

RANCANG BANGUN SISTEM OTOMATISASI IRIGASI PIPA LAHAN SAWAH BERBASIS TENAGA SURYA

DESIGN OF AUTOMATIC PIPE IRRIGATION SYSTEM IN PADDY FIELD BASED ON SOLAR POWER

Oleh:

Sudirman Sirait¹⁾, Satyanto K. Saptomo²⁾, M. Yanuar J. Purwanto²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan SPs Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Indonesia

²⁾Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Indonesia

Komunikasi penulis, Hp : +62 852 6031 9906; email : sudirsirait@apps.ipb.ac.id,
sudirman.sirait@yahoo.co.id

Naskah ini diterima pada 3 Maret 2015; revisi pada 23 Maret 2015;
Disetujui untuk dipublikasikan pada 14 April 2015

ABSTRACT

Design of optimum irrigation equipped by an automatic control system can keep the water level in the soil at a certain level according to the needs of plants, It can increase the productivity and efficiency of irrigation water use in paddy fields. Automatic control system was constructed by utilizing digital technology, microcontroller and sensor networks. Arduino Uno ATmega328P microcontroller was used as an automatic controller to operate electrical valve Valworx 561086 based on soil moisture conditions and water level in paddy fields determined by sensor. Water level of the field was set at a range of 0 to 5 cm setpoint reference to operate electrical valve Valworx 561086. System microcontroller limits the duration of time for setting the opening and closing electrical valve Valworx 561086 for 300 seconds with a rotation of 90° that can reduce battery consumption. The system is operated by solar energy, which consists of solar panel, charge controller and battery, and can be operated for 24 hours without operators attending. Irrigation system test was operated by applying intermittent irrigation and water did not flow continuously in paddy field. The result shown that the automatic irrigation system can keep the water level in paddy fields between the desired setpoint range.

Keywords : Automatic irrigation, paddy field, pipe irrigation, setpoint, water level, water productivity

ABSTRAK

Rancangan irigasi untuk pemberian air yang optimal dilengkapi dengan sistem kontrol otomatis dapat menjaga permukaan air di lahan sawah pada level tertentu sesuai kebutuhan tanaman, dapat meningkatkan produktivitas dan efisiensi penggunaan air irigasi di lahan sawah. Sistem kontrol otomatis dibangun dengan memanfaatkan teknologi digital, mikrokontroler dan jaringan sensor. Mikrokontroler Arduino Uno ATmega328P digunakan sebagai sistem kendali otomatis untuk menggerakkan sistem aktuasi kran air listrik Valworx 561086 berdasarkan kelembaban tanah dan tinggi muka air di lahan sawah yang dideteksi oleh sensor. Nilai tinggi muka air di lahan sawah diatur antara 0 cm dan 5 cm sebagai setpoint bawah dan atas untuk acuan dalam menggerakkan sistem aktuasi kran air listrik Valworx 561086. Sistem mikrokontroler membatasi durasi waktu untuk pengaturan pembukaan maupun penutupan kran air listrik Valworx 561086 selama 300 detik dengan rotasi 90° yang dapat menghemat penggunaan daya baterai. Sistem ini didukung oleh energi surya yang terdiri dari panel surya, *charger controller* dan baterai, dan dapat beroperasi 24 jam tanpa pengawasan oleh operator. Ujicoba operasi di lahan sawah dilakukan dengan menerapkan irigasi terputus (*intermittent*) dan air irigasi tidak mengalir secara terus menerus. Hasil percobaan menunjukkan bahwa sistem kontrol irigasi otomatis bisa menjaga tinggi muka air di lahan sawah antara rentang *setpoint* yang diinginkan.

Kata kunci: Irigasi otomatis, irigasi pipa, produktivitas air, sawah, setpoint, tinggi muka air

I. PENDAHULUAN

Kondisi sumberdaya air yang terbatas dan telah mengalami gangguan akibat perubahan iklim serta adanya degradasi lingkungan menyebabkan kebutuhan air untuk kepentingan pertanian semakin kompetitif. Kondisi ini dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara ketersediaan dan kebutuhan air tanaman. Masalah kekurangan atau kelebihan air akan menyebabkan tanaman tidak dapat tumbuh dan berproduksi secara optimum. Mengatasi masalah kekurangan air untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi penggunaan air irigasi diperlukan penerapan teknologi pengelolaan irigasi yang efektif dan efisien, sehingga penggunaan air irigasi per satuan berat produk pertanian yang dihasilkan semakin kecil. Menurut Molden dan Oweis (2007) bahwa *water productivity* untuk tanaman padi adalah 0,15–1,6 kg/m³, gandum 0,2–1,2 kg/m³, jagung 0,30–2,00 kg/m³ dan sayuran sebesar 3–20 kg/m³. Rata-rata produktivitas air yang dikonsumsi untuk sistem perkebunan dan peternakan di BCS-India adalah 1,36 kg/m³, sedangkan di LJCS-Pakistan sebesar 1,37 kg/m³. Sedangkan rata-rata produktivitas air selain bidang perkebunan dan peternakan lebih tinggi untuk BCS-India yaitu 1,47 kg/m³ dibandingkan dengan LJCS-Pakistan yaitu 1,11 kg/m³ (Hussain *et al.*, 2003).

Salah satu teknologi pengelolaan irigasi yang efektif dan efisien adalah menjaga tinggi muka air di lahan sawah sesuai dengan yang diinginkan. Pengaturan tinggi muka air di lahan sawah tidak mungkin jika dilakukan dengan cara manual dan sistem buka-tutup pintu air yang selama ini banyak dipakai (Hardjoamidjojo dan Setiawan, 2001; Tusi, 2010). Pengaturan tinggi muka air dipengaruhi langsung oleh hujan dan kondisi iklim mikro serta proses evapotranspirasi yang bervariasi dengan jenis tanaman dan waktu. Oleh karena itu, desain sistem irigasi dengan memanfaatkan teknologi otomatis menjadi satu alternatif yang dapat meningkatkan produktivitas dan efisiensi penggunaan air irigasi di lahan sawah.

Penggunaan sistem kontrol otomatis di bidang irigasi memiliki dampak yang besar pada peningkatan sistem irigasi dan efisiensi penggunaan sumber daya air serta dapat menjaga permukaan air di lahan pada level tertentu sesuai kebutuhan tanaman (Lozano *et al.*, 2010; Cahyo, 2011; Sofiyuddin *et al.*, 2011; Romero *et al.*, 2012; Choir, 2012; Saptomo *et al.*, 2013; Coates *et al.*, 2013; Sánchez-Molina *et al.*, 2015). Berbagai ujicoba dan penelitian telah dilakukan untuk menemukan teknologi pengelolaan air di sektor

pertanian khususnya lahan sawah. Salah satu teknologi yang dapat digunakan adalah otomatisasi irigasi sistem perpipaan. Dalam penelitian ini dikembangkan rancangan otomatisasi irigasi pipa lahan sawah dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno ATmega328P dengan acuan kendali *water level* untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi penggunaan air irigasi di lahan sawah.

Tujuan Penelitian ini adalah mengembangkan teknologi irigasi otomatis dengan acuan kendali tinggi muka air di lahan sawah untuk pengaturan rotasi kran air elektrik Valworx 561086 sebesar 90° dan melakukan pengujian pada jaringan irigasi sistem perpipaan di lahan sawah.

Penelitian ini difokuskan pada pengembangan sistem kontrol otomatis untuk menggerakkan sistem aktuasi kran air elektrik Valworx 561086 dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno ATmega328P dan perancangan sistem perpipaan untuk jaringan irigasi otomatis di lahan sawah.

Teknologi irigasi otomatis dapat digunakan untuk mempermudah pengaturan tinggi muka air di lahan sawah, meningkatkan efisiensi penggunaan air irigasi dan efisiensi tenaga kerja.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pertumbuhan dan perkembangan tanaman bisa terhambat atau terganggu karena kebutuhan air pada tanaman tidak tercukupi atau keberadaan air tanah yang berlebihan. Produksi hasil pertanian akan menurun jika tanaman mengalami cekaman air (*water stress*) (Nikolidakis *et al.*, 2015). Menurut Purwanto dan Badrudin (1999); Winarbawa (2000); Adams *et al.* (2011) bahwa berkurangnya kelembaban tanah dan kekurangan air bagi tanaman untuk melangsungkan proses evapotranspirasi akan menghambat pertumbuhannya serta dapat mengakibatkan kekeringan bahkan kematian tanaman. Salah satu cara penyediaan kebutuhan air oleh tanaman untuk meningkatkan produksi hasil pertanian adalah sistem irigasi. Siebert dan Doll (2010) memperkirakan bahwa rata-rata hasil produksi tanaman biji-bijian dengan sistem irigasi adalah 4,4 ton/ha, sedangkan dengan sistem tadah hujan sebesar 2,7 ton/ha. Sebesar 42% dari hasil produksi tanaman biji-bijian pada umumnya berasal dari lahan irigasi dan tanpa sistem irigasi hasil produksi akan menurun sebesar 20%.

Sistem irigasi yang dilengkapi dengan sistem kontrol otomatis dapat menjaga tinggi muka air (*water level*) di lahan pada level tertentu.

Pengaturan muka air (*water level*) di lahan sawah dengan kontrol otomatis merupakan suatu upaya yang dilakukan untuk menjaga kondisi kelembaban tanah sebagai media tumbuh tanaman agar tidak sampai mengalami kekeringan dan kelebihan air serta cukup bagi lahan untuk terhindar dari kekeringan (Saptomo *et al.*, 2004; Arif *et al.*, 2009; Rochiyat, 2012; Rizal, 2012). Pengaturan *water level* antara -10 cm sampai 2 cm pada irigasi permukaan dapat menjaga kelembaban tanah di lahan sawah berada pada kondisi pF dibawah 2 yang berarti tanah berada pada kondisi jenuh atau macak-macak dan tidak kekurangan air (Saptomo *et al.*, 2012). Menurut Saptomo *et al.* (2013) bahwa pengkondisian lengas tanah volumetrik diantara 38,5% dan 28,7% sebagai acuan untuk mengoperasikan *solenoid valve* pada irigasi curah dapat mencegah kekurangan air dan sekaligus menghindari perkolasi.

Sistem irigasi perpipaan yang terdiri dari pipa utama, pipa *monifold*, pipa *lateral* dan *valve line* dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air irigasi di lahan sawah serta dapat mengurangi tingkat kehilangan air akibat evaporasi, infiltrasi, perkolasi, *run off* maupun *seepage*. Analisis hidraulik sistem perpipaan dapat dilakukan untuk menentukan rancangan jaringan irigasi perpipaan, debit aliran dan *head loss*.

$$Q = A v \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- Q : debit aliran (m³/d)
- A : luas penampang saluran (m²)
- v : kecepatan aliran (m/s)

Persamaan kontinuitas dapat digunakan untuk menghitung nilai debit aliran pada jaringan irigasi (Kodoatie, 2005). Menurut Sulistiono (2013) bahwa irigasi dengan penyaluran tertutup menggunakan pipa sangat memungkinkan terjadinya sedimentasi di dalam pipa. Faktor kecepatan aliran di dalam pipa sangat berpengaruh terhadap laju sedimentasi yang terjadi, karena semakin rendah kecepatan aliran di dalam pipa maka semakin tinggi laju sedimentasi yang terjadi di dalam pipa. Kecepatan aliran dalam pipa ditentukan dengan menggunakan persamaan Hazen-William (Triatmodjo, 2013) berikut:

$$v = 0,354 C_H I^{0,54} D^{0,63} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- v : kecepatan (m/s)
- C_H : koefisien Hazen-William
- I : kemiringan garis tenaga hf/L
- D : diameter pipa (m)

Kecepatan aliran dalam pipa juga dipengaruhi oleh *head loss* akibat gesekan, perubahan penampang pipa, dan *accessories* pipa. *Head loss* melalui pipa dapat ditentukan dengan persamaan Darcy-Weisbach (Kodoatie, 2005; Maryono, 2003; Munson, 2003; Triatmodjo, 2013) berikut:

$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

- h_f : kehilangan energi (m)
- f : faktor gesek
- L : panjang pipa (m)
- D : diameter pipa (m)
- v : kecepatan aliran (m/s)
- g : percepatan gravitasi (9.8 m/s²).

Sistem kendali atau sistem kontrol (*control sistem*) adalah suatu alat (kumpulan alat) untuk mengendalikan, memerintah, dan mengatur keadaan dari suatu sistem. Sistem kontrol otomatis dilengkapi dengan elemen pengukuran yaitu sensor. Sensor yang digunakan untuk mengukur tinggi muka air adalah *eTape Continuous Fluid Level Sensor* PN-12110215TC-12. Sensor yang digunakan untuk mengukur tingkat kelengasan tanah adalah *Vegetronix VH400* (Sudha *et al.* 2011).

III. METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan di lahan percobaan IPB Desa Cikarawang, Dramaga, Bogor. Penelitian ini dibagi ke dalam beberapa tahapan, yaitu analisis sistem, perancangan sistem kontrol otomatis dan jaringan irigasi sistem perpipaan, pengujian dan percobaan lapang, serta analisis hasil percobaan lapang.

3.1. Analisis Sistem

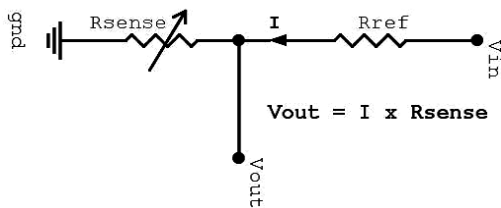
Pada tahap ini dilakukan analisis yang mencakup segala kebutuhan dalam membangun sistem teknologi otomatis irigasi dengan mengidentifikasi masalah yang meliputi model rancangan dan sistem hidraulik pipa pada jaringan irigasi, rangkaian *hardware* sistem kontrol otomatis, sensor *water level* untuk mengukur tinggi muka air di lahan percobaan, sensor *soil moisture* untuk mendeteksi nilai kadar air tanah, *solar charge controller* dan baterai serta perangkat elektronika sebagai pendukung sistem kontrol irigasi otomatis di lahan sawah dengan pemanfaatan energi surya.

3.2. Perancangan Sistem Kontrol Otomatis

Tahap perancangan yang dilakukan adalah perancangan *software* dan perancangan *hardware*. Pada tahap perancangan *software* dilakukan pembuatan dan penyesuaian program

untuk melakukan serangkaian pengujian sistem otomatis. Penulisan program kendali ditulis di halaman Arduino Uno. Bahasa pemrograman didasarkan pada bahasa pemrograman C/C++. Pada tahap perancangan *hardware* terdiri atas sensor *water level*, sensor *soil moisture*, mikrokontroler Arduino Uno ATmega328P, kran air listrik Valworx 561086, baterai DC 12 volt, *relay*, *panel surya* dan *solar charge controller*, *terminal barrier*, modul *RTC* dan *micro SD*.

Sensor *water level* memiliki empat pin yang memiliki fungsi masing-masing. Pin 1 merupakan V_{in} , pin 2 merupakan ground dan V_{out} merupakan penggabungan pin 3 dan pin 4. Sensor *water level* yang digunakan pada penelitian ini sebanyak 2 buah yang digunakan untuk kontrol dan *monitoring* tinggi muka air di lahan percobaan. Setiap kaki pada sensor dihubungkan dengan mikrokontroler, dimana kaki V_{in} dihubungkan ke *port* 5 V, kaki *ground* dihubungkan ke *port ground* dan kaki V_{out} dihubungkan ke *port analog serial* A1 dan A2 pada mikrokontroler.



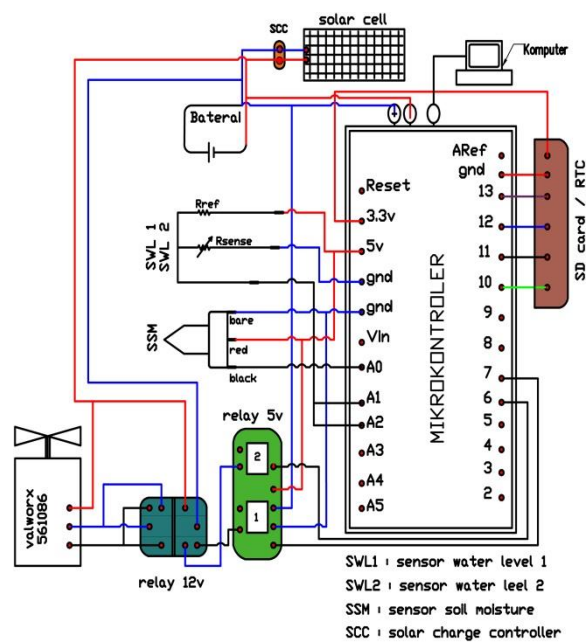
Gambar 1 Rangkaian Sensor Water Level

Sensor *soil moisture* vegetronix VH400 digunakan untuk mendeteksi kelengasan tanah yang memberikan keluaran voltase yang menunjukkan level lengas tanah basis volume (*volumetric water content/vwc*). Sensor *soil moisture* memiliki tiga pin yaitu *bare*, *red*, dan *black*. Pin *bare* sebagai *ground*, pin *red* sebagai V_{in} (3,3 V – 20 VDC) dan pin *black* sebagai *output* sensor (0 – 3 V).

Rangkaian sensor *soil moisture* hampir sama dengan rangkaian sensor *water level*. Setiap kaki pada sensor dihubungkan dengan mikrokontroler, dimana kaki V_{in} dihubungkan ke *port* 5 V, kaki *ground* dihubungkan pada *port ground* dan kaki V_{out} dihubungkan pada *port analog serial* A0 pada mikrokontroler. Sensor *water level* dan sensor *soil moisture* berkomunikasi dengan komputer melalui *USB serial port*. Komputer berfungsi sebagai antar muka pengguna untuk memonitor dari hasil pembacaan sensor, waktu dan aktivitas sistem kendali irigasi, serta untuk mengubah *setting* pengendalian yang diinginkan. Komponen ATmega328P berfungsi sebagai pengolah keseluruhan data *input analog* sensor *water level* dan sensor *soil moisture*, sehingga didapatkan

nilai level muka air dan kadar air tanah pada lahan percobaan. Pada blok mikrokontroler juga dipasang modul *real time clock (RTC)* dan *micro SD* sehingga dapat merekam data hasil pembacaan sensor yang disertai dengan waktu pengukuran. Modul *RTC* dan *micro SD* dipasang pada *port* 3 volt, *port ground*, *port digital* 10, *port digital* 11, *port digital* 12, dan *port digital* 13 yang terdapat pada mikrokontroler.

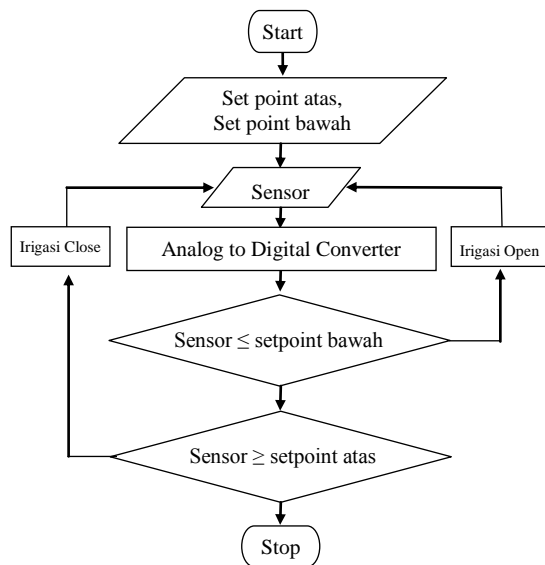
Pada blok mikrokontroler terdapat beberapa rangkaian, antara lain *relay* sebagai saklar otomatis untuk menghidupkan atau mematikan sistem, *terminal barrier*, *panel surya* dan *solar charge controller* sebagai pendukung sistem dengan pemanfaatan tenaga surya, baterai 12 volt sebagai sumber tegangan listrik yang akan dialirkan melalui *relay* untuk menggerakkan motor kran air listrik Valworx 561086 yang berfungsi sebagai buka-tutup aliran air yang akan mengalir ke jaringan irigasi (*outlet* irigasi).



Gambar 2 Skema Rangkaian Hardware

Nilai *setpoint* level muka air lahan percobaan ditentukan pada ketinggian 0 sampai 5 cm. Ketika level muka air dilahan percobaan berada di bawah 0 cm, maka mikrokontroler akan memberikan sinyal untuk mengaktifkan *relay* yang akan mengaktifkan motor kran listrik untuk buka. Demikian juga sebaliknya ketika level muka air di lahan percobaan berada di atas 5 cm, maka mikrokontroler akan memberikan sinyal untuk mengaktifkan *relay* dan menggerakkan motor kran listrik untuk tutup. Sistem pengaturan air akan menjadi lebih akurat karena proses kendali dilakukan dengan sistem *microcontroller* dan tinggi level muka air tidak

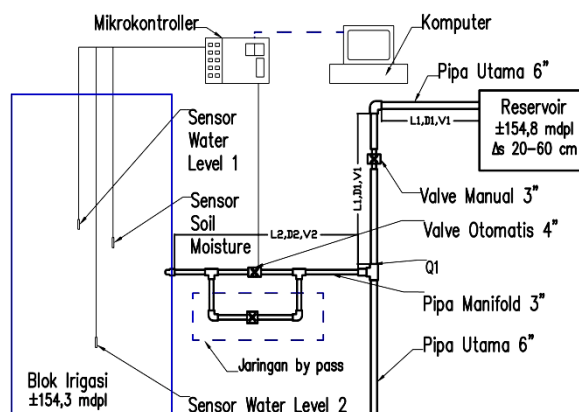
hanya dapat dipantau tetapi juga dapat diukur. Gambar 3 menunjukkan bagan alir rancangan sistem kendali otomatis irigasi perpipaan di lahan sawah.



Gambar 3 Diagram Alir Sistem Kendali Otomatis

3.3. Pemasangan Sistem Kontrol Otomatis pada Jaringan Irigasi Perpipaan

Rancangan jaringan irigasi dipasang pada lahan sawah berukuran 52 x 17 m dengan menggunakan sistem perpipaan dan memanfaatkan gaya gravitasi dengan beda elevasi reservoir dengan lahan sawah sebesar 50 cm. Pipa utama yang berdiameter 6 inci mengalirkan air ke pipa manifold yang berdiameter 3 inci yang merupakan outlet irigasi. Gambar 4 memperlihatkan instalasi jaringan irigasi sistem perpipaan di lahan sawah.

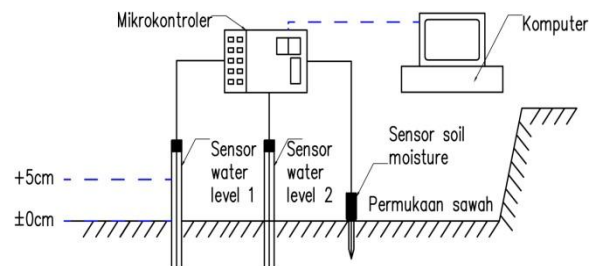


Gambar 4 Lay-out jaringan irigasi pipa dengan memanfaatkan teknologi otomatis

Pada pipa manifold dilengkapi dengan motor kran listrik yang dikendalikan dengan sistem kontrol otomatis berdasarkan setpoint tinggi muka air di lahan sawah. Jarak outlet ditentukan

berdasarkan analisis hidraulika aliran dalam pipa dan keseragaman debit sesuai dengan kebutuhan air oleh tanaman.

Tinggi muka air di lahan percobaan sebagai acuan kendali pengaturan kran listrik dideteksi dengan mempergunakan sensor *water level* yang diletakkan di bagian tengah sawah dengan setpoint bawah 0 cm dan setpoint atas 5 cm dari permukaan tanah. Sedangkan untuk mendeteksi kelengasan tanah digunakan sensor *soil moisture* yang di tanam pada lahan percobaan dengan kedalaman antara 5 - 10 cm (Cardenas-Lailhacar dan Dukes, 2010).



Gambar 5 Tata Letak Sensor di Lahan Sawah

3.4. Pengujian dan Percobaan Lapangan

Pada tahap ini dilakukan pengujian terhadap sistem kontrol otomatis. Pada antar muka serial port akan ditampilkan nilai dari sensor *water level* dan sensor *soil moisture*, sehingga dapat mengetahui dan mengamati nilainya. Selanjutnya dilakukan pengaturan penggunaan sistem kontrol dengan memasukkan nilai setpoint sebagai acuan untuk memberikan perintah pada motor kran listrik.

Pada percobaan lapangan dilakukan implementasi dan pengujian hasil rancangan sistem kontrol otomatis pada jaringan irigasi perpipaan di lahan sawah aktual skala lapang sesuai dengan rancangan pada Gambar 4 selama 7 hari secara kontinyu. Keluaran data yang diperoleh adalah tinggi muka air di lahan sawah, kelembaban tanah, serta status valve.

3.5. Analisis Hasil Percobaan

Data yang diambil merupakan data pembacaan sensor *water level*, data pembacaan sensor *soil moisture*, status valve, process valve, dan status power valve terhadap interval waktu pengukuran setiap 10 menit. Data yang diperoleh dapat menggambarkan kurva kinerja sistem kontrol otomatis pada jaringan irigasi perpipaan dengan setpoint yang diinginkan. Dari data hasil penelitian akan dilakukan analisis kinerja sistem kontrol sesuai dengan setpoint yang telah ditentukan, analisis debit aliran, serta analisis

komponen kesetimbangan air pada lahan sawah irigasi pipa otomatis berbasis tenaga surya.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Sistem Irigasi Perpipaan

Analisis hidraulik sistem perpipaan dilakukan untuk menentukan perancangan irigasi yang tepat. Jarak *outlet* jaringan irigasi adalah 13 m dengan diameter pipa utama sebesar 0,15 m menghasilkan debit 0,012 m³/detik. Besarnya debit yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan air di *reservoir*. Tabel 1 memperlihatkan hasil analisis hidraulik perpipaan pada irigasi otomatis bertenaga surya.

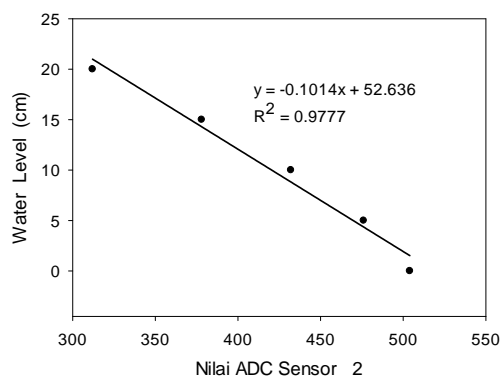
Tabel 1 Nilai analisis hidraulik pipa jaringan irigasi

Uraian	Besaran	Unit	Keterangan
L_1	13	m	panjang pipa utama
L_2	3	m	panjang pipa <i>manifold</i>
D_1	0,15	m	diameter pipa utama
D_2	0,08	m	diameter pipa <i>manifold</i>
Z_1	0,20	m	elevasi <i>inlet</i> irigasi
Z_2	0,30	m	elevasi <i>outlet</i> irigasi
I	0,004		kemiringan garis gaya
$h_{f\text{tot}}$	0,12	m	total <i>head loss</i>
v_1	0,69	m/s	kecepatan aliran pada l_1
v_2	0,45	m/s	kecepatan aliran pada l_2
Q_1	0,012	m ³ /d	debit tersedia

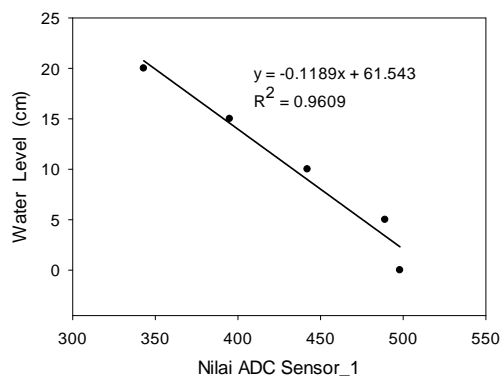
4.2. Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor *water level* dilakukan dengan pengukuran tinggi muka air pada berbagai tingkat level muka air. Data yang diperoleh digunakan untuk membentuk persamaan linier, untuk memperoleh hubungan nilai tinggi muka air dan data *analog digital converter* dari sensor sebagai persamaan kalibrasi.

Hasil kalibrasi sensor *water level* 1 dan 2 menunjukkan hubungan yang sangat linier dengan koefisien determinasi sensor *water level* 1 adalah 0,9609 dan sensor *water level* 2 adalah 0,9777. Persamaan linear kalibrasi akan digunakan untuk mengkonversi nilai bacaan sensor berupa data *analog digital converter* tinggi muka air aktual di lahan sawah. Perbedaan koefisien determinasi disebabkan karena perbedaan sensitivitas dan *casing* dari masing-masing sensor *water level*.



Gambar 6 Kurva Kalibrasi Sensor *Water Level* 1

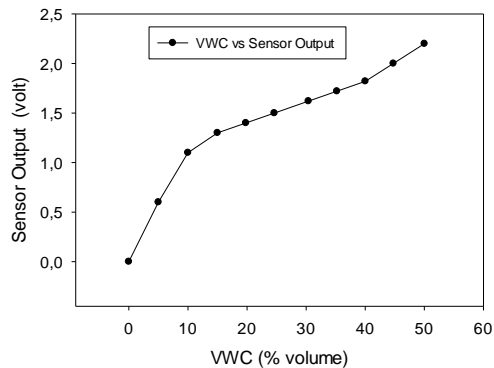


Gambar 7 Kurva Kalibrasi Sensor *Water Level* 2

Sensor *water level* bekerja dengan basis tekanan hidrostatik dari cairan yang diberikan kepada sensor. Tekanan hidrostatik yang diberikan cairan ke sensor menyebabkan perubahan resistansi listrik yang besarnya tergantung oleh jarak dari titik atas sensor ke permukaan cairan. Semakin kecil tinggi permukaan air, maka jarak titik atas sensor ke titik permukaan cairan akan semakin kecil dan tekanan hidrostatik dari cairan tersebut juga semakin kecil. Hal ini menyebabkan ketika ketinggian cairan tinggi, *output voltase* yang ditampilkan pada *serial monitor* menghasilkan nilai yang kecil. Semakin besar tinggi permukaan air, maka jarak titik atas sensor ke titik permukaan cairan akan semakin besar dan tekanan hidrostatik dari cairan tersebut juga semakin besar. Hal ini menyebabkan ketika ketinggian cairan rendah, *output voltase* yang ditampilkan pada *serial monitor* menghasilkan nilai yang tinggi.

Kalibrasi sensor *soil moisture* dilakukan dengan mengkonversi keluaran data besaran tegangan listrik (volt). Perubahan kelembaban adalah sebanding dengan jumlah tegangan yang mengalir melalui tanah (Harishankar *et al.*, 2014; Shiraz dan Yogesha, 2014). Hal ini menyebabkan ketika kelembaban meningkat maka *output*

voltase yang ditampilkan pada serial monitor menghasilkan nilai yang tinggi. Persamaan kalibrasi sensor soil moisture terdiri dari 4 fase tegangan seperti pada Gambar 8.



Gambar 8 Kurva Kalibrasi Sensor Soil Moisture

Tabel 2 Persamaan Kalibrasi Sensor Soil Moisture

Sensor Output (Volt)	Persamaan Kalibrasi
0 - 1,1 V	$WVC = 10 V - 1$
1,1 - 1,3 V	$WVC = 25 V - 17,5$
1,3 - 1,82 V	$WVC = 48,08 V - 47,5$
1,82 - 2,2 V	$WVC = 26,32 V - 7,89$

4.3. Pengujian dan Kinerja Sistem Irigasi Otomatis

Data tinggi muka air dan kelembaban tanah diperoleh dari hasil uji rancangan sistem irigasi otomatis di lahan sawah yang dilakukan selama 7 hari secara kontinyu. Tanah pada lahan percobaan secara umum memiliki tekstur liat. Tabel 3 menunjukkan sifat fisika tanah di lahan percobaan.

Tekstur tanah sangat berpengaruh terhadap kemampuan daya serap air, ketersediaan air di dalam tanah, besar aerasi, infiltrasi dan perkolasi (Hanafiah, 2005). Secara tidak langsung tekstur tanah juga dapat mempengaruhi perkembangan perakaran dan pertumbuhan tanaman serta efisiensi dalam pemakaian air irigasi. Tabel 3 menunjukkan bahwa lahan sawah percobaan memiliki tekstur yang didominasi liat (56%) sehingga menyebabkan kapasitas menahan air (*water holding capacity*) yang relatif tinggi dan memiliki permeabilitas lambat (0,12 cm/jam), serta memiliki ruang pori halus yang lebih banyak (Asdak, 2010; Arsyad, 2010). Hal ini dapat mengurangi terjadinya pemborosan air oleh laju infiltrasi dan perkolasi.

Pemberian air irigasi diharapkan dapat mengisi air tanah pada kondisi pF (retensi lengas tanah) antara 2,54 (kapasitas lapang) sampai dengan 4,2 (titik layu permanen). Pada kondisi kapasitas lapang keadaan tanah cukup lembab yang

menunjukkan jumlah air terbanyak yang dapat ditahan oleh tanah terhadap gaya tarik gravitasi. Air yang dapat ditahan oleh tanah tersebut terus menerus diserap oleh akar-akar tanaman atau menguap sehingga tanah makin lama semakin kering. Pada suatu saat akar tanaman tidak mampu lagi menyerap air tersebut sehingga tanaman menjadi layu (titik layu permanen). Pengaturan *water level* antara 0 cm sampai 5 cm pada irigasi pipa otomatis dilahan sawah dapat menjaga kelembaban tanah berada pada kondisi pF dibawah 2 yang berarti tanah berada pada kondisi jenuh atau macak-macak, diharapkan dapat menjaga genangan di lahan sawah sesuai dengan yang diinginkan serta dapat menghindari tanaman dari kekurangan air.

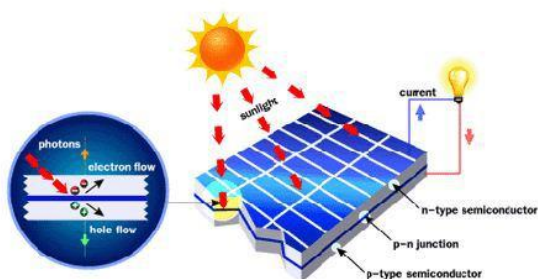
Tabel 3 Sifat fisik tanah lahan percobaan

Sifat fisika tanah	Unit	Hasil analisis
Tekstur		
Pasir	%	8
Debu	%	36
Liat	%	56
<i>Bulk density</i>	g/cc	1,06
<i>Particle density</i>	g/cc	2,54
Ruang pori total	% volume	58,1
Kadar air		
pF1	% volume	56,2
pF2	% volume	50,0
pF2.54	% volume	45,5
pF4.2	% volume	30,7
Pori drainase		
Cepat	% volume	8,1
Lambat	% volume	4,5
Air tersedia	% volume	14,8
<i>Permeabilitas</i>	cm/jam	0,12

Menurut Hanafiah (2005), pada dasarnya tanah sebagai media tumbuh mempunyai empat fungsi yaitu: 1) tempat tumbuh dan berkembangnya perakaran yang mempunyai dua peranan utama, penyokong tegak tumbuhnya trubus (bagian atas) dan sebagai zat-zat yang dibutuhkan tanaman, 2) penyedia kebutuhan primer tanaman untuk melaksanakan aktivitas metabolisme, baik selama pertumbuhan maupun untuk berproduksi, meliputi air, udara dan unsur-unsur hara, 3) penyedia kebutuhan sekunder tanaman yang berfungsi dalam menunjang aktivitasnya supaya berlangsung secara optimum, 4) habitat biota tanah yang berdampak positif karena terlibat secara langsung maupun tak langsung dalam penyediaan kebutuhan primer dan sekunder tanaman tersebut, maupun yang berdampak negatif karena merupakan hama penyakit tanaman.

Sistem kontrol dioperasikan dengan pemanfaatan energi matahari yang telah dirubah ke tegangan DC melalui *solar charge controller* dan melakukan pengisian otomatis, jadi alat ini dapat diterapkan pada tempat yang tidak terdapat aliran listrik dan mampu dioperasikan 24 jam secara kontinyu (Ingale dan Kasat, 2012). Tenaga surya dapat memberikan daya yang cukup untuk menggerakkan sistem dan dapat mengatasi masalah kebutuhan listrik (Uddin *et al.*, 2012). Penggunaan tenaga surya juga dapat mengurangi konsumsi energi lebih dari 35% sehingga dapat membantu meningkatkan pendapatan petani (Alam dan Naseem, 2014).

Sel surya pada dasarnya adalah suatu elemen aktif yang mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Konversi ini didasarkan pada fenomena efek *Photovoltaic*. Sinar matahari terdiri dari foton dengan tingkat energi yang berbeda tergantung spektrum dari mana sinar berasal. Ketika sinar matahari menyerang permukaan bahan *Photovoltaic* itu menyemburkan elektron yang menghasilkan tegangan listrik. Fenomena ini dikenal sebagai efek *Photovoltaic*. Sel surya dapat mengkonversi sekitar 30% dari energi radiasi matahari menjadi listrik.



Gambar 9 Ilustrasi Cara Kerja Sel Surya dengan Prinsip p-n Junction (Gambar : sun-nrg.org)

Sel surya dapat dianalogikan sebagai divais dengan dua terminal atau sambungan, dimana saat kondisi gelap atau tidak cukup cahaya berfungsi seperti dioda, dan saat disinari dengan cahaya matahari dapat menghasilkan tegangan. Ketika disinari, umumnya satu sel surya komersial menghasilkan tegangan DC sebesar 0,5 sampai 1 volt, dan arus *short-circuit* dalam skala milliampere per cm^2 . Satu modul surya biasanya terdiri dari 28-36 sel surya, dan total menghasilkan tegangan DC sebesar 12 V dalam kondisi penyinaran standar (Air Mass 1,5). Pada saat sinar matahari cukup terik menghasilkan 20-23v/1,9-2,4A (38 z- 50 watt) atau sekitar 350 Watt/hari. Bahan dan cara kerja yang aman terhadap lingkungan menjadikan sel surya sebagai salah satu hasil teknologi pembangkit listrik yang efisien dan alternatif sumber energi.

Berbagai ujicoba dan penelitian irigasi otomatis dengan tenaga surya telah dilakukan dengan simulasi komputer untuk mengoperasikan pompa irigasi berdasarkan kelembaban tanah sebagai acuan kendali (Dursun dan Ozden, 2012; Ingale dan Kasat, 2012; Abdelkerim *et al.*, 2013), model simulasi ini diimplementasikan pada skala laboratorium dan lahan kering untuk bidang pertanian ukuran medium. Pengembangan mode komunikasi antar instrument dikembangkan untuk mengatasi kendala jarak di lahan pertanian yang luas, dengan memanfaatkan teknologi sistem nirkabel (Uddin *et al.*, 2012; Nagahage dan Dilrukshi, 2012; Yalla *et al.*, 2013; Alam dan Naseem, 2014; Dhanne *et al.*, 2014; Bansal *et al.*, 2014; Fule dan Awachat, 2014).

Sistem kontrol otomatis dioperasikan dengan menggunakan teknik Modul GSM dan teknologi ZigBee Modul, petani dapat mengontrol dengan *remote* untuk ON/OFF motor pompa irigasi dengan menggunakan ponsel bahkan dari jauh. Aktuator dari sistem irigasi umumnya hanya mengoperasikan pompa irigasi dalam 2 posisi yaitu “buka” dan “tutup”, dan sistem kontrol diimplementasikan pada skala laboratorium serta dilahan kering untuk bidang pertanian ukuran medium. Untuk itu sistem kontrol dibangun untuk pengaturan buka-tutup sistem rotasi kran elektrik dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno ATmega328P dengan acuan kendali *water level* dan diimplementasi pada irigasi pipa skala lapang di lahan sawah aktual (lahan basah).

Gambar 10 memperlihatkan kinerja sistem kontrol otomatis dalam menjaga tinggi muka air di lahan sawah sesuai dengan batas rentang *setpoint* yang telah ditentukan. Sumbu *x* pada kurva menunjukkan waktu pengambilan data dan sumbu *y* ordinat primer di sebelah kiri gambar menunjukkan perubahan tinggi muka air (cm). Sumbu *y* ordinat sekunder disebelah kanan gambar menunjukkan tingkat kelengasan tanah (% volume). Waktu pengujian dimulai pada tanggal 21 Mei 2015 pukul 0:10:05 WIB sampai dengan tanggal 27 Mei 2015 pukul 23:53:15 WIB, dan interval waktu pengukuran setiap 10 menit.

Hasil percobaan menunjukkan tinggi muka air berfluktuasi di setiap hari, namun sistem kontrol otomatis dapat mengontrol sistem aktuasi kran elektrik pada *setpoint* yang diinginkan. Sistem kontrol mengatur waktu pembukaan dan penutupan kran elektrik selama 300 detik untuk rotasi 90°. Ketika proses pembukaan dan penutupan selesai, motor kran elektrik dalam kondisi *stand by* dan terputus dengan tegangan dari baterai, sehingga dapat menghemat penggunaan daya baterai.

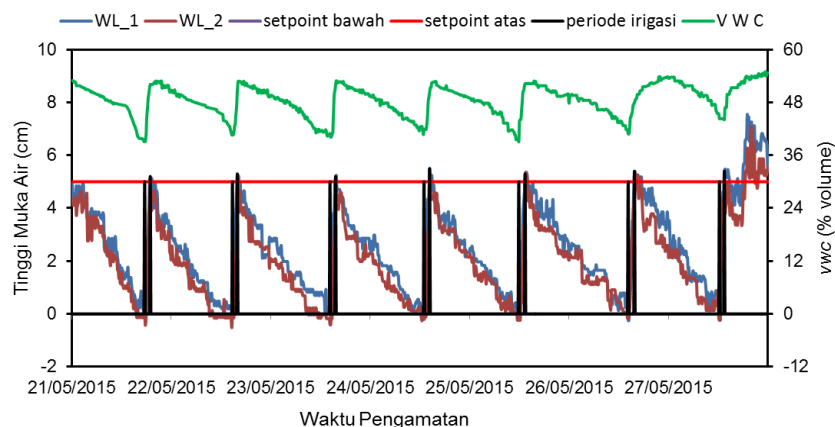
Pada Gambar 10 juga dapat dilihat adanya tinggi muka air di lahan sawah melewati batas *setpoint* atas, hal ini terjadi karena faktor hujan dan rembesan dari lahan sekitar yang menyebabkan suplai air yang masuk ke lahan secara berlebihan dengan durasi waktu tertentu. Rata-rata waktu pembukaan kran irigasi adalah 80,67 menit dengan debit rata-rata sebesar 0,29 m³/menit. Total aplikasi irigasi yang diberikan selama percobaan setara dengan 37,54 cm. Rata-rata durasi waktu untuk penurunan tinggi muka air (*water level*) dari tinggi puncak sampai ke permukaan tanah adalah 112,36 menit. Durasi waktu yang dibutuhkan untuk penurunan dan kenaikan tinggi muka air di lahan sawah mengalami perbedaan, hal ini terjadi karena faktor pengisian air tanah, drainase, hujan, dan faktor cuaca yang mempengaruhi laju penguapan.

Hasil percobaan memperlihatkan bahwa pada saat level muka air di lahan meningkat maka kadar air tanah juga meningkat. Hal ini dapat dilihat dari peningkatan nilai *vwc* pada sensor *soil moisture*. Sensor *soil moisture* menggunakan dua *probe* yang terbuat dari tembaga untuk melewatkan arus yang melalui tanah dan kemudian membaca resistansi untuk mendapatkan tingkat kelembaban, lebih banyak air (basah) membuat tanah menghantarkan listrik lebih mudah (resistansi berkurang), sedangkan tanah kering (tidak basah) sangat sukar untuk menghantarkan listrik (resistansi meningkat). Dengan demikian ketika proses pengisian air tanah ke pori-pori tanah maka tanah dalam keadaan jenuh, atau dalam proses menuju jenuh sehingga nilai *vwc* meningkat. Hasil percobaan menunjukkan bahwa *vwc* maksimum 54,96% dan *vwc* minimum 39,13%.

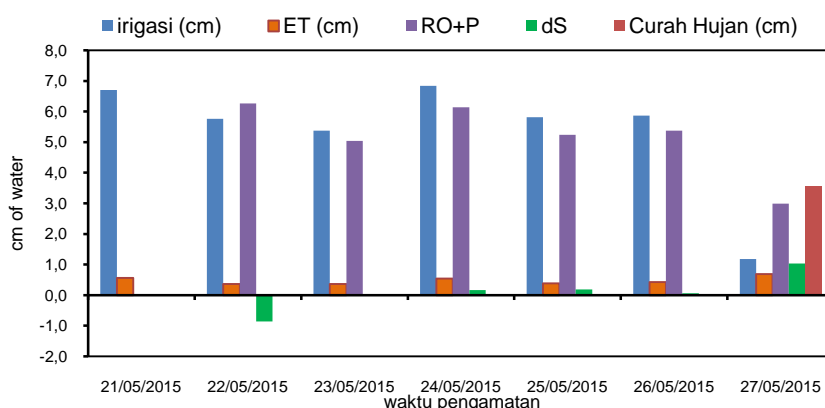
Pada Gambar 11 menunjukkan akumulasi komponen kesetimbangan air dan persentasenya yang dihitung untuk masa percobaan irigasi

otomatis di lahan sawah. Dimana ET adalah evapotranspirasi, RO adalah limpasan, P adalah perkolasi, dan *dS* adalah perubahan simpanan air di lahan. Selama percobaan jika tidak terjadi suplai air dari hujan yang melewati batas *setpoint* atas, maka irigasi beroperasi secara otomatis sesuai batas *setpoint* yang telah ditentukan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa selama ada suplai air yang cukup dari hujan, sistem irigasi tidak akan beroperasi dengan adanya informasi ketinggian air di lahan sawah yang berada dalam batas *setpoint* yang diizinkan sehingga dapat menjaga lahan dari penggunaan air irigasi yang berlebihan. Nilai evaporasi yang besar disebabkan lokasi percobaan yang tidak ternaung dari radiasi matahari dan temperatur yang relatif tinggi karena musim kemarau.

Total evaporasi selama percobaan adalah 33,3 mm. Dengan demikian terdapat selisih air irigasi sebesar 34,21 cm yang digunakan untuk perubahan simpanan air di lahan, perkolasi, dan limpasan. Nilai limpasan dan perkolasi yang besar disebabkan karena selama percobaan sistem drainase dalam keadaan *open*. Sistem irigasi otomatis baik genangan maupun irigasi mikro yang bekerja secara otomatis terbukti dapat menjaga suplai air ke lahan sesuai dengan kebutuhan (Saptomo *et al.*, 2012). Akan tetapi untuk meningkatkan akseptibilitas teknologi irigasi otomatis, penggunaan *open source prototyping system* yang cukup murah dan mudah digunakan dilakukan. Penggunaan sistem irigasi otomatis dapat mengoptimalkan penggunaan air dengan mengurangi pemborosan air irigasi 50% daripada irigasi konvensional serta efisiensi tenaga kerja (Harishankar *et al.*, 2014; Nagahage dan Dilrukshi, 2012), serta dengan sistem irigasi otomatis diharapkan efisiensi penggunaan air semakin tinggi dan produktivitas air, yaitu berat produk yang dihasilkan per liter air yang digunakan (Molden *et al.*, 2007).



Gambar 10 Hasil Percobaan Irigasi Otomatis di Lahan Sawah



Gambar 11 Akumulasi Komponen Keseimbangan Air pada Percobaan Irigasi Otomatis

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Hasil percobaan menunjukkan bahwa sistem kontrol otomatis dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno ATmega328P dapat berfungsi dengan baik dalam menyediakan air di lahan sesuai dengan yang diinginkan. Sistem kontrol otomatis dapat mengatur rotasi kran elektrik Valworx 561086 sebesar 90° dengan acuan tinggi muka air di lahan sawah sebagai *setpoint* yang ditentukan. Rata-rata waktu pembukaan katup irigasi adalah 80,67 menit dengan debit rata-rata sebesar $0,29 \text{ m}^3/\text{menit}$.

Total aplikasi irigasi yang diberikan selama percobaan setara dengan 37,54 cm, hal ini dapat mencukupi kebutuhan air di lahan untuk berevaporasi (3,33 cm), pengisian air tanah, perkolasi, serta limpasan (34,21 cm). Sistem kontrol otomatis berbasis tenaga surya mampu dioperasikan 24 jam secara kontinyu, mampu mengatasi kebutuhan energi listrik, serta cukup murah dan memberi kemudahan sistem irigasi bagi petani. Sistem irigasi pipa otomatis berbasis tenaga surya juga dapat memperkecil terjadinya kehilangan air (mengurangi pemborosan air irigasi), meningkatkan produktivitas dan efisiensi penggunaan air irigasi serta efisien tenaga kerja.

5.2. Saran

Pada penelitian selanjutnya sensor *water level* dan *soil moisture* yang digunakan perlu dilengkapi dengan *wireless* sehingga jarak pengiriman data ke mikrokontroler dapat terjangkau di lahan yang lebih luas. Selain itu diperlukan pengembangan algoritme yang lebih baik lagi untuk mengontrol sistem aktuasi kran air elektrik Valworx 561086 dengan sudut rotasi buka-tutup yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan tinggi muka air di lahan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelkerim A.I, Eusuf M.M.R. S, Salami M.J.E, Aibinu A, Eusuf M.A. 2013. Development of solar powered irrigation system. 5th International Conference on Mechatronics (ICOM'13). *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 53 (2013) 012005. doi:10.1088/1757-899X/53/1/01200.
- Adams Henry D, Luce C.H, Breshears D.D, Allen C.D, Weiler M, Hale V.C, Smith A.M.S, Huxman T.E. 2011. Ecohydrological consequences of drought- and infestation-triggered tree die-off: insights and hypotheses. *Ecohydrol* 5: 145 - 159. doi:10.1002/eco.233.
- Alam N, Naseem A. 2014. Solar powered auto irrigation system. *Sci. Int. (Lahore)* 26 (4): 1515 - 1517. ISSN: 1013 - 5316.
- Arif C, Saptomo S.K, Setiawan B.I, Iskandar M.A. 2009. Simulasi komputer penerapan teknik kendali fuzzy sederhana untuk pengaturan muka air tanah di lahan padi SRI. *Jurnal Irigasi* 4 (2): 131 - 144.
- Arsyad, S. 2010. *Konservasi tanah dan air*. Ed. II. Bogor (ID): IPB Press.
- Asdak, Chay. 2010. *Hidrologi dan pengelolaan daerah aliran sungai*. Yogyakarta (ID): Gadjah Mada University Press.
- Bansal M, Bhatia T, Srivastava S, Gupta S, Goyal T. 2014. Automatic Solar Powered Water Pumping Using Zigbee Technology. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETAET)*. 4 (4): 812 - 816. ISSN: 2250-2459. ISO: 9001:2008.
- Cahyo A.D. 2011. Analisis unjuk kerja pengontrolan tinggi muka air pada sistem irigasi otomatis menggunakan perangkat berbasis mikrokontroler [skripsi]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Cardenas-Lailhacar B, Dukes M.D. 2010. Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions. *Agricultural Water Management* 97: 666 - 672. doi:10.1016/j.agwat.2009.12.009.
- Choir A.A. 2012. Rancangan dan uji coba otomatisasi irigasi kendi [skripsi]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.

- Coates R.W, Delwiche M.J, Broad A, Holler M. 2013. Wireless sensor network with irrigation valve control. *Computers and Electronics in Agriculture*. 96: 13 – 22. doi:10.1016/j.compag.2013.04.013.
- Dhanne B.S, Kedare S, Dhanne S.S. 2014. Modern solar powered irrigation system by using arm. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*. eISSN: 2319-1163. pISSN: 2321-7308. 3 (3) : 20 – 25.
- Dursun M, Ozden S. 2012. Application of solar powered automatic water pumping in Turkey. *International Journal of Computer and Electrical Engineering* 4 (2): 161 – 164.
- Fule C.R, Awachat P.K. 2014. Design and implementation of real time irrigation system using a wireless sensor network. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies (IJARCSMS)*. (1): 401–404. ISSN: 2321-7782.
- Hanafiah A.K. 2005. *Dasar-dasar ilmu tanah*. Jakarta (ID): Raja Grafindo Persada.
- Hardjoamidjojo S, Setiawan B.I. 2001. Pengembangan dan pengelolaan air di lahan basah. *Buletin Keteknik Pertanian* 15 (1): 40 – 47.
- Harishankar S, R. Sathish Kumar, Sudharsan K.P, U. Vignesh, T. Viveknath. 2014. Solar powered smart irrigation system. *Advance in Electronic and Electric Engineering* 4 (4): 341 – 346. ISSN: 2231 – 1297.
- Hussain I, R. Sakthivadivel, Upali Amarasinghe, Muhammad Mudasser, dan David Molden. 2003. *Land and water productivity of wheat in the Western Indo-Gangetic Plains of India and Pakistan: a comparative analysis*. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka. ISBN: 92-9090-505-0.
- Ingale H, Kasat N.N. 2012. Automated solar based agriculture pumping. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering* 2 (11): 407 – 410. November 2012. ISSN: 2277 128X.
- Kodoatie Robert J. 2005. *Hidrolika terapan: aliran pada saluran terbuka dan pipa*. Yogyakarta (ID): CV. Andi Offset.
- Lozano D, Arranja C, Rijo M, Mateos L. 2010. Simulation of automatic control of an irrigation canal. *Agricultural Water Management* 97: 91 – 100. doi:10.1016/j.agwat.2009.08.016.
- Maryono A. 2003. *Hidrolika terapan*. Jakarta (ID): PT. Pradnya Paramita.
- Molden D, T. Oweis, P. Steduto, J.W. Kijne, M.A. Hanjra, P.S. Bindraban. 2007. *Pathways for increasing agricultural water productivity*. in: Molden, D. (ed). *Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*. London: Earthscan and Colombo: International Water Management Institute.
- Munson R. Bruce. 2003. *Mekanika fluida. Jilid 1*. Jakarta (ID): Erlangga.
- Nagahage I.S.P, E.A.A. Dilrukshi. 2012. Solar powered automated irrigation system. *ACEPS* 2012: 259 – 265.
- Nikolidakis S.A, Kandris D, Vergados D.D, Douligeris C. 2015. Energy efficient automated control of irrigation in agriculture by using wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture* 113: 154–163. doi:/10.1016/j.compag.2015.02.004.
- Purwanto M.Y.J, Badrudin U. 1999. Fluktuasi kelembaban tanah pada budidaya gogorancah. *Buletin Keteknik Pertanian* 13 (1): 1 – 8.
- Rizal M. 2012. Rancangbangun dan uji kinerja sistem kontrol irigasi tetes pada tanaman strawberry (*Fragaria vesca* L.) [skripsi]. Makassar (ID): Universitas Hasanuddin.
- Rochiyat. 2012. Rancangbangun monitoring sistem irigasi otomatis berbasis GSM/GPRS [skripsi]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Romero R, Muriel J.L, Garcia I, Muñoz de la Peña D. 2012. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. *Agricultural Water Management* 114: 59 – 66. doi:10.1016/j.agwat.2012.06.026.
- Sánchez-Molina J.A, Rodriguez F, Guzman J.L, Ramírez-Arias J.A. 2015. Water content virtual sensor for tomatoes in coconut coir substrate for irrigation control design. *Agricultural Water Management* 151: 114 – 125. doi:10.1016/j.agwat.2014.09.013.
- Saptomo S.K, Chadirin Y, Setiawan B.I, Sofiyuddin H.A. 2012. Peningkatan efisiensi air irigasi dengan introduksi sistem otomatis pada sistem irigasi di lahan produksi pangan. Bandung (ID): *Pertemuan Ilmiah Tahunan 29 Himpunan Ahli Teknik Hidraulik Indonesia*. 19-12 Oktober 2012:407–417.
- Saptomo S.K, Isnaini R, Setiawan B.I. 2013. Irigasi curah otomatis berbasis sistem pengendali mikro. *Jurnal Irigasi* 8 (2): 115 – 125.
- Saptomo S.K, Setiawan B.I, Nakano Y. 2004. Water regulation in tidal agriculture using wetland water level control simulator. The CIGR. *Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript LW 03 001.
- Shiraz Pasha B.R, B. Yogesha. 2014. Microcontroller based automated irrigation system. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)* 3 (7): 6 – 9. ISSN (e): 2319 – 1813. ISSN (p): 2319 – 1805.
- Siebert, Doll, 2010. Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation. *Journal of Hydrology* 384 (3 – 4): 198 – 217.
- Sofiyuddin H.A, Saptomo S.K, Setiawan B.I. 2011. Evaluasi algoritma fazi sederhana sebagai metode kendali pintu sorong. *Jurnal Irigasi* 6(2): 142 – 150.

- Sudha M.N, Valarmathi M.L, Babu A.S. 2011. Energy efficient data transmission in automatic irrigation system using wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture* 78: 215-221. doi:10.1016/j.compag.2011.07.009.
- Sulistiono P. 2013. Analisis karakteristik aliran dalam boks bagi pada sistem irigasi perpipaan [tesis]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Triatmodjo B. 2013. *Hidraulika II*. Cetakan ke-9. Yogyakarta (ID): Beta Offset.
- Triatmodjo B. 2013. *Hidrologi terapan*. Cetakan ke-3. Yogyakarta (ID): Beta Offset.
- Tusi Ahmad. 2010. Rancang bangun otomatisasi irigasi (desain pintu air dan simulasi sistem kendali level muka air sawah) [tesis]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Uddin J, Reza, S.M.T. Newaz Q, Uddin J, Islam T, Kim J.M. 2012. Automated irrigation system using solar power. *Electrical & Computer Engineering (ICECE). 7th International Conference*, 20 - 22 December, 2012, Dhaka, Bangladesh. doi:10.1109/ICECE.2012.6471527.
- Winarbawa S. 2000. Pengaruh kadar air tanah terhadap pertumbuhan dan produksi dua tipe kapolaga sabrang. *Buletin Agronomi*. 28 (1): 1 - 8.
- Yalla S.P, Ramesh B, Ramesh A. 2013. Autonomous solar powered irrigation system. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* 3 (1): 60 - 65. ISSN: 2248 - 9622.