman dan Teknik Pengairan. Dalam Risalah Lokakarya Penelitian Padi, Cibogo, Bogor, 22-24 Maret 1983.

- Fagi, A.M., I. Syamsiah, D. Setio Budi, I Yuliardi, A. Ruhwahyudi dan S. Tarniti. 1987. Evaluasi Status Pengelolaan Air di Tingkat Petani. Studi kasus di Subsistem Barubug, Wilayah Pengairan Jatiluhur. Dalam Hasil-hasil penelitian Optimalisasi Air untuk Irigasi dan Kualitas Air untuk Irigasi Pantai/Pertambakan. Kerjasama Perum Otoritas Jatiluhur (Direktorat Pengairan) dengan program Penelitian Tataguna Air, Badan Litbang Pertanian, hal 9-56.
- Fagi, A.M. dan A.K. Makarim.1990a. Pelestarian Swasembada Beras : Tantangan dan Peluang. Dalam Risalah Lokakarya Hasil dan Program Penelitian Tanaman Pangan, Maros 30 Mei – 03 Juni 1990, hal 1 - 20
- Fagi, A.M. 1990. Progress of the INSURF Trials in Rainfed Lowland Rice. Paper presented at the INSURF Planning Meeting. IRRI, Los Banos, Philippines, 11-14 Sept.1990.
- Fagi, A.M. dan I. Manwan.1992. Teknologi Pertanian dan Alternatif Penanggulangan Dampak Negatif Kemarau Panjang. Dalam Prosiding Seminar Nasional Antisipasi Iklim 1992 dan Dampaknya Terhadap Pertanian Tanaman Pangan. Kerjasama Perhimpunan Meteorologi Pertanian Indonesia dan Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, hal.50-78.
- Fagi, A.M., Soeripto, Badruddin, Yunus Dai, Hendiarto, Dam Dam dan S. Sudarman. 1993. Potensi dan Peluang Pengembangan serta Strategi Penelitian Pertanian Propinsi Sulawesi Tengah. Badan Litbang Pertanian, Depertemen Pertanian.
- Fagi, A.M, Irsal Las dan M. Syam. 2002. Penelitian Padi : Menjawab Tantangan Ketahanan pangan Nasional. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Balai Penelitian Tanaman Padi, 29 hal.
- Fagi, A.M. 2006. Tataguna Air Irigasi di Tingkat Usaha Tani: Kasus di Barubug Jatiluhur, Iptek Tanaman Pangan, Vol.1, No.1, Juli 2005, hal. 41-56.

- Fagi, A.M. 2007. Menyiasati Pengelolaan Sumberdaya Air untuk Pertanian Masa Depan. *Iptek Tanaman Pangan*, Vol. 2, No. 1, Juni 2007, hal.1-11
- Fagi, A.M. 2013. Farmer Participation in Water Management: Strengthening the Role of WUAs in Rice Intensification and Extensification Programs. Lesson Learned from Japanese Experience. *Ditjen Prasarana dan Sarana Pertanian*, 20 February 2013.
- Fagi, A.M. 2013. Ketahanan Pangan Indonesia dalam Ancaman : Strategi dan Kebijakan Pemantapan dan Pengembangan. *Analisis Kebijakan Pertanian*, Vol. 11, No.1, Juni 2013, hal 11-25.
- FAO.1974.A Land Capability Appraisal. United Nation Development Program. FAO AGL/INS/72/011
- Farhan, A. 1999. Kinerja pendistribusian air irigasi serta pengaruh lokasi dan takaran pupuk N terhadap hasil padi. Tesis MS, Program Pasca sarjana IPB, Bogor, 109 hal.
- Giessen, van der. 1942. Gogoranch Method of Rice Cultivation Contribution No.11. Chua Noozi Sikenzyoo, Bogor, Pp.71-76.
- Handoko dan Irsal Las. 1994. Metodologi Pendekatan Strategis dan Taktis untuk Pendugaan serta Penanggulangan Kekeringan Tanaman. Dalam Pros. Diskusi Panel Antisipasi Kekeringan dan Penanggulangan Jangka Panjang. Sukamandi, 26-27 Agustus 1994. PERAGI & PERHIMPI, hal. 102-118.
- Hansen, V.E, O.W. Israelsen and G.E. Stringham, 1979. *Irrigation Principles and Practices*. John Wiley & Son, New York, 417 p.
- Huke, R. 1982. Geography and Climate of Rice, In *Climate & Rice*. IRRI (International Rice Research Institute), pp 31-63.
- IRRI. 1995. *Climate Change and Rice*. Springer-Vorlag. Berlin (Peng et.al, eds), 374 p.

- IRRI 1997. The Ecoregional Initiative for the Humid and Sub-humid Tropics and Sub-tropics of Asia (ECOR-1). IRRI, PO Box 933, Manila, Phillipines (a discussion paper)
- IRRI (International Rice Research Institute). 1984. A Decade of Cooration and Collaboration Between Sukamandi (AARD) and IRRI 1972-1982. IRRI, Los Banos, laguna, Philipines, O. Box 93 Manila, Philipines, 165p.
- ISNAR (International Service for National Agricultural Research). Ecoregional Fund to Support Methodological Initiatives. Laan van Nieu Oost Indie 133, the Hague, the Netherlands (year is not identified; a circular).
- Istiqlal Amien. 1994. Sumberdaya Lahan di Bagian Hulu Beberapa Daerah Aliran Sungai di Pulau Jawa. Dalam Pros. Diskusi Panel Antisipasi Kekeringan dan Penanggulangan Jangka Panjang. Sukamandi 26-29 Agustus 1994. PERAGI & PERHIMPI, hal 26-48.
- Kompas. 2015. Darurat Sumberdaya Air: Kualitas dan Kuantitas Sungai Terus Terancam. IPTEK Lingkungan dan Kesehatan. Jumat, 28 Agustus 2015, hal. 14.
- Kompas. 2017. Rp 20 Triliun untuk Embung. Sekitar 4 Juta Hektar. Lahan Pertanian Akan Pertanian Akan Mendapat Manfaat. Ekonomi, Jumat, 3 Maret, hal. 17.
- Kompas, 2017. Ketahanan Air, kunci Ketahanan Pangan. Prime, Rabu 16 Agustus 2017, hal 43.
- Kramer, P.J. 1975. Plant and Soil Water Relationship A Modern Synthesis. Tata McGraw-Hill. Co, LTD, New Delhi. 482 p.
- Maskin, E.S.2017.Kesenjangan Bermuka Dua. Kompas, Jumat 20 Januari 2017, hal.16 (Arbain Rambey,ed.)
- PERHIMPI (Perhimpunan Meteorologi Pertanian Indonesia) dan Badan Litbang Pertanian. 1992. Prosiding Seminar Nasional Antisipasi Iklim 1992 dan Dampaknya terhadap Pertanian Tanaman Pangan., Bogor, 27-28 Dedsemer 1991, 258 hal.

- PERAGI (Perhimpunan Agronomi Indonesia) dan PERHIMPI. 1995. Prosiding Diskusi Panel. Antisipasi Kekeringan dan Penanggulangan Jangka Panjang. Sukamandi, 26-27 Agustus 1994.
- Pasandaran, E. 1978. Water management decision-making in the Pekalen Sampean Irrigation Project, East Java, Indonesia. In *Irrigation Policy and Management in Southeast Asia*. International Rice Research Institute, pp. 47-59.
- Pawitan, H, Sutardi, Prastowo, Sugiyanto dan I.W.Astika. 2008. Kajian Kebijakan Pemanfaatan Sarana dan Prasarana Pertanian dan Perikanan Laporan Akhir. Deputi Bidang Koordinasi Pertanian (Tidak dicetak).
- Pradhan, N.C dan P.L. Pingali. 1994. Participatory Irrigation management: The Costs and Benefits of Working Together. Workshop on Social Science Methods in Agricultural Systems Research. Chiangmai Univ. , November 2-4, 1994. Thailand.
- Salisbury, F.B. and C. Ross. 1969. *Plant Physiology* Wadsworth Pub.Co, Inc., Belmont, California, USA, 747p.
- Saubari, A. 2005. Laporan Akhir. Kajian Perkembangan System of Rice Intensification (SRI) di Indonesia. Yayasan Padi Indonesia dan Sekretariat Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. 32 hal. (tidak dicetak). 108 hal.
- Schwab, G.O, R.K.Frevert, T.W.Edminster and K.K.Barnes.1996. *Soil and Water Conservation Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sidney, 683 p.
- Sinis Munandar. 1994. Pengembangan Tataguna Air pada Lahan Kering Sebagai Alternatif Penanggulangan Kekeringan. Dalam Pros. Diskusi Panel Antisipasi Kekeringan dan Penanggulangan Jangka Panjang. Sukamandi 26-29 Agustus 1994. PERAGI & PERHIMPI, hal. 49-71.

- Subari. 2008. Penerapan Operasi Irigasi untuk Budidaya Padi pada System of Rice Intensification (SRI) di Petak Tersier. *Jurnal Irigasi*, Vol.3, No.2, November 2008, hal.129-137
- Fagi, A.M. dan S.A. Sanusi W. 1983. Meningkatkan Efisiensi Air Irigasi dengan Teknik Budidaya Tanaman dan Teknik Pengairan. Dalam *Risalah Lokakarya Penelitian Padi*, Cibogo, Bogor, 22-24 Maret 1983.
- Syamsiah, Iis, I P. Wardana dan A.M. Fagi. 1995. Pemanfaatan dan Dampak Embung terhadap Sistem Usahatani di Lahan Tadah Hujan: Kasus kabupaten Rembang: Dalam *Kinerja Penelitian Tanaman Pangan*. Buku 3. Hal 970-979.
- Syamsiah, Iis dan A.M. Fagi. 1997. Teknologi Embung dalam Sumberdaya Air dan Iklim dalam Mewujudkan Pertanian Efisien. *Pros. Kerjasama Departemen Pertanian dan PERHIMPI (Perhimpunan Meteorologi Pertanian Indonesia)*, hal. 145-157.
- Tabbal, D.F. and T.H. Wickham. 1978. Effects of location and water supply on water shortages in an irrigarion area. In *Irrigation Policy and Management in Southeast Asia*. International Rice Research Institute, pp. 93-101.
- Wickham, T.H. and A. Valera. 1978. Practises and accountability for better water management. In *Irrigation Policy and Management in Southeast Asia*. International Rice Research Institute, pp. 61-75.
- Wihardjaka, A., G.J.D. Kirk, S. Abdulrachman and C. P. Mamaryl. 1998. *Potassium balances in rainfed lowland rice on a light textured soils*. In *Rainfed Lowland Rice: Advances in Nutrient Management Research*. J.K. Ladha et.al. (eds), IRRI, p.127-137.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Faktor konversi dari ukuran panjang (*length*), luas permukaan (*surface*) dan isi (*volume*)

LENGTH		
Multiply-	By-	To obtain-
Miles.....	1.60935.....	Kilometers.
Do.....	1,760.....	Yards.
Do.....	5,280.....	Feet.
Do.....	63,360.....	Inches.
Meters.....	0.00062137.....	Miles.
Do.....	1.0936.....	Yards.
Do.....	3.28088.....	Feet.
Do.....	39.37.....	Inches.
Do.....	100.....	Centimeters.
Do.....	0.001.....	Kilometers.
Yards.....	0.9144.....	Meters.
Do.....	0.00056818.....	Miles.
Do.....	3.0.....	Feet.
Do.....	36.....	Inches.
Feet.....	0.3048.....	Meters.
Do.....	0.00018939.....	Miles.
Do.....	0.33333.....	Yards.
Do.....	12.....	Inches.
Inch.....	0.08333.....	Feet.
Do.....	0.027778.....	Yards.
Do.....	0.000015783.....	Miles.
Do.....	2.54.....	Centimeters.
SURFACE		
Square mile.....	4,014,489,600.....	Square inches.
Do.....	27,878,400.....	Square feet.
Do.....	3,097,600.....	Square yards
Do.....	640.....	Aeres.
Do.....	259.....	Hectares.
Aere.....	208.71.....	Feet square.
Do.....	0.404687.....	Hectares.
Do.....	0.0015625.....	Square miles.
Do.....	4,840.....	Square yards.
Do.....	43,560.....	Square feet.
Do.....	4,047.....	Square meters.
Square yards.....	0.83613.....	Do.
Do.....	0.0000003228.....	Square miles.
Do.....	0.0002066.....	Aeres.
Do.....	9.....	Square feet.
Do.....	1,296.....	Square inches.
Square Feet.....	0.092903.....	Square meters
Do.....	0.000000003587.....	Square miles.
Do.....	0.000022957.....	Aeres.
Do.....	0.11111.....	Square yards.
Do.....	144.....	Square inches.
Square inches.....	0.000000002491.....	Square miles.
Do.....	6.45163.....	Square centimeters.
Do.....	0.000001594.....	Aeres.
Do.....	0.0007718.....	Square yards.
Do.....	0.006944.....	Square feet.

VOLUME		
Aere-feet.....	325,851.....	U. S. gallons.
Do.....	43,560.....	Cubic feet.
Do.....	1,613.3.....	Cubic yards.
Do.....	1,233.49.....	Cubic meters.
Cubic yard.....	27.....	Cubic feet.
Do.....	46,656.....	Cubic inches.
Do.....	0.00061983.....	Aere-feet.
Do.....	0.76456.....	Cubic meters.
Cubic feet.....	1,728.....	Cubic inches.
Do.....	7.4805.....	U. S. gallons
Do.....	28.317.....	Liters
Do.....	0.037037.....	Cubic yards.

Sumber : Bureau of Reclamation (1975)

Lampiran 2. Faktor konversi hidrolika dari unit pengukuran British ke metric untuk panjang, luas, volume, massa/berat (*mass*), percepatan (*acceleration*), berat jenis (*mass/vol*), kecepatan (*velocity*), arus (*flow*), tenaga (*power*)

dikalikan	Dengan	untuk menjadi
Inches	<u>LENGTH</u>	
Feet	25.4 (exactly)	Millimeters
Miles	30.48 (exactly)	Centimeters
	1.609344 (exactly)	Kilometers
Square inches	<u>AREA</u>	
Square feet	1.4516 (exactly)	Square centimeters
Acres	0.092903 (exactly)	Square meters
Square miles	0.0040469	Square kilometers
	2.58999	Square kilometers
	<u>VOLUME</u>	
Cubic feet	0.0283168	Cubic meters
	28.3168	Liters
Galloons (U.S)	3.78543	Liters
Cubic yards	0.7646	Cubic meters
Acre feet	1233.5	Cubic meters
	<u>MASS</u>	
Pounds (avdp)	0.45359237 (exactly)	Kilograms
Tons (2.000 pounds)	907.185	Kilograms
	<u>ACCELERATION</u>	
Feet per second per second	0.3048	Meters per second per second
	<u>FORCE/UNIT AREA</u>	
Pounds per square inch	0.070307	
Pounds per square foot	4.88243	Kilograms per square centimeters
Feet of water column (at 20° C)	2.246	
	0.03044	Kilograms per square meter
Pounds per cubic foot	<u>MASS/VOLUME (DENSITY)</u>	Centimeters of mercury column
	16.0185	
	0.0160185	Kilograms per square centimeters
	<u>VELOCITY</u>	
Feet per second		
Inches per hour	30.48 (exactly)	
Feet per year	2.540 (exactly)	Kilograms per cubic meter
	0.3048 (exactly)	Grams per cubic centimeter
	<u>FLOW</u>	
Cubic feet per second	0.028317	Centimeters per second
Cubic feet per minute	28.317	Centimeters per hour
Galloons per minute	0.4719	Meters per year
	0.06309	
	3.7854	
Horsepower (British)	<u>POWER</u>	
(defined 550 ft lb/sec)	745.700	Cubic meters per second
	1.014	

dikalikan	Dengan	untuk menjadi
	<u>SEEPAGE</u>	Liters per second
Cubic feet per square foot per day	304.8	Liters per second
	<u>VISCOSITY</u>	Liters per second
Dynamic viscosity	4.8824	Liters per second
(pounds second per square foot)	0.092903 (exactly)	Watts
Kinematic viscosity		Horsepower (metric)
(square feet per second)	<u>SURFACE TENSION</u>	(defined 75 kg-m/sec)
	1.4882	
Pounds per foot	<u>GAS CONSTANT</u>	Liters per square meter per day
	0.5486	
Feet per degree F		Kilogram second per square meter
		Square meters per second
		Kilograms per meter
		Meters per degree Celcius°

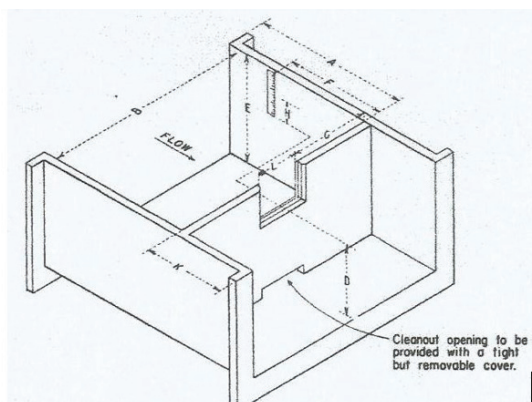
Aliran permukaan mendatar (*seepage*), kekentalan/viskositas (*viscosity*), tegangan permukaan (*surface tension*), konstanta gas (*gas constant*)

Sumber : Bureau of Reclamation (1975)

Lampiran 3. Debit air yang dialirkan lewat pintu tergantung dimensi dari weirs (a) dan panjang dasar pintu (b)

(a) RECTANGULAR AND CIPOLETTI WEIRS

	H	L	A	K	B	E*	C	D	F
Dis-charge	Maxi-mum head	Length of weir crest	Length of box above weir notch	Length of box below weir notch	Total width of box	Total depth of box	Distance from end of crest to side of box	Distance from crest to bot-tom of box	Gage distance
<i>Second-foot</i>	<i>Feet</i>	<i>Feet</i>	<i>Feet</i>	<i>Feet</i>	<i>Feet</i>	<i>Feet</i>	<i>Feet</i>	<i>Feet</i>	<i>Feet</i>
¼ to 3	1.0	1	6	2	3	3	1	1 ½	4
2 to 5	1.1	1 ½	7	3	4	3	1 ¼	1 ½	4 ½
4 to 8	1.2	2	8	4	5	3 ½	1 ½	1 ¾	5
6 to 14	1.3	3	9	5	7	4	2	2	5 ½
10 to 22	1.5	4	10	6	9	4	2 ½	2	6
15 to 35	1.5	6	12	6	11 ½	4 ½	2 ¾	2 ½	6
20 to 50	1.5	8	16	8	14	4 ¾	3	2 ¾	8
25 to 60	1.5	10	20	8	17	5	3 ½	3	8
90° V-NOTCH WEIR									
½ to 2 ½	1.00	-----	6	2	5	3	-----	1 ½	4
2 to 4 1/3	1.25	-----	6 ½	3	6 ½	3 ¼	-----	1 ½	5



(b) KAPASITAS WEIRS (*second-feet*)

Length in feet	Contracted rectangular		Suppressed rectangular		Cipoletti	
	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum
1.0	0.590	0.286	0.631	0.298	0.638	0.301
1.5	1.65	.435	1.77	.447	1.79	.452
2.0	3.34	.584	3.65	.596	3.69	.602
2.5	5.87	.732	6.30	.744	6.37	.753
3.0	9.32	.881	10.0	.893	10.1	.903
3.5	13.8	1.03	14.8	1.04	15.0	1.05
4.0	19.1	1.18	20.4	1.19	20.6	1.20
4.5	25.7	1.33	27.5	1.34	27.8	1.35
5.0	33.5	1.48	36.0	1.49	36.4	1.51
5.5	42.3	1.63	45.3	1.64	45.8	1.66
6.0	52.7	1.78	56.6	1.79	57.2	1.81
7.0	77.4	2.07	82.9	2.08	83.8	2.11
8.0	108.5	2.37	116.2	2.38	117.5	2.41
9.0	145.3	2.67	155.9	2.68	157.6	2.71
10.0	188.8	2.97	202.4	2.98	204.6	3.01
12.0	298.4	3.56	320.0	3.57	323.6	3.61
14.0	439.1	4.16	470.4	4.17	475.6	4.21
16.0	612.0	4.75	656.5	4.76	663.8	4.82
18.0	822.4	5.35	882.0	5.36	891.8	5.42

Keterangan : Huruf-huruf H, L, A, K, B, E, C, D dan F dapat dilihat dalam gambar (makna dari huruf-huruf tersebut tidak diterjemahkan)

Sumber : Bureau of Reclamation (1975)

Lampiran 4. Debit air yang keluar dari pintu air pada rectangular weirs berdasarkan tinggi air masuk ke dalam pintu dan panjang dasar pintu (dihitung dengan formula Francis)_/

Head H, Feet	Length of weir, L, feet										
	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
0.01	0.002	0.003	0.005	0.007	0.010	0.013	0.016	0.020	0.023	0.026	0.030
.02	.005	.009	.014	.019	.028	.037	.047	.056	.066	.075	.085
.03	.009	.017	.026	.034	.052	.069	.086	.104	.121	.138	.155
.04	.013	.026	.040	.053	.079	.106	.133	.159	.186	.213	.239
.05	.018	.037	.055	.074	.111	.148	.186	.223	.260	.297	.334
.06	.024	.048	.073	.097	.146	.195	.244	.293	.342	.391	.439
.07	.030	.061	.092	.123	.184	.246	.308	.369	.431	.493	.554
.08	.036	.074	.112	.149	.225	.300	.375	.451	.526	.601	.676
.09	.043	.088	.133	.178	.268	.358	.448	.538	.628	.718	.807
.10	.051	.103	.156	.208	.314	.419	.524	.630	.735	.840	.945
.11	.058	.119	.179	.240	.362	.483	.605	.726	.848	.969	1.09
.12	.066	.135	.204	.273	.412	.550	.689	.827	.965	1.10	1.24
.13	.074	.152	.230	.308	.464	.620	.776	.933	1.09	1.24	1.40
.14	.082	.169	.257	.344	.518	.693	.867	1.04	1.22	1.39	1.56
.15	.091	.188	.284	.381	.575	.768	.962	1.16	1.35	1.54	1.74
.16	.100	.206	.313	.419	.632	.845	1.06	1.27	1.48	1.70	1.91
.17	.109	.225	.342	.459	.692	.926	1.16	1.39	1.63	1.86	2.09
.18	.122	.245	.372	.499	.754	1.01	1.26	1.52	1.77	2.02	2.28
.19	.132	.265	.403	.541	.817	1.09	1.37	1.64	1.92	2.20	2.47
.20	.142	.286	.435	.584	.881	1.18	1.48	1.78	2.07	2.37	2.67
.21	.152	.307	.467	.627	.948	1.27	1.59	1.91	2.23	2.55	2.87
.22	.162	.328	.500	.672	1.02	1.36	1.70	2.05	2.39	2.73	3.08
.23	.173	.350	.534	.718	1.08	1.45	1.82	2.19	2.55	2.92	3.29
.24	.184	.373	.568	.764	1.16	1.55	1.94	2.33	2.72	3.11	3.50
.25	.195	.395	.603	.811	1.23	1.64	2.06	2.48	2.89	3.31	3.72
.26	----	.419	.639	.860	1.30	1.74	2.18	2.63	3.07	3.51	3.95
.27	----	.442	.675	.909	1.38	1.84	2.31	2.78	3.24	3.71	4.18
.28	----	.466	.712	.959	1.45	1.95	2.44	2.93	3.43	3.92	4.41
.29	----	.490	.750	1.01	1.53	2.05	2.57	3.09	3.61	4.13	4.65
.30	----	.514	.788	1.06	1.61	2.16	2.70	3.25	3.80	4.34	4.89
.31	----	.539	.827	1.11	1.69	2.26	2.84	3.41	3.99	4.56	5.14
.32	----	.564	.866	1.17	1.77	2.37	2.98	3.58	4.18	4.78	5.39
.33	----	.590	.905	1.22	1.85	2.48	3.12	3.75	4.38	5.01	5.64
.34	----	.615	.945	1.28	1.94	2.60	3.26	3.92	4.58	5.24	5.90
.35	----	.658	.986	1.33	2.02	2.71	3.40	4.09	4.78	5.47	6.16
.36	----	.686	1.03	1.39	2.11	2.82	3.54	4.26	4.98	5.70	6.42
.37	----	.714	1.07	1.44	2.19	2.94	3.69	4.44	5.19	5.94	6.69
.38	----	.743	1.11	1.50	2.28	3.06	3.84	4.62	5.40	6.18	6.96
.39	----	.772	1.15	1.56	2.37	3.18	3.99	4.80	5.61	6.42	7.24
.40	----	.801	1.20	1.62	2.46	3.30	4.14	4.99	5.83	6.67	7.51
.41	----	.803	1.24	1.68	2.55	3.42	4.30	5.17	6.05	6.92	7.80
.42	----	.860	1.28	1.74	2.64	3.55	4.46	5.36	6.27	7.18	8.08
.43	----	.890	1.33	1.80	2.74	3.68	4.61	5.55	6.49	7.43	8.37
.44	----	.920	1.37	1.86	2.83	3.80	4.77	5.75	6.72	7.69	8.66
.45	----	.950	1.42	1.92	2.92	3.93	4.94	5.94	6.95	7.95	8.96
.46	----	.981	1.46	1.98	3.02	4.06	5.10	6.14	7.18	8.22	9.26
.47	----	1.01	1.51	2.04	3.12	4.19	5.26	6.34	7.41	8.48	9.56
.48	----	1.04	1.56	2.11	3.22	4.32	5.43	6.54	7.64	8.75	9.86
.49	----	1.08	1.60	2.17	3.32	4.46	5.60	6.74	7.88	9.03	10.17
.50	----	1.11	1.65	2.24	3.41	4.59	5.77	6.95	8.12	9.30	10.48

Lampiran 4. Lanjutan.

Length of weir, L, feet										Head H, Feet	Length of weir, L, feet							
1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0		3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	
1.70	2.30	3.52	4.73	5.94	7.15	8.37	9.58	10.8	12.0	1.01	9.46	12.8	16.2	19.6	23.0	26.4	29.8	
1.74	2.37	3.62	4.86	6.11	7.36	8.61	9.86	11.1	12.4	1.02	9.59	13.0	16.5	19.9	23.3	26.7	30.2	
1.79	2.43	3.72	5.00	6.29	7.57	8.86	10.1	11.4	12.7	1.03	9.72	13.2	16.7	20.2	23.6	27.1	30.6	
1.84	2.50	3.82	5.14	6.46	7.79	9.11	10.4	11.8	13.1	1.04	9.86	13.4	16.9	20.5	24.0	27.5	31.1	
1.89	2.57	3.92	5.28	6.64	8.00	9.38	10.7	12.1	13.5	1.05	10.00	13.6	17.2	20.7	24.3	27.9	31.5	
1.94	2.64	4.03	5.43	6.82	8.22	9.61	11.0	12.4	13.8	1.06	10.14	13.8	17.4	21.0	24.7	28.3	31.9	
1.99	2.70	4.14	5.57	7.00	8.44	9.87	11.3	12.7	14.0	1.07	10.27	14.0	17.6	21.3	25.0	28.7	32.4	
2.04	2.77	4.24	5.71	7.18	8.69	10.1	11.6	13.1	14.3	1.08	10.40	14.1	17.9	21.6	25.4	29.1	32.8	
2.08	2.84	4.35	5.88	7.37	8.88	10.4	11.9	13.4	14.5	1.09	10.54	14.3	18.1	21.9	25.7	29.5	33.3	
2.14	2.91	4.46	6.00	7.55	9.10	10.8	12.2	13.7	14.8	1.10	10.68	14.5	18.4	22.2	26.0	29.9	33.7	
2.19	2.98	4.57	6.15	7.74	9.32	10.9	12.5	14.1	15.1	1.11	10.82	14.7	18.6	22.5	26.4	30.3	34.2	
2.24	3.05	4.68	6.30	7.93	9.55	11.2	12.8	14.4	15.4	1.12	10.95	14.9	18.9	22.8	26.7	30.7	34.6	
2.29	3.12	4.79	6.45	8.12	9.78	11.4	13.1	14.8	15.7	1.13	11.09	15.1	19.1	23.1	27.1	31.1	35.1	
2.34	3.19	4.90	6.60	8.31	10.0	11.7	13.4	15.1	16.0	1.14	11.24	15.3	19.3	23.4	27.4	31.5	35.6	
2.39	3.26	5.01	6.75	8.50	10.2	12.0	13.7	15.5	16.3	1.15	11.37	15.5	19.6	23.7	27.8	31.9	36.0	
2.44	3.34	5.12	6.91	8.69	10.5	12.3	14.0	15.8	16.6	1.16	11.51	15.7	19.8	24.0	28.2	32.3	36.5	
2.50	3.41	5.23	7.06	8.89	10.7	12.5	14.4	16.2	16.9	1.17	11.66	15.9	20.1	24.3	28.5	32.7	36.9	
2.55	3.58	5.35	7.22	9.08	11.0	12.8	14.7	16.6	17.2	1.18	11.80	16.1	20.3	24.6	28.9	33.1	37.4	
2.60	3.66	5.46	7.37	9.28	11.2	13.1	15.0	16.9	17.5	1.19	11.94	16.3	20.6	24.9	29.2	33.5	37.9	
2.65	3.74	5.58	7.53	9.48	11.4	13.4	15.3	17.3	17.8	1.20	12.08	16.5	20.9	25.2	29.6	34.0	38.3	
2.70	3.82	5.69	7.69	9.68	11.7	13.7	15.7	17.6	18.1	1.21	12.22	16.7	21.1	25.5	30.0	34.4	38.8	
2.76	3.90	5.81	7.84	9.88	11.9	13.9	16.0	18.0	18.4	1.22	12.36	16.9	21.3	25.8	30.3	34.8	39.3	
2.81	3.98	5.93	8.00	10.1	12.2	14.2	16.3	18.4	18.7	1.23	12.51	17.1	21.6	26.1	30.7	35.2	39.8	
2.87	4.06	6.05	8.16	10.3	12.4	14.5	16.6	18.8	19.0	1.24	12.65	17.3	21.8	26.4	31.0	35.6	40.2	
2.92	4.14	6.16	8.33	10.5	12.7	14.8	17.0	19.1	19.3	1.25	12.79	17.5	22.1	26.8	31.4	36.1	40.7	
---	4.22	6.28	8.49	10.7	12.9	15.1	17.3	19.5	19.6	1.26	12.94	17.7	22.4	27.1	31.8	36.5	41.2	
---	4.30	6.40	8.65	10.9	13.2	15.4	17.7	19.9	19.9	1.27	13.09	17.9	22.7	27.4	32.2	36.9	41.7	
---	4.38	6.52	8.82	11.1	13.4	15.7	18.0	20.3	20.2	1.28	13.23	18.1	22.9	27.7	32.5	37.3	42.2	
---	4.46	6.64	8.98	11.3	13.7	16.0	18.3	20.7	20.5	1.29	13.38	18.3	23.1	28.0	32.9	37.8	42.7	
---	4.54	6.77	9.15	11.5	13.9	16.3	18.7	21.1	20.8	1.30	13.52	18.5	23.4	28.3	33.3	38.2	43.1	
---	4.62	6.89	9.32	11.7	14.2	16.6	19.0	21.5	21.1	1.31	13.68	18.7	23.7	28.6	33.6	38.6	43.6	
---	4.70	7.01	9.48	12.0	14.4	16.9	19.4	21.8	21.4	1.32	13.82	18.9	23.9	29.0	34.0	39.1	44.1	
---	4.78	7.14	9.65	12.2	14.7	17.2	19.7	22.2	21.7	1.33	13.97	19.1	24.2	29.3	34.4	39.5	44.6	
---	4.87	7.28	9.82	12.4	15.0	17.5	20.1	22.6	22.0	1.34	14.11	19.3	24.4	29.6	34.8	39.9	45.1	
---	4.96	7.38	10.0	12.6	15.2	17.8	20.4	23.0	22.3	1.35	14.26	19.5	24.7	29.9	34.2	40.4	45.6	
---	5.05	7.51	10.2	12.8	15.5	18.1	20.8	23.4	22.6	1.36	14.41	19.7	25.0	30.3	35.5	40.8	46.1	
---	5.14	7.64	10.3	13.0	15.7	18.4	21.1	23.8	22.9	1.37	14.55	19.9	25.2	30.6	35.9	41.3	46.6	
---	5.23	7.76	10.5	13.3	16.0	18.8	21.5	24.3	23.2	1.38	14.70	20.1	25.5	30.9	36.3	41.7	47.1	
---	5.32	7.89	10.7	13.5	16.3	19.1	21.9	24.7	23.5	1.39	14.85	20.3	25.8	31.2	36.7	42.1	47.6	
---	5.41	8.02	10.9	13.7	16.5	19.4	22.2	25.1	23.8	1.40	15.00	20.5	26.0	31.6	37.1	42.6	48.1	
---	5.50	8.15	11.0	13.9	16.8	19.7	22.6	25.5	24.1	1.41	15.15	20.7	26.3	31.9	37.5	43.0	48.6	
---	5.59	8.28	11.2	14.2	17.1	20.0	23.0	25.9	24.4	1.42	15.30	20.9	26.6	32.2	37.8	43.5	49.1	
---	5.68	8.40	11.4	14.4	17.4	20.4	23.3	26.3	24.7	1.43	15.45	21.1	26.8	32.5	38.2	43.9	49.6	
---	5.77	8.53	11.6	14.6	17.6	20.7	23.7	26.7	25.0	1.44	15.61	21.4	27.1	32.9	38.6	44.4	50.1	
---	5.86	8.66	11.7	14.8	17.9	21.0	24.1	27.2	25.3	1.45	15.77	21.6	27.4	33.2	39.0	44.8	50.6	
---	5.95	8.80	11.9	15.1	18.2	21.3	24.5	27.6	25.6	1.46	15.92	21.8	27.7	33.5	39.4	45.3	51.2	
---	6.04	8.93	12.1	15.3	18.5	21.7	24.8	28.0	25.9	1.47	16.06	22.0	27.9	33.9	39.8	45.7	51.7	
---	6.13	9.06	12.3	15.5	18.8	22.0	25.2	28.4	26.2	1.48	16.21	22.2	28.2	34.2	40.2	46.2	52.2	
---	6.22	9.19	12.5	15.8	19.0	22.3	25.6	28.9	26.5	1.49	16.37	22.4	28.5	34.5	40.6	46.6	52.7	
---	6.31	9.32	12.7	16.0	19.3	22.6	26.0	29.3	26.8	1.50	16.52	22.6	28.8	34.9	41.0	47.1	53.2	

Lampiran 4. Lanjutan.

Length of weir, L, feet						Head H, Feet	Length of weir, L, feet						Head H, Feet	Length of weir, L, feet			
0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0		5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	6.0		7.0	8.0	9.0	
.8	28.0	35.2	41.4	47.6	53.7	2.01	43.6	53.1	62.6	72.1	81.6	2.51	72.8	86.0	99.3	112.5	
.1	29.3	35.5	41.8	48.0	54.3	2.02	43.9	53.5	63.1	72.6	82.2	2.52	73.2	86.5	99.9	113.2	
.3	29.6	35.9	42.4	48.5	54.8	2.03	44.2	53.9	63.5	73.1	82.8	2.53	73.6	87.0	100.4	113.8	
.5	29.9	36.2	42.6	49.0	55.3	2.04	44.6	54.3	64.0	73.7	83.4	2.54	74.0	87.5	101.0	114.5	
.7	30.1	36.6	43.0	49.4	55.8	2.05	44.9	54.6	64.4	74.2	84.0	2.55	74.4	88.0	101.6	115.1	
.9	30.4	36.9	43.4	49.9	56.4	2.06	45.2	55.0	64.9	74.7	84.6	2.56	74.9	88.5	102.1	115.8	
.1	30.7	37.2	43.8	50.3	56.9	2.07	45.5	55.4	65.3	75.2	85.2	2.57	75.3	89.0	102.7	116.4	
.4	31.0	37.6	44.2	50.8	57.4	2.08	45.8	55.8	65.8	75.8	85.7	2.58	75.7	89.5	103.3	117.1	
.6	31.3	37.9	44.6	51.3	58.0	2.09	46.1	56.2	66.2	76.3	86.4	2.59	76.1	90.0	103.8	117.7	
.8	31.5	38.3	45.0	51.8	58.5	2.10	46.4	56.5	66.7	76.8	87.0	2.60	76.5	90.5	104.4	118.4	
.0	31.8	38.6	45.4	52.2	59.0	2.11	46.7	56.9	67.1	77.3	87.5	2.61	76.9	91.0	105.0	119.0	
.2	32.1	39.0	45.8	52.7	59.6	2.12	47.0	57.3	67.6	77.9	88.2	2.62	77.3	91.5	105.6	119.7	
.5	32.4	39.3	46.2	53.2	60.1	2.13	47.4	57.7	68.1	78.4	88.8	2.63	77.7	92.0	106.2	120.4	
.7	32.7	39.7	46.7	53.7	60.6	2.14	47.7	58.1	68.5	78.9	89.4	2.64	78.2	92.4	106.7	121.0	
.9	33.0	40.0	47.1	54.1	61.2	2.15	48.0	58.5	69.0	79.5	90.0	2.65	78.5	92.9	107.2	121.6	
.1	33.2	40.4	47.5	54.6	61.7	2.16	48.3	58.9	69.4	80.0	90.6	2.66	79.0	93.4	107.9	122.3	
.3	33.5	40.7	47.9	55.1	62.3	2.17	48.6	59.2	69.9	80.5	91.2	2.67	79.4	93.9	108.5	123.0	
.6	33.8	41.1	48.3	55.6	62.8	2.18	48.9	59.6	70.4	81.1	91.8	2.68	79.8	94.4	109.0	123.7	
.8	34.1	41.4	48.7	56.1	63.4	2.19	49.2	60.0	70.8	81.6	92.4	2.69	80.2	94.9	109.6	124.3	
.0	34.4	41.8	49.2	56.5	63.9	2.20	49.5	60.4	71.3	82.1	93.0	2.70	80.7	95.4	110.2	125.0	
.2	34.7	42.1	49.6	57.0	64.5	2.21	49.9	60.8	71.7	82.7	93.6	2.71	81.1	95.9	110.8	125.7	
.5	35.0	42.5	50.0	57.5	65.0	2.22	50.2	61.2	72.2	83.2	94.2	2.72	81.5	96.4	111.4	126.3	
.7	35.3	42.8	50.4	58.0	65.6	2.23	50.5	61.6	72.7	83.8	94.9	2.73	81.9	96.9	112.0	127.0	
.9	35.6	43.2	50.8	58.5	66.1	2.24	50.8	62.0	73.1	84.3	95.5	2.74	82.3	97.4	112.5	127.7	
.1	35.8	43.6	51.3	59.0	66.7	2.25	51.1	62.4	73.6	84.9	96.1	2.75	82.8	98.0	113.1	128.3	
.4	36.1	43.9	51.7	59.5	67.2	2.26	51.5	62.8	74.1	85.4	96.7	2.76	83.2	98.5	113.7	129.0	
.6	36.4	44.3	52.1	60.0	67.8	2.27	51.8	63.2	74.6	85.9	97.3	2.77	83.6	99.0	114.3	129.7	
.8	36.7	44.6	52.5	60.4	68.4	2.28	52.1	63.6	75.0	86.5	97.9	2.78	84.0	99.5	114.9	130.3	
.0	37.0	45.0	53.0	60.9	68.9	2.29	52.4	64.0	75.5	87.0	98.6	2.79	84.5	100.0	115.5	131.0	
.3	37.3	45.4	53.4	61.4	69.5	2.30	52.7	64.3	76.0	87.6	99.2	2.80	84.9	100.5	116.1	131.7	
.5	37.6	45.7	53.8	61.9	70.0	2.31	53.1	64.7	76.4	88.1	99.8	2.81	85.3	101.0	116.7	132.4	
.7	37.9	46.1	54.3	62.4	70.6	2.32	53.4	65.1	76.9	88.7	100.4	2.82	85.7	101.5	117.3	133.0	
.0	38.2	46.4	54.7	62.9	71.2	2.33	53.7	65.5	77.4	89.2	101.1	2.83	86.1	102.0	117.9	133.7	
.2	38.5	46.8	55.1	63.4	71.7	2.34	54.0	65.9	77.9	89.8	101.7	2.84	86.6	102.5	118.5	134.4	
.4	38.8	47.2	55.6	63.9	72.3	2.35	54.3	66.3	78.3	90.3	102.3	2.85	87.0	103.0	119.0	135.1	
.6	39.1	47.5	56.0	64.4	72.9	2.36	54.7	66.7	78.8	90.9	103.0	2.86	87.4	103.5	119.6	135.7	
.9	39.4	47.9	56.4	64.9	73.5	2.37	55.0	67.1	79.3	91.4	103.6	2.87	87.9	104.0	120.2	136.4	
.1	39.7	48.3	56.9	65.4	74.0	2.38	55.3	67.5	79.8	92.0	104.2	2.88	88.3	104.6	120.8	137.1	
.3	40.0	48.6	57.3	65.9	74.6	2.39	55.6	67.9	80.2	92.6	104.9	2.89	88.7	105.1	121.4	137.8	
.6	40.3	49.0	57.7	66.5	75.2	2.40	56.0	68.3	80.7	93.1	105.5	2.90	89.1	105.6	122.0	138.5	
.8	40.6	49.4	58.2	67.0	75.8	2.41	56.3	68.7	81.2	93.7	106.1	2.91	89.6	106.1	122.6	139.1	
.0	40.9	49.8	58.6	67.5	76.3	2.42	56.6	69.1	81.7	94.2	106.8	2.92	90.0	106.6	123.2	139.8	
.3	41.2	50.1	59.0	68.0	76.9	2.43	56.9	69.6	82.2	94.8	107.4	2.93	90.4	107.1	123.8	140.5	
.5	41.5	50.5	59.5	68.5	77.5	2.44	57.3	70.0	82.6	95.3	108.0	2.94	90.9	107.6	124.4	141.2	
.7	41.8	50.9	59.9	69.0	78.1	2.45	57.6	70.4	83.1	95.9	108.7	2.95	91.3	108.1	125.0	141.9	
.0	42.1	51.2	60.4	69.5	78.7	2.46	57.9	70.8	83.6	96.5	109.3	2.96	91.7	108.7	125.6	142.6	
.2	42.4	51.6	60.8	70.0	79.2	2.47	58.2	71.2	84.1	97.0	110.0	2.97	92.1	109.2	126.2	143.3	
.4	42.7	52.0	61.3	70.5	79.8	2.48	58.6	71.6	84.6	97.6	110.6	2.98	92.6	109.7	126.8	144.0	
.7	43.0	52.4	61.7	71.1	80.4	2.49	58.9	72.0	85.1	98.2	111.2	2.99	93.0	110.2	127.4	144.7	
.9	43.3	52.7	62.2	71.6	81.0	2.50	59.2	72.4	85.6	98.7	111.9	3.00	93.4	110.7	128.0	145.5	

Lampiran 4. Lanjutan.

Head <i>H</i> , feet	Length of weir, <i>L</i> , feet			Head <i>H</i> , feet	Length of weir, <i>L</i> , feet		Head <i>H</i> , feet	Length of weir, <i>L</i> , feet
	7.0	8.0	9.0		8.0	9.0		9.0
3.01	111.3	128.6	146.0	3.51	159.8	181.7	4.01	219.2
3.02	111.7	129.2	146.7	3.52	160.5	182.4	4.02	220.0
3.03	112.3	129.9	147.4	3.53	161.1	183.2	4.03	220.8
3.04	112.8	130.5	148.1	3.54	161.7	183.9	4.04	221.5
3.05	113.3	131.1	148.8	3.55	162.4	184.6	4.05	222.3
3.06	113.9	131.7	149.5	3.56	163.0	185.4	4.06	223.1
3.07	114.4	132.3	150.2	3.57	163.7	186.1	4.07	223.8
3.08	114.9	132.9	150.9	3.58	164.3	186.9	4.08	224.6
3.09	115.4	133.5	151.6	3.59	164.9	187.6	4.09	225.3
3.10	116.0	134.1	152.3	3.60	165.6	188.3	4.10	226.1
3.11	116.5	134.7	153.0	3.61	166.2	189.1	4.11	226.9
3.12	117.0	135.4	153.7	3.62	166.9	189.8	4.12	227.7
3.13	117.5	136.0	154.4	3.63	167.5	190.6	4.13	228.5
3.14	118.1	136.6	155.1	3.64	168.2	191.3	4.14	229.2
3.15	118.6	137.2	155.8	3.65	168.8	192.0	4.15	230.0
3.16	119.1	137.8	156.5	3.66	169.5	192.8	4.16	230.8
3.17	119.6	138.4	157.2	3.67	170.1	193.5	4.17	231.6
3.18	120.2	139.1	157.9	3.68	170.8	194.3	4.18	232.3
3.19	120.7	139.7	158.6	3.69	171.4	195.0	4.19	233.1
3.20	121.2	140.3	159.4	3.70	172.1	195.8	4.20	233.9
3.21	121.8	140.9	160.1	3.71	172.7	196.5	4.21	234.7
3.22	122.3	141.5	160.8	3.72	173.4	197.3	4.22	235.4
3.23	122.8	142.2	161.5	3.73	174.0	198.0	4.23	236.2
3.24	123.4	142.8	162.2	3.74	174.7	198.8	4.24	237.0
3.25	123.9	143.4	162.9	3.75	175.3	199.5	4.25	237.8
3.26	124.4	144.0	163.6	3.76	176.0	200.3	4.26	238.6
3.27	125.0	144.6	164.3	3.77	176.6	201.0	4.27	239.3
3.28	125.5	145.3	165.1	3.78	177.3	201.8	4.28	240.1
3.29	126.0	145.9	165.8	3.79	177.9	202.5	4.29	240.9
3.30	126.6	146.5	166.5	3.80	178.6	203.3	4.30	241.7
3.31	127.1	147.2	167.2	3.81	179.2	204.0	4.31	242.5
3.32	127.6	147.8	167.9	3.82	179.9	204.8	4.32	243.3
3.33	128.2	148.4	168.6	3.83	180.6	205.5	4.33	244.1
3.34	128.7	149	169.4	3.84	181.2	206.3	4.34	244.8
3.35	129.2	149.7	170.1	3.85	181.9	207.0	4.35	245.7
3.36	129.8	150.3	170.8	3.86	182.5	207.8	4.36	246.4
3.37	130.3	150.9	171.5	3.87	183.2	208.5	4.37	247.2
3.38	130.9	151.6	172.2	3.88	183.9	209.3	4.38	248.0
3.39	131.4	152.5	173	3.89	184.5	210.1	4.39	248.8
3.40	131.9	152.8	173.7	3.90	185.2	210.8	4.40	249.6
3.41	132.5	153.5	174.4	3.91	185.8	211.6	4.41	250.4
3.42	133	154.1	175.1	3.92	186.7	212.6	4.42	251.1
3.43	133.6	154.7	175.9	3.93	187.2	213.1	4.43	251.9
3.44	134.1	155.4	176.6	3.94	187.8	213.9	4.44	252.7
3.45	134.6	156	177.3	3.95	188.5	214.9	4.45	253.5
3.46	135.2	156.6	178.1	3.96	189.1	215.4	4.46	254.3
3.47	135.7	157.3	178.8	3.97	189.8	216.2	4.47	255.1
3.48	136.3	157.9	179.5	3.98	190.5	216.9	4.48	255.9
3.49	136.8	158.5	180.2	3.99	191.1	217.7	4.49	256.7
3.50	137.4	159.2	181	4.00	191.8	218.4	4.50	257.5

Lampiran 4. Lanjutan.

Head H, feet	Length of weir, L, feet				
	10.0	12.0	15.0	18.0	20.0
1.01	33.1	39.9	50.0	60.2	66.9
1.02	33.6	40.5	50.7	61.0	67.9
1.03	34.1	41.0	51.5	61.9	68.9
1.04	34.6	41.7	52.3	62.9	69.9
1.05	35.1	42.2	53.0	63.7	70.9
1.06	35.6	42.8	53.7	64.6	71.9
1.07	36.1	43.4	54.5	65.6	72.9
1.08	36.6	44.0	55.2	66.4	74.3
1.09	37.1	44.6	56.0	67.4	75.0
1.10	37.6	45.3	56.8	68.3	76.0
1.11	38.1	45.9	57.6	69.3	77.1
1.12	38.6	46.5	58.3	70.1	78.0
1.13	39.1	47.1	59.1	71.1	79.1
1.14	39.6	47.7	59.9	72.0	80.1
1.15	40.1	48.3	60.6	73.0	81.2
1.16	40.6	48.9	61.4	73.9	82.2
1.17	41.2	49.6	62.3	74.9	83.3
1.18	41.7	50.2	63.0	75.8	84.4
1.19	42.2	50.8	63.8	76.8	85.4
1.20	42.7	51.5	64.6	77.7	86.5
1.21	43.2	52.1	65.4	78.7	87.6
1.22	43.8	52.8	66.2	79.7	88.7
1.23	44.3	53.4	67.0	80.6	89.7
1.24	44.8	54.0	67.8	81.6	90.8
1.25	45.4	54.7	68.7	82.6	91.9
1.26	45.9	55.3	69.4	83.6	93.0
1.27	46.4	56.0	70.3	84.6	94.1
1.28	47.0	56.6	71.1	85.6	95.2
1.29	47.5	57.3	71.9	86.6	96.3
1.30	48.1	57.9	72.7	87.5	97.4
1.31	48.6	58.6	73.6	88.5	98.5
1.32	49.2	59.3	74.4	89.6	99.7
1.33	49.7	59.9	75.3	90.6	100.8
1.34	50.3	60.6	76.1	91.6	101.9
1.35	50.8	61.3	77.0	92.6	103.1
1.36	51.4	61.9	77.8	93.6	104.2
1.37	51.9	62.6	78.7	94.7	105.4
1.38	52.5	63.3	79.5	95.7	106.5
1.39	53.1	64.0	80.4	96.7	107.6
1.40	53.6	64.7	81.2	97.8	108.8
1.41	54.2	65.3	82.0	98.8	109.9
1.42	54.7	66.0	82.9	99.8	111.1
1.43	55.3	66.7	83.8	100.9	112.3
1.44	55.9	67.4	84.7	101.9	113.4
1.45	56.5	68.1	85.5	103.0	114.6
1.46	57.0	68.8	86.4	104.0	115.8
1.47	57.6	69.5	87.3	105.1	116.9
1.48	58.2	70.2	88.2	106.2	118.2
1.49	58.8	70.9	89.1	107.2	119.3
1.50	59.3	71.6	89.9	108.3	120.5

Head H, feet	Length of weir, L, feet				
	10.0	12.0	15.0	18.0	20.0
1.51	59.9	72.3	90.8	109.4	121.7
1.52	60.5	73.0	91.7	110.4	122.9
1.53	61.1	73.7	92.6	111.5	124.1
1.54	61.7	74.4	93.5	112.6	125.3
1.55	62.3	75.1	94.4	113.7	126.5
1.56	62.8	75.8	95.3	114.7	127.7
1.57	63.4	76.5	96.2	115.8	128.9
1.58	64.0	77.3	97.1	117.0	130.2
1.59	64.6	78.0	98.0	118.1	131.4
1.60	65.2	78.7	98.9	119.2	132.6
1.61	65.8	79.4	99.9	120.3	133.9
1.62	66.4	80.2	100.8	121.4	135.1
1.63	67.0	80.9	101.7	122.5	136.3
1.64	67.6	81.6	102.6	123.6	137.6
1.65	68.3	82.4	103.6	124.7	138.9
1.66	68.9	83.1	104.5	125.8	140.1
1.67	69.5	83.8	105.4	127.0	141.3
1.68	70.1	84.6	106.4	128.1	142.6
1.69	70.7	85.3	107.3	129.2	143.8
1.70	71.3	86.0	108.2	130.3	145.1
1.71	71.9	86.8	109.1	131.5	146.4
1.72	72.5	87.6	110.1	132.6	147.7
1.73	73.2	88.3	111.1	133.8	149.0
1.74	73.8	89.0	112.0	134.9	150.2
1.75	74.4	89.8	112.9	136.1	151.5
1.76	75.0	90.6	113.9	137.2	153.8
1.77	75.6	91.3	114.9	138.4	154.1
1.78	76.3	92.1	115.8	139.5	155.4
1.79	76.9	92.8	116.8	140.7	156.7
1.80	77.5	93.6	117.7	141.9	157.9
1.81	78.2	94.4	118.7	143.0	159.2
1.82	78.8	95.1	119.7	144.2	160.5
1.83	79.4	95.9	120.7	145.4	161.9
1.84	80.1	96.7	121.6	146.6	163.2
1.85	80.7	97.4	122.6	147.7	164.5
1.86	81.3	98.2	123.6	148.9	165.8
1.87	82.0	99.0	124.5	150.1	167.1
1.88	82.6	99.8	125.5	151.3	168.5
1.89	83.2	100.5	126.5	152.5	169.8
1.90	83.9	101.3	127.5	153.7	171.1
1.91	84.6	102.1	128.5	154.9	172.5
1.92	85.2	102.9	129.5	156.0	173.8
1.93	85.8	103.7	130.5	157.3	175.1
1.94	86.5	104.5	131.5	158.5	176.5
1.95	87.1	105.3	132.5	159.7	177.8
1.96	87.8	106.1	133.5	160.9	179.2
1.97	88.4	106.9	134.5	162.1	180.5
1.98	89.1	107.7	135.5	163.3	181.9
1.99	89.8	108.4	136.5	164.5	183.2
2.00	90.4	109.2	137.5	165.7	184.6

Lampiran 4. Lanjutan.

Head H, feet	Length of weir, L, feet					Head H, feet	Length of weir, L, feet				
	10.0	12.0	15.0	18.0	20.0		10.0	12.0	15.0	18.0	20.0
2.01	91.1	110.1	138.5	167.0	188.0	2.51	125.8	152.3	192.0	231.7	258.2
2.02	91.7	110.9	139.5	168.2	187.4	2.52	126.5	153.1	193.1	233.0	259.7
2.03	92.4	111.7	140.5	169.4	188.7	2.53	127.2	154.0	194.2	234.4	261.2
2.04	93.1	112.5	141.6	170.7	190.1	2.54	128.0	154.9	195.3	235.8	262.7
2.05	93.7	113.3	142.6	171.9	191.5	2.55	128.7	155.8	196.5	237.2	264.3
2.06	94.4	114.1	143.6	173.2	192.9	2.56	129.4	156.7	197.6	238.5	265.8
2.07	95.1	114.9	144.6	174.4	194.2	2.57	130.1	157.6	198.7	239.9	267.3
2.08	95.8	115.8	145.8	175.8	195.8	2.58	130.9	158.5	199.9	241.3	268.9
2.09	96.4	116.6	146.7	176.9	197.1	2.59	131.6	159.4	201.0	242.6	270.4
2.10	97.1	117.3	147.7	178.2	198.4	2.60	132.3	160.3	202.1	244.0	271.9
2.11	97.8	118.2	148.8	179.4	199.8	2.61	133.1	161.2	203.3	245.4	273.5
2.12	98.4	119.0	149.8	180.7	201.2	2.62	133.8	162.1	204.4	246.8	275.1
2.13	99.1	119.8	150.9	181.9	202.6	2.63	134.5	162.9	205.5	248.1	276.6
2.14	99.8	120.7	151.9	183.2	204.1	2.64	135.3	163.9	206.7	249.6	278.1
2.15	100.5	121.5	153.0	184.6	205.5	2.65	136.0	164.7	207.8	250.9	279.7
2.16	101.1	122.3	154.0	185.7	206.8	2.66	136.7	165.6	209.0	252.3	281.2
2.17	101.8	123.1	155.1	187.1	208.3	2.67	137.5	166.6	210.1	253.7	282.8
2.18	102.5	124.0	156.1	188.3	209.7	2.68	138.2	167.4	211.3	255.1	284.3
2.19	103.2	124.8	157.2	189.5	211.1	2.69	139.0	168.4	212.4	256.5	285.9
2.20	103.9	125.6	158.2	190.8	212.5	2.70	139.7	169.3	213.6	257.9	287.5
2.21	104.6	126.4	159.3	192.4	213.9	2.71	140.5	170.2	214.7	259.3	289.0
2.22	105.3	127.4	160.5	193.6	215.5	2.72	141.2	171.1	215.9	260.7	290.6
2.23	105.9	128.1	161.4	194.7	216.8	2.73	142.0	172.0	217.1	262.2	292.2
2.24	106.6	128.9	162.4	195.9	218.2	2.74	142.7	173.0	218.3	263.6	293.8
2.25	107.3	129.8	163.5	197.2	219.7	2.75	143.5	173.8	219.4	264.9	295.3
2.26	108.0	130.7	164.6	198.0	221.2	2.76	144.2	174.8	220.6	266.4	296.9
2.27	108.7	131.5	165.7	199.8	222.6	2.77	145.0	175.7	221.7	267.8	298.5
2.28	109.4	132.4	166.7	201.1	224.1	2.78	145.8	176.6	222.9	269.2	300.1
2.29	110.1	133.2	167.8	202.4	225.5	2.79	146.5	177.6	224.1	270.7	301.7
2.30	110.8	134.0	168.9	203.7	227.0	2.80	147.3	178.5	225.3	272.1	303.3
2.31	111.5	134.9	170.0	205.0	228.4	2.81	148.0	179.4	226.4	273.5	304.9
2.32	112.2	135.8	171.1	206.4	229.9	2.82	148.8	180.4	227.7	275.0	306.5
2.33	112.9	136.6	172.2	207.7	231.4	2.83	149.6	181.3	228.8	276.4	308.1
2.34	113.6	137.5	173.2	209.0	232.8	2.84	150.3	182.2	230.0	277.8	309.7
2.35	114.3	138.3	174.3	210.3	234.3	2.85	151.1	183.1	231.2	279.2	311.3
2.36	115.0	139.2	175.4	211.6	235.8	2.86	151.9	184.1	232.4	280.7	312.9
2.37	115.8	140.1	176.5	213.0	237.3	2.87	152.6	185.0	233.6	282.1	314.5
2.38	116.5	140.9	177.6	214.3	238.7	2.88	153.4	185.9	234.8	283.6	316.2
2.39	117.2	141.8	178.7	215.6	240.2	2.89	154.1	186.9	235.9	285.0	317.7
2.40	117.9	142.6	179.8	216.9	241.7	2.90	154.9	187.8	237.1	286.4	319.3
2.41	118.6	143.5	180.9	218.2	243.1	2.91	155.7	188.7	238.3	287.9	321.9
2.42	119.3	144.4	182.0	219.6	244.7	2.92	156.5	189.7	239.5	289.4	322.6
2.43	120.0	145.2	183.1	220.9	246.2	2.93	157.2	190.6	240.7	290.8	324.2
2.44	120.7	146.1	184.2	222.2	247.6	2.94	158.0	191.6	241.9	292.3	325.9
2.45	121.4	147.0	185.3	223.6	249.2	2.95	158.8	192.5	243.1	293.8	327.5
2.46	122.2	147.8	186.4	224.9	250.6	2.96	159.6	193.5	244.4	295.2	329.2
2.47	122.9	148.8	187.5	226.3	252.2	2.97	160.3	194.4	245.5	296.6	330.7
2.48	123.6	149.6	188.7	227.7	253.7	2.98	161.3	195.3	246.7	298.1	332.4
2.49	124.3	150.5	189.7	229.9	255.2	2.99	161.9	196.3	247.9	299.6	334.0
2.50	125.1	151.4	190.9	230.4	256.7	3.00	162.6	197.3	249.2	301.1	335.7

Lampiran 4. Lanjutan

Head H, feet	Length of weir, L, feet					Head H, feet	Length of weir, L, feet				
	10.0	12.0	15.0	18.0	20.0		10.0	12.0	15.0	18.0	20.0
3.01	163.4	198.2	250.4	302.5	337.3	3.51	203.6	247.4	313.1	378.8	422.6
3.02	164.2	199.2	251.6	304.0	339.0	3.52	204.4	248.4	314.4	380.4	424.3
3.03	165.0	200.1	252.8	305.5	340.6	3.53	205.3	249.4	315.7	381.9	426.1
3.04	165.8	201.1	254.0	307.0	342.2	3.54	206.1	250.4	317.0	383.5	427.9
3.05	166.6	202.0	255.3	308.5	344.0	3.55	206.9	251.5	318.3	385.1	429.7
3.06	167.3	203.0	256.5	309.9	345.6	3.56	207.8	252.5	319.6	386.7	431.4
3.07	168.1	203.9	257.7	311.4	347.2	3.57	208.6	253.5	320.9	388.3	433.2
3.08	168.9	204.9	258.9	312.9	348.9	3.58	209.4	254.5	322.2	389.9	435.0
3.09	169.7	205.9	260.1	314.4	350.6	3.59	210.2	255.5	323.5	391.4	436.8
3.10	170.5	206.8	261.4	315.9	352.2	3.60	211.0	256.6	324.8	393.0	438.5
3.11	171.3	207.8	262.6	317.4	353.9	3.61	211.9	257.6	326.1	394.6	440.3
3.12	172.1	208.8	263.8	318.9	355.6	3.62	212.8	258.6	327.4	396.3	442.1
3.13	172.9	209.8	265.1	320.4	357.3	3.63	213.6	259.6	328.7	397.8	443.9
3.14	173.6	210.7	266.3	321.9	358.9	3.64	214.4	260.7	330.1	399.4	445.7
3.15	174.5	211.7	267.5	323.4	360.6	3.65	215.3	261.7	331.4	401.0	447.5
3.16	175.2	212.6	268.7	324.9	362.3	3.66	216.1	262.7	332.7	402.6	449.3
3.17	176.0	213.6	270.0	326.4	364.0	3.67	216.9	263.8	334.0	404.3	451.1
3.18	176.8	214.6	271.3	327.9	365.7	3.68	217.8	264.8	335.3	405.9	452.9
3.19	177.6	215.6	272.5	329.4	367.4	3.69	218.6	265.8	336.6	407.4	454.6
3.20	178.4	216.5	273.7	330.9	369.0	3.70	219.5	266.9	338.0	409.1	456.5
3.21	179.2	217.5	275.0	332.4	370.7	3.71	220.3	267.9	339.3	410.7	458.3
3.22	180.0	218.5	276.2	333.9	372.4	3.72	221.2	268.9	340.6	412.3	460.1
3.23	180.8	219.5	277.5	335.5	374.1	3.73	222.0	270.0	341.9	413.9	461.9
3.24	181.6	220.5	278.7	337.0	375.8	3.74	222.8	271.0	343.3	415.5	463.7
3.25	182.4	221.4	280.0	338.5	377.5	3.75	223.7	272.1	344.6	417.1	465.5
3.26	183.2	222.4	281.2	340.0	379.2	3.76	224.5	273.1	345.9	418.8	467.3
3.27	184.0	223.4	282.5	341.5	380.9	3.77	225.4	274.1	347.3	420.4	469.1
3.28	184.8	224.4	283.7	343.1	382.6	3.78	226.2	275.2	348.6	422.0	470.9
3.29	185.7	225.4	285.0	344.6	384.4	3.79	227.1	276.2	349.9	423.6	472.8
3.30	186.5	226.6	286.3	346.2	386.1	3.80	227.9	277.3	351.3	425.3	474.6
3.31	187.3	227.4	287.5	347.7	387.8	3.81	228.8	278.3	352.6	426.9	476.4
3.32	188.1	228.3	288.8	349.2	389.5	3.82	229.6	279.3	353.9	428.5	478.2
3.33	188.9	229.4	290.1	350.8	391.3	3.83	230.5	280.4	355.3	430.2	480.1
3.34	189.7	230.3	291.3	352.2	392.9	3.84	231.3	281.5	356.6	431.8	481.9
3.35	190.5	231.1	292.6	353.9	394.8	3.85	232.2	282.5	358.0	433.4	483.7
3.36	191.3	232.3	293.9	355.4	396.4	3.86	233.1	283.6	359.3	435.1	485.6
3.37	192.1	233.3	295.1	356.9	398.1	3.87	233.9	284.6	360.6	436.7	487.4
3.38	192.9	234.3	296.4	358.5	399.9	3.88	234.8	285.7	362.0	438.4	489.3
3.39	193.8	235.3	297.7	360.1	401.6	3.89	235.6	286.7	363.3	440.0	491.1
3.40	194.6	236.3	299.0	361.6	403.3	3.90	236.5	287.8	364.7	441.7	492.9
3.41	195.4	237.3	300.2	363.1	405.1	3.91	237.3	288.8	366.1	443.3	494.8
3.42	196.2	238.3	301.5	364.7	406.8	3.92	238.2	289.9	367.4	444.9	496.6
3.43	197.0	239.3	302.8	366.2	408.5	3.93	239.0	290.9	368.8	446.6	498.5
3.44	197.8	240.3	304.1	367.8	410.3	3.94	239.9	292.0	370.1	448.3	500.4
3.45	198.7	241.3	305.4	369.4	412.0	3.95	240.8	293.0	371.5	449.9	502.2
3.46	199.5	242.4	306.6	370.9	413.8	3.96	241.6	294.1	372.8	451.5	504.0
3.47	200.3	243.4	307.9	372.5	415.6	3.97	242.5	295.2	374.2	453.2	505.9
3.48	201.1	244.4	309.2	374.1	417.3	3.98	243.4	296.2	375.6	454.9	507.8
3.49	202.0	245.4	310.5	375.7	419.1	3.99	244.2	297.3	376.9	456.5	509.6
3.50	202.8	246.4	311.8	377.2	420.8	4.00	245.1	298.4	378.3	458.2	511.5

Lampiran 4. Lanjutan.

Head H, feet	Length of weir, L, feet				
	10.0	12.0	15.0	18.0	20.0
4.01	246.0	299.4	379.7	459.9	513.4
4.02	246.8	300.5	381.0	461.5	515.2
4.03	247.7	301.6	382.4	463.2	517.1
4.04	248.5	302.6	383.7	464.9	518.9
4.05	249.4	303.7	385.1	466.5	520.8
4.06	250.3	304.8	386.5	468.2	522.7
4.07	251.2	305.9	387.9	469.9	524.6
4.08	252.0	306.9	389.2	471.6	526.5
4.09	252.9	308.0	390.7	473.3	528.4
4.10	253.8	309.1	392.0	475.0	530.2
4.11	254.6	310.1	393.4	476.6	532.1
4.12	255.5	311.2	394.8	478.3	534.0
4.13	256.4	312.3	396.1	480.0	535.9
4.14	257.3	313.4	397.6	481.7	537.8
4.15	258.2	314.5	398.9	483.4	539.7
4.16	259.0	315.6	400.3	485.1	541.6
4.17	259.9	316.6	401.7	486.7	543.5
4.18	260.8	317.7	403.1	488.5	545.4
4.19	261.7	318.8	404.5	490.2	547.3
4.20	262.5	319.9	405.8	491.8	549.2
4.21	263.4	321.0	407.2	493.5	551.1
4.22	264.3	322.0	408.7	495.3	553.0
4.23	265.2	323.1	410.1	497.0	554.9
4.24	266.1	324.2	411.5	498.7	556.8
4.25	267.0	325.3	412.9	500.4	558.7
4.26	267.9	326.4	414.3	502.1	560.7
4.27	268.7	327.5	415.7	503.8	562.6
4.28	269.6	328.6	417.1	505.5	564.5
4.29	270.5	329.7	418.5	507.2	566.4
4.30	271.4	330.8	419.9	508.9	568.3
4.31	272.3	331.9	421.3	510.7	570.3
4.32	273.2	333.0	422.7	512.4	572.2
4.33	274.1	334.1	424.1	514.1	574.1
4.34	274.9	335.1	425.5	515.8	576.0
4.35	275.8	336.3	426.9	517.6	578.0
4.36	276.7	337.4	428.3	519.3	579.9
4.37	277.6	338.4	429.7	521.0	581.8
4.38	278.5	339.6	431.2	522.7	583.8
4.39	279.4	340.7	432.5	524.4	585.7
4.40	280.3	341.8	434.0	526.2	587.7
4.41	281.2	342.9	435.4	527.9	589.6
4.42	282.1	344.0	436.8	529.6	591.5
4.43	283.0	345.1	438.2	531.4	593.5
4.44	283.9	346.2	439.7	533.1	595.4
4.45	284.8	347.3	441.1	534.8	597.4
4.46	285.7	348.4	442.5	536.6	599.3
4.47	286.6	349.5	443.9	538.4	601.3
4.48	287.5	350.6	445.3	540.1	603.2
4.49	288.4	351.7	446.8	541.8	605.2
4.50	289.3	352.8	448.2	543.6	607.2

∕ Angka di dalam garis tebal diperoleh dari penelitian; angka yang lain dihitung dari Formula Francis: $Q = 3,33 (L - 0,2 H) H^{3/2}$
 Sumber : Bureau of Reclamation (1975)

Lampiran 5. Debit air yang keluar dari pintu air pada *Cipoletti weirs* (dalam *second-feet*) berdasarkan tinggi air masuk ke mulut pintu dan panjang dasar pintu_/

Head H, feet	Lenght of weir, L, feet						
	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
0.01	0.002	0.003	0.005	0.007	0.010	0.013	0.017
0.02	0.005	0.010	0.014	0.019	0.029	0.038	0.048
0.03	0.009	0.018	0.026	0.035	0.053	0.070	0.087
0.04	0.013	0.027	0.040	0.054	0.081	0.108	0.135
0.05	0.019	0.038	0.057	0.075	0.113	0.151	0.188
0.06	0.025	0.050	0.074	0.099	0.148	0.198	0.247
0.07	0.031	0.062	0.093	0.125	0.187	0.249	0.312
0.08	0.038	0.076	0.114	0.153	0.229	0.305	0.381
0.09	0.045	0.091	0.136	0.182	0.273	0.364	0.455
0.10	0.053	0.107	0.160	0.218	0.319	0.426	0.532
0.11	0.061	0.123	0.184	0.246	0.369	0.491	0.614
0.12	0.070	0.140	0.210	0.280	0.420	0.560	0.700
0.13	0.079	0.158	0.237	0.316	0.473	0.631	0.789
0.14	0.088	0.176	0.265	0.353	0.529	0.705	0.882
0.15	0.089	0.196	0.293	0.391	0.587	0.782	0.978
0.16	0.108	0.216	0.323	0.431	0.646	0.862	1.08
0.17	0.118	0.236	0.354	0.472	0.708	0.944	1.18
0.18	0.129	0.257	0.386	0.514	0.771	1.03	1.28
0.19	0.139	0.279	0.418	0.558	0.837	1.12	1.39
0.20	0.151	0.301	0.452	0.602	0.903	1.20	1.51
0.21	0.162	0.324	0.486	0.648	0.972	1.30	1.62
0.22	0.174	0.347	0.521	0.695	1.04	1.39	1.74
0.23	0.186	0.371	0.557	0.743	1.11	1.48	1.86
0.24	0.200	0.396	0.594	0.792	1.19	1.58	1.98
0.25	0.214	0.421	0.631	0.842	1.26	1.68	2.10
0.26	.....	0.446	0.669	0.893	1.34	1.78	2.23
0.27	.....	0.472	0.709	0.945	1.42	1.89	2.36
0.28	.....	0.499	0.748	0.998	1.50	2.00	2.49
0.29	.....	0.526	0.789	1.05	1.58	2.10	2.63
0.30	.....	0.553	0.830	1.11	1.66	2.21	2.77
0.31	.....	0.581	0.872	1.16	1.74	2.32	2.90
0.32	.....	0.609	0.914	1.22	1.83	2.44	3.05
0.33	.....	0.638	0.957	1.28	1.92	2.55	3.19
0.34	.....	0.667	1.00	1.34	2.00	2.67	3.34
0.35	.....	0.697	1.05	1.39	2.09	2.79	3.49

Lampiran 5. Lanjutan.

Head H, feet	Length of weir, L, feet				Head H, feet	Length of weir, L, feet				Head H, feet	Length of weir, L, feet			
	6.00	7.00	8.00	9.00		6.00	7.00	8.00	9.00		6.00	7.00	8.00	9.00
0.91	17.54	20.45	23.36	26.30	1.36	32.04	37.38	42.72	48.06	1.81	49.19	57.39	65.59	73.78
0.92	17.83	20.80	23.77	26.74	1.37	32.39	37.79	43.19	48.59	1.82	49.60	57.86	66.13	74.40
0.93	18.12	21.14	24.16	27.17	1.38	32.75	38.20	43.66	49.12	1.83	50.01	58.34	66.68	75.01
0.94	18.41	21.48	24.55	27.61	1.39	33.10	38.62	44.14	49.65	1.84	50.42	58.82	67.22	75.63
0.95	18.70	21.82	24.94	28.06	1.40	33.46	39.04	44.62	50.19	1.85	50.83	59.30	67.77	76.24
0.96	19.00	22.17	25.33	28.50	1.41	33.82	39.45	45.09	50.73	1.86	51.24	59.78	68.32	76.86
0.97	19.30	22.51	25.73	28.95	1.42	34.18	39.88	45.57	51.27	1.87	51.66	60.28	68.87	77.48
0.98	19.60	22.86	26.13	29.40	1.43	34.54	40.30	46.06	51.81	1.88	52.07	60.75	69.43	78.10
0.99	19.90	23.21	26.53	29.85	1.44	34.91	40.72	46.54	52.36	1.89	52.49	61.23	69.98	78.73
1.00	20.20	23.57	26.93	30.30	1.45	35.27	41.15	47.03	52.90	1.90	52.90	61.72	70.54	79.35
1.01	20.50	23.92	27.34	30.76	1.46	35.64	41.57	47.51	53.45	1.91	53.32	62.21	71.10	79.98
1.02	20.81	24.28	27.75	31.21	1.47	36.00	42.00	48.00	54.00	1.92	53.74	62.70	71.65	80.61
1.03	21.12	24.64	28.15	31.67	1.48	36.37	42.43	48.49	54.56	1.93	54.16	63.19	72.21	81.24
1.04	21.42	24.99	28.57	32.14	1.49	36.74	42.86	48.99	55.11	1.94	54.58	63.68	72.78	81.87
1.05	21.73	25.36	28.98	32.60	1.50	37.11	43.30	49.48	55.68	1.95	55.00	64.17	73.34	82.51
1.06	22.05	25.72	29.39	33.07	1.51	37.48	43.73	49.98	56.22	1.96	55.43	64.67	73.90	83.14
1.07	22.36	26.08	29.81	33.54	1.52	37.85	44.16	50.47	56.78	1.97	55.85	65.16	74.47	83.78
1.08	22.67	26.45	30.23	34.01	1.53	38.23	44.60	50.97	57.36	1.98	56.28	65.66	75.04	84.42
1.09	22.99	26.82	30.65	34.49	1.54	38.60	45.04	51.47	57.91	1.99	56.71	66.16	75.61	85.08
1.10	23.30	27.19	31.07	34.98	1.55	38.98	45.48	51.97	58.47	2.00	57.13	66.66	76.18	85.70
1.11	23.62	27.56	31.50	35.43	1.56	39.36	45.92	52.48	59.04	2.1	61.47	71.72	81.96	92.21
1.12	23.94	27.93	31.92	35.91	1.57	39.74	46.36	52.98	59.61	2.2	65.92	76.90	87.89	98.87
1.13	24.26	28.31	32.35	36.40	1.58	40.12	46.80	43.49	60.18	2.2	70.46	82.20	93.95	105.69
1.14	24.59	28.69	32.78	36.88	1.59	40.50	47.25	54.00	60.75	2.4	75.10	87.62	100.14	112.66
1.15	24.91	29.06	33.22	37.37	1.60	40.88	47.70	54.51	61.32	2.5	79.85	93.16	106.48	119.77
1.16	25.24	29.44	33.65	37.86	1.61	41.27	48.14	55.02	61.90	2.6	84.69	98.80	112.91	127.03
1.17	25.56	29.82	34.09	38.35	1.62	41.65	18.69	55.53	62.48	2.7	89.62	104.55	119.45	134.43
1.18	25.89	30.21	34.52	38.84	1.63	42.04	19.04	56.05	63.06	2.8	94.64	110.42	126.15	141.96
1.19	26.22	30.59	34.96	39.33	1.64	42.42	49.50	56.57	63.64	2.9	99.76	116.38	133.01	149.64
1.20	26.55	30.98	35.40	39.83	1.65	42.81	49.95	57.08	64.22	3.0	104.96	122.46	139.95	157.44
1.21	26.89	31.37	35.85	40.33	1.66	43.20	50.40	57.60	64.80	3.1	110.25	128.63	147.00	165.38
1.22	27.22	31.76	36.29	40.83	1.67	43.59	50.85	58.13	65.39	3.2	115.63	134.90	154.18	173.45
1.23	27.56	32.15	36.74	41.33	1.68	43.99	51.32	58.65	65.98	3.3	121.09	141.28	161.48	181.64
1.24	27.89	32.54	37.19	41.84	1.69	44.38	51.78	59.17	66.57	3.4	126.64	147.75	168.85	189.96
1.25	28.23	32.94	37.64	42.35	1.70	44.77	52.24	59.70	67.16	3.5	132.27	154.31	176.38	198.40
1.26	28.57	33.33	38.09	42.85	1.71	45.17	52.70	60.23	67.75					
1.27	28.91	33.73	38.55	43.37	1.72	45.57	53.16	60.76	68.35					
1.28	29.25	34.13	39.00	43.88	1.73	45.96	53.62	61.29	68.95					
1.29	29.60	34.53	39.46	44.39	1.74	46.36	54.09	61.82	69.54					
1.30	29.94	34.93	39.92	44.91	1.75	46.76	54.56	62.35	70.15					
1.31	30.29	35.34	40.38	45.43	1.76	47.16	55.03	62.89	70.75					
1.32	30.63	35.74	40.85	45.95	1.77	47.57	55.50	63.42	71.35					
1.33	30.98	36.15	41.31	46.48	1.78	47.97	55.97	63.96	71.96					
1.34	31.33	36.56	41.78	47.00	1.79	48.38	56.44	64.50	72.56					
1.35	31.68	36.97	42.24	47.53	1.80	48.78	56.91	65.04	73.17					

See footnote at end of table.

Lampiran 5. Lanjutan.

Head H , feet	Length of weir, L , feet			Head H , feet	Length of weir, L , feet	
	3.0	4.0	5.0		4.0	5.0
1.31	15.5	20.2	25.2	1.66	28.8	36.0
1.32	15.7	20.4	25.5	1.67	29.1	36.3
1.33	15.9	20.7	25.8	1.68	29.3	36.7
1.34	16.1	20.9	26.1	1.69	29.6	37.0
1.35	16.2	21.1	26.4	1.70	29.9	37.3
1.36	16.4	21.4	26.7	1.71	30.1	37.6
1.37	16.6	21.6	27.0	1.72	30.4	38.0
1.38	16.8	21.8	27.3	1.73	30.6	38.3
1.39	17.0	22.1	27.6	1.74	30.9	38.6
1.40	17.2	22.3	27.9	1.75	31.1	39.0
1.41	17.4	22.5	28.2	1.76	31.4	39.3
1.42	17.6	22.8	28.5	1.77	31.7	39.6
1.43	17.8	23.0	28.8	1.78	32.0	40.0
1.44	18.0	23.3	29.1	1.79	32.3	40.3
1.45	18.2	23.5	29.4	1.80	32.5	40.7
1.46	18.3	23.8	29.7	1.81	32.8	41.0
1.47	18.5	24.0	30.0	1.82	33.1	41.3
1.48	18.7	24.2	30.3	1.83	33.3	41.7
1.49	18.9	24.5	30.6	1.84	33.6	42.0
1.50	19.1	24.7	30.9	1.85	33.9	42.4
1.51	.....	25.0	31.2	1.86	34.2	42.7
1.52	.....	25.2	31.5	1.87	34.4	43.0
1.53	.....	25.5	31.8	1.88	34.7	43.4
1.54	.....	25.7	32.2	1.89	35.0	43.7
1.55	.....	26.0	32.5	1.90	35.3	44.1
1.56	.....	26.2	32.8	1.91	35.6	44.4
1.57	.....	26.5	33.1	1.92	35.8	44.8
1.58	.....	26.7	33.4	1.93	36.1	45.1
1.59	.....	27.0	33.8	1.94	36.4	45.5
1.60	.....	27.3	34.1	1.95	36.7	45.8
1.61	.....	27.5	34.4	1.96	37.0	46.2
1.62	.....	27.8	34.7	1.97	37.2	46.5
1.63	.....	28.0	35.0	1.98	37.5	46.9
1.64	.....	28.3	35.4	1.99	37.8	47.3
1.65	.....	28.5	35.7	2.00	38.1	47.6

Lampiran 5. Lanjutan.

Head H ₁ , feet	Length of weir, L, feet					Head H ₁ , feet	Length of weir, L, feet			Head H ₁ , feet	Length of weir, L, feet			
	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0		5.0	3.0	4.0		5.0	3.0	4.0	5.0
0.36	0.727	1.09	1.45	2.18	2.91	3.64								
.37	.758	1.14	1.52	2.27	3.03	3.79								
.38	.789	1.18	1.58	2.37	3.16	3.94								
.39	.820	1.23	1.64	2.46	3.28	4.10								
.40	.852	1.28	1.70	2.56	3.41	4.26								
.41	.884	1.33	1.77	2.65	3.54	4.42								
.42	.916	1.38	1.83	2.75	3.66	4.58								
.43	.948	1.42	1.90	2.85	3.80	4.75								
.44	.983	1.47	1.96	2.95	3.93	4.91								
.45	1.02	1.52	2.03	3.05	4.06	5.08								
.46	1.05	1.56	2.10	3.15	4.20	5.25								
.47	1.08	1.63	2.17	3.25	4.34	5.42								
.48	1.12	1.68	2.24	3.36	4.48	5.60								
.49	1.16	1.73	2.31	3.46	4.62	5.77								
.50	1.20	1.78	2.38	3.57	4.76	5.95								
.51	1.24	1.84	2.45	3.68	4.90	6.13	0.51	3.68	4.90	6.13	0.91	8.77	11.7	14.6
.52	1.28	1.89	2.52	3.79	5.05	6.31	.52	3.79	5.05	6.31	.92	8.91	11.9	14.9
.53	1.32	1.95	2.60	3.90	5.2	6.5	.53	3.90	5.2	6.5	.93	9.06	12.1	15.1
.54	1.36	2.00	2.67	4.01	5.34	6.68	.54	4.01	5.34	6.68	.94	9.20	12.3	15.3
.55	1.40	2.05	2.75	4.12	5.49	6.87	.55	4.12	5.49	6.87	.95	9.36	12.5	15.6
.56	1.44	2.12	2.82	4.23	5.64	7.05	.56	4.23	5.64	7.05	.96	9.50	12.7	15.8
.57	1.48	2.17	2.90	4.35	5.80	7.24	.57	4.35	5.80	7.24	.97	9.65	12.9	16.1
.58	1.52	2.23	2.97	4.46	5.95	7.44	.58	4.46	5.95	7.44	.98	9.8	13.1	16.3
.59	1.56	2.29	3.05	4.58	6.10	7.63	.59	4.58	6.10	7.63	.99	9.95	13.3	16.6
.60	1.60	2.35	3.13	4.69	6.26	7.82	.60	4.69	6.26	7.82	1.00	10.1	13.5	16.8
.61	1.64	2.41	3.21	4.81	6.42	8.02	.61	4.81	6.42	8.02	1.01	10.5	13.7	17.1
.62	1.68	2.46	3.29	4.93	6.57	8.22	.62	4.93	6.57	8.22	1.02	10.8	13.9	17.3
.63	1.72	2.52	3.37	5.05	6.73	8.42	.63	5.05	6.73	8.42	1.03	10.8	14.1	17.6
.64	1.76	2.58	3.45	5.17	6.9	8.62	.64	5.17	6.9	8.62	1.04	10.9	14.3	17.9
.65	1.80	2.65	3.53	5.29	7.06	8.82	.65	5.29	7.06	8.82	1.05	11.1	14.5	18.1
.66	1.84	2.71	3.61	5.42	7.22	9.03	.66	5.42	7.22	9.03	1.06	11.3	14.7	18.4
.67	1.88	2.77	3.69	5.54	7.38	9.23	.67	5.54	7.38	9.23	1.07	11.4	14.9	18.6
.68	1.92	2.83	3.81	5.66	7.55	9.44	.68	5.66	7.55	9.44	1.08	11.6	15.1	18.9
.69	1.96	2.89	3.90	5.79	7.72	9.65	.69	5.79	7.72	9.65	1.09	11.7	15.3	19.2
.70	2.00	2.96	3.98	5.92	7.89	9.86	.70	5.92	7.89	9.86	1.10	11.9	15.5	19.4
.71	2.04	3.02	4.06	6.04	8.06	10.1	.71	6.04	8.06	10.1	1.11	12.1	15.8	19.7
.72	2.08	3.08	4.15	6.17	8.23	10.3	.72	6.17	8.23	10.3	1.12	12.2	16.0	20.0
.73	2.12	3.15	4.24	6.30	8.4	10.5	.73	6.30	8.4	10.5	1.13	12.4	16.2	20.2
.74	2.16	3.22	4.33	6.43	8.57	10.7	.74	6.43	8.57	10.7	1.14	12.5	16.4	20.5
.75	2.20	3.28	4.42	6.56	8.76	10.9	.75	6.56	8.76	10.9	1.15	12.7	16.6	20.8
.76	2.24	3.35	4.51	6.69	8.92	11.2	.76	6.69	8.92	11.2	1.16	12.9	16.8	21.0
.77	2.28	3.41	4.6	6.82	9.10	11.4	.77	6.82	9.10	11.4	1.17	13.0	17.0	21.3
.78	2.32	3.48	4.69	6.96	9.28	11.6	.78	6.96	9.28	11.6	1.18	13.2	17.3	21.6
.79	2.36	3.54	4.78	7.09	9.46	11.8	.79	7.09	9.46	11.8	1.19	13.4	17.5	21.9
.80	2.40	3.61	4.87	7.23	9.64	12.0	.80	7.23	9.64	12.0	1.20	13.6	17.7	22.1
.81	2.44	3.68	4.96	7.36	9.82	12.3	.81	7.36	9.82	12.3	1.21	13.7	17.9	22.4
.82	2.48	3.75	5.05	7.50	10.0	12.5	.82	7.50	10.0	12.5	1.22	13.9	18.1	22.7
.83	2.52	3.81	5.14	7.64	10.2	12.7	.83	7.64	10.2	12.7	1.23	14.1	18.4	23.0
.84	2.56	3.88	5.24	7.78	10.4	13.0	.84	7.78	10.4	13.0	1.24	14.3	18.6	23.2
.85	2.60	3.94	5.34	7.92	10.6	13.2	.85	7.92	10.6	13.2	1.25	14.4	18.8	23.5
.86	2.64	4.01	5.43	8.06	10.7	13.4	.86	8.06	10.7	13.4	1.26	14.6	19.0	23.8
.87	2.68	4.08	5.53	8.20	10.9	13.7	.87	8.20	10.9	13.7	1.27	14.8	19.3	24.1
.88	2.72	4.15	5.63	8.34	11.1	13.9	.88	8.34	11.1	13.9	1.28	15.0	19.5	24.4
.89	2.76	4.22	5.73	8.48	11.3	14.1	.89	8.48	11.3	14.1	1.29	15.2	19.7	24.7
.90	2.80	4.29	5.83	8.62	11.5	14.4	.90	8.62	11.5	14.4	1.30	15.4	20.0	25.0

/ Angka di dalam garis tebal diperoleh dari penelitian; angka yang lain dihitung dengan Formula Francis: $Q = 3,367 LH^{3/2}$
 Sumber: Bureau of Reclamation (1975)

Lampiran 6. Debit air yang keluar dari pintu air pada 90° *V-notch weirs* (dalam *second feet*) berdasarkan tinggi air masuk ke mulut pintu air $_ /$

Head in feet	Discharge in second feet	Head In feet	Discharge in second feet	Head In feet	Discharge in second feet
0.20	0.46	0.55	0.564	0.90	1.92
.21	.052	.56	.590	.91	1.97
.22	.058	.57	.617	.92	2.02
.23	.065	.58	.644	.93	2.08
.24	.072	.59	.672	.94	2.13
.25	.080	.60	.700	.95	2.19
.26	.088	.61	.730	.96	2.25
.27	.096	.62	.760	.97	2.31
.28	.106	.63	.790	.98	2.37
.29	.115	.64	.822	.99	2.43
.30	.125	.65	.854	.100	2.49
.31	.136	.66	.887	.101	2.55
.32	.147	.67	.921	.102	2.61
.33	.159	.68	.955	.103	2.68
.34	.171	.69	.991	.104	2.74
.35	.184	.70	1.03	.105	2.81
.36	.197	.71	1.06	.106	2.87
.37	.211	.72	1.10	.107	2.94
.38	.226	.73	1.14	.108	2.01
.39	.240	.74	1.18	.109	3.08
.40	.256	.75	1.22	.110	3.15
.41	.272	.76	1.26	.111	3.22
.42	.289	.77	1.30	.112	3.30
.43	.306	.78	1.34	.113	3.37
.44	.324	.79	1.39	.114	3.44
.45	.343	.80	1.43	.115	3.52
.46	.362	.81	1.48	.116	3.59
.47	.382	.82	1.52	.117	3.67
.48	.403	.83	1.57	.118	3.75
.49	.424	.84	1.61	.119	3.83
.50	.445	.85	1.66	.120	3.91
.51	.468	.86	1.71	.121	3.99
.52	.491	.87	1.76	.122	4.07
.53	.515	.88	1.81	.123	4.16
.54	.539	.89	1.86	.124	4.24
.....	.....	.....	.....	.125	4.33

$_ /$ Dihitung dengan Formula Cone: $Q = 2,49 H^{2,48}$

Sumber : Bureau of Reclamation (1975)

Lampiran 7. Terjemahan +)

Gambar 2

precipitation	= curah hujan
transpiration and evaporation	= transpirasi dan evaporasi
surface run off	= aliran air permukaan
lake	= danau
infiltration	= infiltrasi
absorption	= absorpsi
deep drainage	= drainase dalam (bawah permukaan lapisan perakaran)
ground water	= air dalam tanah
impermeable horizon	= horizon (lapisan tanah) yang kedap air tidak tembus air seperti infiltrasi atau (drainase dalam)

Gambar 5

river	= sungai
irrigation canal	= saluran (kanal) air irigasi
water table	= permukaan air tanah
drainage creek	= saluran drainase (alami atau buatan)
lighter soils	= tanah bertekstur lebih ringan
heavier soils	= tanah bertekstur lebih berat

Gambar 10

reservoir or canal	= sumber penyediaan air natural (alami) atau buatan berupa saluran (penyalur air dari sumber air)
full pressure gravity pipe distribution system	= sistem pendistribusian (air) dengan pipa yang airnya mengalir dengan tekanan gravitasi penuh
plan	= rencana (perencanaan atau rancang bangun)
hydraulic gradient minimum demand	= tingkatan hidraulik (ketinggian dari sasaran irigasi minimum) berdasarkan kebutuhan (air) minimal
hydraulic gradient maximum demand	= tingkatan hidraulik (ketinggian dari sasaran irigasi maksimum) berdasarkan kebutuhan (air) maksimal
natural ground surface	= permukaan dasar tanah alami
profile	= profil (rancang bangun dasar)
farm delivery with throttling valve and meter	= bentuk penyaluran air terkendali dengan alat pengontrol yang dilengkapi pengukur (meter)
sectionalizing valve fully open except when shut for emergency valve repair to laterals	= pengatur pembagian air yang terbuka, kecuali ditutup saat perbaikan alat secara mendadak untuk pembagian air melalui saluran pembagi

Gambar 11 (terjemahan Gambar 10 tidak diulang)

open gravity pipe distribution system	= sistem pendistribusian (air) melalui pipa dengan tekanan gravitasi secara terbuka
throttled head	= tinggi pengaturan (air)
weir overall	= pintu pembagi utama (ditinggikan untuk memperbesar tekanan air)
waste pipe	= pipa pembuangan
profile with baffle controls	= profil (penyaluran air melalui pipa) dilengkapi dengan pengendali saluran (air)
lateral turnout throttling valve and meter	= pengatur pembagian air lateral melalui saluran dilengkapi alat pengukur dan meter
check device open to air with baffle on throttling gate	= alat pengawasan yang terbuka (ke udara) dengan pengontrol pada pintu
overflow waste stand	= pintu pengeluaran kelebihan penyaluran

Gambar 12

(terjemahan dalam Gambar 10 dan Gambar 11 tidak diulang)

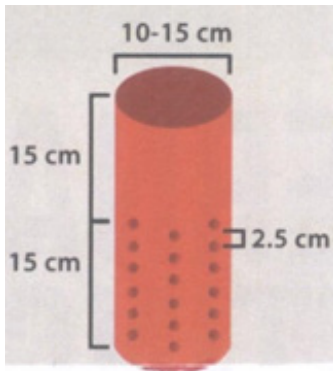
source (reservoir, river, canal)	= sumber air, (waduk, sungai, atau kanal)
dike	= tanggul
travelling weed screen	= penyaringan rerumputan yang terangkut air

venturi measurement	= silindir ukuran pendek dilengkapi alat pengukur
recirculating pump for high land	= sirkulasi berulang pompa (air) untuk mengairi lahan (pertanaman) pada lokasi yang tinggi
recirculating stand	= penampungan air yang dipompakan ke atas (sirkulasi)
natural ground surface	= permukaan lahan alami
service area for pumping	= area yang akan diairi dengan pompa hydraulic gradient, minimum demand (lihat Gambar 10), hydraulic gradient, maximum demand.
gravity service area	= area yang akan diairi secara gravitasi
hydraulic gradient all pumps running	= tingkatan hidraulik, semua pompa beroperasi, kecuali pompa pengatur
hydraulic gradient except regulator pump running	= tingkatan hidraulik, semua pompa dioperasikan kecuali pompa pengatur
hydraulic gradient for design discharge all sub-lateral	= tingkatan hidraulik yang dirancang untuk penyaluran (air) ke semua saluran kuarter (sub-lateral)
gravity pipeline	= pipa penyaluran air secara gravitasi

Gambar 13

- elevated tank = tangki penampung air yang ditinggikan
- service area high lift = area sasaran irigasi yang letaknya tinggi
- service area middle lift = area sasaram irigasi yang letaknya ditengah
- service area low lift = area sasaran irigasi yang letaknya rendah
- head equivalent to 40 to 60 psi minimum = ketinggian sama dengan minimum 40-60 psi
- +) Bagian-bagian dari sistem irigasi tidak diterjemahkan langsung karena terjemahan bebasnya panjang (agar dipahami oleh pembaca)

Lampiran 8.



Piezometer terbuat dari pipa PVC untuk mengukur permukaan air tanah

- pancang 30 cm; diameter 10-15 cm
- pipa sepanjang 30 cm ini ditanamkan ke dalam tanah diantara 4 rumpun tanaman padi sedalam 15 cm; bagian pipa yang masuk ke dalam tanah dilubangi (perforated); jarak antar 2 lubang vertikal 2,5 cm.

Petunjuk pelaksanaan:

- (1) Dua minggu setelah bibit ditanam biarkan petak pertanaman mengering secara gradual.
- (2) Ketika muka air tanah di dalam pipa turun sampai kedalaman 15 cm (sekitar 6 lubang secara vertikal) air irigasi dimasukkan ke dalam petakan sawah sampai dalam genangan air sekitar 5 cm; demikian seterusnya, basah-kering berlangsung.
- (3) Perhatikan: petakan digenangi sedalam 5 cm satu minggu sebelum tanaman padi berbunga sampai satu minggu setelah berbunga.
- (4) Interval basah-kering antara 2-10 hari bergantung kepada tekstur tanah (tekstur ringan interval pendek 2 hari; tekstur berat interval panjang 10 hari).
- (5) teknik irigasi bergilir seperti ini (*intermittent irrigation technique*) menghemat air irigasi sampai 30%

Sumber: IRRI: <http://www.knowledge.irri.org/>

index

A

- air v, vi, viii, xi, xii, xv, xvi, xvii, xviii, xix, xxv, xxvi, xxvii, xxix, xxx, xxxi, 1, 2, 3, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 145, 146, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 157, 158, 168, 179, 181, 189, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199
- air irigasi v, vi, viii, xv, xxv, xxvi, 1, 2, 3, 44, 46, 47, 48, 55, 57, 64, 65, 67, 69, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 81, 83, 84, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 98, 101, 119, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 151, 152, 153, 157, 158, 168, 194, 199
- air tanah vi, xv, xviii, xxv, 3, 13, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 41, 46, 49, 57, 60, 61, 63, 68, 69, 85, 86, 92, 99, 101, 135, 194, 198, 199
- air tersedia 28, 85
- arus air 123, 125, 129
- asam nukleus vi, xv, xviii, xxv, 3, 13, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 41, 46, 49, 57, 60, 61, 63, 68, 69, 85, 86, 92, 99, 101, 135, 194, 198, 199
- asam organik 14
- atom hidrogen 11, 12, 32

B

- Blaney-Criddle 50, 53
- blok irigasi xxx, 87
- bor tanah 32

C

calcium carbide 32
cekaman vi, 8, 35, 36, 37, 85,
86, 106, 111, 158
consumptive use of water 57
continuous flow 74, 75, 92
curah hujan xxvi, xxxi, xxxii,
1, 7, 8, 27, 30, 41, 43, 46,
47, 56, 57, 64, 65, 69, 78,
97, 104, 105, 106, 109, 110,
111, 112, 113, 115, 121,
145, 149, 151, 194

D

danau 30, 43, 64, 67, 194
DAS xxix, xxxi, 2, 31, 44, 68,
69, 70, 77, 139, 140
debit air xxxi, 3, 42, 43, 57, 61,
65, 66, 69, 81, 85, 90, 119,
120, 121, 122, 123, 125,
126, 127, 129, 130, 131,
139
degree-day 85, 86
demand 74, 75, 77, 78, 134, 195,
197
difusi xvi, 10, 18, 19, 33, 63
distribusi xxxi, 1, 73, 76, 110,
111, 112, 129, 133, 134,
136, 145
Ditjen 168
diversifikasi xxx, 70
drainase 24, 42, 97, 112, 116,
145, 146, 149, 150, 151,
194

E

efisiensi xxv, xxvi, 1, 37, 42, 47,
64, 65, 66, 67, 69, 73, 77,

79, 93, 96, 97, 136, 152,
154, 155, 158

ekologi 7, 90
ekoregional xxx, 2, 70, 71
elektron 11, 12
El Nino viii, 1, 42, 83, 111, 139,
157, 161
embung xii, xxvi, 1, 3, 41, 44,
56, 63, 64, 67, 69, 70, 74,
97, 100, 102, 103, 108, 112,
113, 114, 115, 116, 117,
121, 129, 138, 151, 158
evapotranspirasi xv, 8, 35, 47,
48, 49, 50, 65, 105, 106

F

fisik xxv, xxvi, xxix, 11, 12, 13,
21, 29, 65, 103, 104, 145,
149
Fisiologi xxi, 4, 5, 7
fotosintesis 8, 10, 13, 36, 54, 60,
61, 154

G

generatif 60, 61, 93, 107
gogorancah xxvi, 106, 107, 108,
111, 112, 113
GRK vi, 2, 95, 96, 138
GWP xxvi, 95, 96

K

kapasitas penetralan 23
kebutuhan air v, xv, 3, 45, 46,
47, 57, 61, 76, 81, 97, 98,
114, 115, 133, 134, 135,
139, 151, 153
kemarau viii, 2, 7, 35, 42, 45,
73, 83, 91, 111, 157

Kementerian Pekerjaan Umum
dan Perumahan Rakyat
45
kerapatan air 12
ketahanan 3, 34, 36, 69, 105
KISS 2, 3, 67, 71
koefisien difusi 18
konduktivitas hidrolis xvi
konsep pasten 133, 134, 138
konstanta 13, 15, 16, 18, 51, 53,
178
KP. Jakena 95
KP. Sukamandi xxvii, 91, 153
KTK xxv, 23, 104

L

lahan xii, xxvi, xxvii, xxx, xxxi,
xxxii, 1, 24, 30, 37, 41, 42,
44, 45, 46, 47, 61, 62, 63,
64, 65, 69, 70, 71, 74, 78,
88, 89, 98, 99, 100, 101,
103, 104, 106, 107, 108,
112, 113, 115, 116, 117,
119, 121, 128, 129, 133,
136, 138, 141, 143, 144,
145, 146, 147, 148, 154,
197
La Nina 1
lingkungan xiii, xxix, 8, 9, 10,
11, 36, 71, 90, 107, 114,
207
lunak xvi, 7, 9
lysimeter 57, 61

M

Manning's Formula 150
massal 18, 34, 49, 102
matrik xvi, 26, 33, 63

metabolisme 8, 10, 18, 19, 36,
48, 60
Metode Irigasi xxii, 61
minapadi xxvi, 94
molar xvii, 14, 15, 16
molekul xv, xviii, 10, 11, 12, 13,
16, 17, 18, 47, 48
mulut daun 9, 34, 36, 76

N

neraca air xxix, 30, 31
neraca hara 109
Neraca lahan sawah xxvii, 144
nukleus 10, 11

O

organik xvi, xxvi, 14, 21, 22, 23,
30, 56, 88, 89, 90, 96, 104,
107, 108, 112, 152
Organisasi 137, 138, 208
organ tanaman 8
osmosis xvi, xviii, 15, 18, 26,
28, 35, 92

P

P3A-Mitra cai 158
Pekalen Sampean 133, 134,
135, 170
pelarut xvi, 8, 13, 14, 30
pemanasan spesifik 12
pencetakan sawah 143, 144
pendinginan 12
penguapan 10, 12, 18, 27, 30,
34, 35, 49, 51, 53, 64
Penman 49, 51, 52, 53
PERAGI 2, 3, 168, 169, 170
PERHIMPI 2, 3, 168, 169, 170,
171, 208

perkolasi xxix, 24, 27, 47, 55,
59, 60, 64, 65, 97, 113, 114,
134, 149
permeabilitas xvi, 19, 103
petakan pergiliran xxx, 81, 87
Piezometer xxix, 58, 59, 61, 198
pintu air (weir) 125
pipanisasi xxx, 98, 99, 130
pola tanam xii, 30, 42, 56, 57,
63, 73, 83, 102, 104, 105,
108, 109, 110, 112, 133,
134, 135, 136, 151, 158
pompanisasi 46, 63, 128, 129
potensi xvii, xviii, 16, 17, 18,
19, 26, 28, 29, 33, 34, 35,
36, 46, 92, 95, 133, 138
Prinsip Irigasi xxii, 46
program intensifikasi viii, 1,
41, 144, 157
protoplasma xvi, xix, 10, 17,
19, 36
Proyek Irigasi xxvi, 135

R

rancang bangun 195
ratio transpirasi xviii
reproduktif 37, 111
retensi 25, 26
RIR xxvi, 134, 135
River Project 96, 97
Rotational Irrigation 160, 162
run-off 30, 65, 113, 115, 162
RWS xxv, xxx, 82, 83, 134, 161,
162, 163

S

saluran xvi, xxxi, 3, 31, 42, 43,
44, 45, 65, 66, 69, 73, 74,

75, 76, 77, 78, 79, 81, 82,
87, 98, 103, 112, 120, 121,
122, 123, 124, 125, 127,
128, 129, 133, 134, 136,
145, 146, 150, 151, 157,
158, 194, 195, 196, 197
Seepage 55, 65
Siklus xxix, 31
Sistem irigasi 42, 46, 74
skala miring xxix, 58, 60
soil sickness 88
SRI xxiii, 88, 89, 90, 95, 96, 165,
170, 171
Stress day 84, 93, 136, 161
Struktur 21, 24, 26
Suhu 8, 48
sungai xxx, xxxi, 1, 2, 30, 31,
43, 44, 45, 46, 51, 64, 67,
68, 69, 77, 81, 86, 90, 97,
103, 119, 120, 128, 129,
138, 139, 146, 150, 194,
196
supply 75, 77, 78, 134, 159, 162,
171

T

tegangan permukaan 12, 178
Tekanan 14, 15
teknologi budidaya xiii, xxvi,
95, 99, 144, 151, 152, 157
Teknologi PTT 95
tekstur xxv, xxx, 22, 24, 29, 56,
62, 77, 84, 116, 199
Titik layu 27, 29
transpirasi xv, xviii, xix, xxix,
8, 9, 18, 30, 33, 34, 35, 47,
48, 49, 59, 60, 76, 97, 194
transportasi 10, 14

turgor xviii, xix, 9, 36

U

uap xviii, xix, 14, 15, 16, 17, 26,
33, 48, 49, 52, 53

Upper Pampanga xxvi, 88, 96,
97

V

van den Hornet 34

Van't Hoff 15

viskositas 12, 178

W

waduk viii, xxx, 1, 2, 30, 31, 41,
44, 51, 64, 67, 69, 70, 74,
76, 81, 86, 97, 98, 99, 100,
103, 113, 119, 120, 128,
129, 138, 196

RIWAYAT HIDUP PENULIS



ACHMAD MUDZAKKIR FAGI: Lahir di Sumenep, Madura pada 09 Juli 1940 dari keluarga petani dan pedagang di lingkungan santri. Gelar BS (Sarjana Muda) diperoleh dari Akademi Pertanian, Ciawi, Bogor pada tahun 1962. Pada tahun 1974 mendapat beasiswa dari USAID melalui IRRI (*International Rice Research Institute*) untuk mengikuti program MSc dan PhD dari University of the Philippines at Los Banos. Gelar PhD dicapai pada tahun 1980.

Sekembalinya dari Filipina penulis bergabung dengan Balai Penelitian Tanaman Pangan Sukamandi (Balittan Sukamandi) dan memimpin Balittan ini pada periode 1988-1994, kemudian ditugasi untuk memimpin Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan (Puslitbangtan) pada periode 1995-1998; terakhir ditunjuk sebagai Sekretaris Badan Litbang Pertanian pada periode 1999-2000.

Setelah menyelesaikan tugas sebagai Sekretaris Badan Litbang Pertanian, Penulis bergabung dengan Tim Anjak (Analisis Kebijakan), di Badan Litbang Pertanian dan di Puslitbangtan. Anggota Tim Anjak Badan Litbang Pertanian ialah Dr. Faisal Kasyoro, Dr. Effendy Pasandaran dan Dr. Erwidodo.

Keanggotaan dan kegiatan dalam organisasi profesional non-struktural baik yang bertaraf nasional maupun internasional yang

lintas disiplin ilmu dari tahun 1980-an sampai 2000-an memperkaya wawasan penulis bukan hanya yang berkaitan dengan soil, crop and water sciences, tetapi juga dalam disiplin ilmu sosial, ekonomi dan kelembagaan. Semua itu penulis peroleh karena berstatus pegawai negeri sipil (peneliti) pada Badan Litbang Pertanian, Kementerian Pertanian. Organisasi non-struktural dimana penulis berpartisipasi, adalah:

- Nasional : anggota Dewan Riset Nasional, anggota Kelompok Kerja Ahli Dewan Ketahanan Pangan Nasional, pengurus PERHIMPI (Perhimpunan Meteorologi Pertanian Indonesia), pengurus YAPADI (Yayasan Padi Indonesia, anggota Tim Evaluator Ijazah S2/S3 (luar negeri).
- Internasional : Global Steering Committee of Alternative Slash and Burn (ICRAF), anggota IRRI Board of Trustees (IRRI), koordinator farming system research (FAO) di Indonesia, principle scientist penelitian emisi gas rumah kaca (IRRI-UNDP), penanggung jawab penelitian ABSP (*Agricultural Biotechnology for Sustainable Productivity* (Michigan State University), konsultan kegiatan CIIFAD di Filipina (Cornell University), konsultan/evaluator penelitian tikus ACIAR di CSRIO (Australia), Indonesia, Thailand, Laos, Vietnam dan Philippines (IRRI), anggota Technical Advisory Board for FFBB, USA (2016 sampai buku ini diterbitkan).

TEORI DAN PRAKTEK IRIGASI PADA PADI SAWAH

Penerapan Konsep Ekoregional dalam Pengelolaan Air untuk Pertanian



Aspek fisiologi air dikupas dalam buku ini agar pembaca dari berbagai disiplin ilmu dapat memahami mengapa pertumbuhan tanaman menjadi terhambat dan hasil panennya menurun apabila kekurangan air. Aspek teknik dalam efisiensi penggunaan air dijawab dengan **teknik irigasi bergilir** (*rotational irrigation techniques/intermittent*) yang terbukti mampu membuat penggunaan air lebih efisien serta berkontribusi dalam menekan emisi gas rumah kaca. Keberhasilan peningkatan produksi padi, merupakan kontribusi dari penggunaan varietas unggul baru, irigasi, dan pemupukan, dimana irigasi berkontribusi sekitar 26%. Pembangunan waduk-waduk baru, rehabilitasi dan perluasan jaringan irigasi bertujuan untuk menstabilkan laju kenaikan produksi padi karena akan menambah luas area tanam dan panen pada musim kemarau. Contoh-contoh yang disampaikan merupakan hasil penelitian yang telah luas dipergunakan sebagai petunjuk teknis. Penerbitan buku ini juga sebagai rangkaian kegiatan dalam memperingati 100 tahun Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan yang didirikan pada 1918 dengan nama *Algemeen Proefstation voor de Landbouw*. Selama kurun waktu 100 tahun, perkembangan lembaga riset ini begitu dinamis dalam menghadapi dinamika perubahan lingkungan strategis. Buku ini juga mendukung upaya Pemerintah cq. Kementerian Pertanian dalam upaya perluasan area tanam dan area panen komoditas yang bernilai strategis dari segi sosial, ekonomi dan politik yaitu tanaman padi, jagung, dan kedelai.



Sekretariat Badan Litbang Pertanian
Jl. Ragunan No. 23 Pasar Minggu, Jakarta 12540
Telp. (021) 7806202, Fax. (021) 7800644
Website : www.litbang.pertanian.go.id
email : iaardpress@litbang.pertanian.go.id

Pertanian

ISBN 978-602-344-244-7



9 786023 442447