

Pembuatan Perangkat Keras dan Analisis *Sub-Metering* Konsumsi Energi Listrik

Ratna Nataliani, FX Nugroho Soelami dan Eko Mursito Budi

Program Studi Teknik Fisika – Institut Teknologi Bandung

Abstrak

Pemantauan konsumsi energi merupakan langkah manajemen energi yang efektif dalam penghematan energi untuk jangka panjang. Pada penelitian ini dilakukan pengembangan pada perangkat keras dari sistem pemantauan untuk *sub-metering*. *Sub-metering* yang dilakukan membagi pengukuran menjadi tiga masukan arus: stop kontak, *air conditioner*, dan penerangan ambient yang diakuisisi dengan menggunakan sensor arus *non-invasive* SCT-013-030. Data yang diakuisisi kemudian diolah oleh Arduino UNO, disimpan ke SD Card menggunakan Arduino Ethernet Shield dalam keadaan *offline* untuk kemudian dibuat model hariannya dari hasil pengukuran sebagai referensi pengukuran *real-time*.

Untuk memverifikasi model harian dari hasil pengukuran harian pengguna energi, dibuat suatu pemodelan konsumsi listrik *base-line* yang diasumsikan hemat. Tampilan *real-time* yang nantinya dibandingkan dengan pemodelan harian diunggah ke jaringan Ethernet dengan menggunakan Arduino Ethernet Shield dalam keadaan *online*. Sedangkan perangkat lunak yang digunakan untuk menampilkan di halaman web adalah RGraph, sebuah perpustakaan grafik bebas pakai berbasis *javascript*.

Pada akhirnya, penelitian ini dapat melahirkan rekomendasi-rekomendasi penghematan yang spesifik. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa sensitivitas sensor arus dan *signal conditioner* yang digunakan adalah sebesar 7 Ampere/bit dengan tingkat presisi yang baik. Sedangkan resolusi, yakni perubahan 1 bit pada *signal conditioner* terjadi apabila ada perubahan setiap 0, 15 Ampere pada sensor arus.

Kata Kunci: Pemantauan Energi, Sub-metering, SCT-013-030, Arduino, Arduino Ethernet Shield, Real-time, RGraph

1 Pendahuluan

Dalam menghadapi krisis energi, salah satu langkah strategis yang harus dilakukan adalah manajemen energi. Manajemen energi pun memiliki percabangan yakni konservasi dan pemantauan. Pada penelitian ini cabang pemantauan akan lebih dipersempit pada *sub-metering*. Pelibatan teknologi dapat berimbas pada penghematan yang jauh lebih besar. Teknologi yang terintegrasi merupakan salah satu cara efektif melakukan penghematan energi maupun biaya. Bangunan yang dilengkapi sistem-sistem manajemen cerdas dan terintegrasi dapat menghasilkan penghematan yang cukup signifikan. Teknologi membuat kita mampu mengoperasikan bangunan dengan lebih efisien, menghasilkan ruangan-ruangan produktif dan sehat untuk pekerja dan pengunjung dan menciptakan lingkungan yang aman.

Penelitian ini merumuskan bahwa perlu untuk membuat suatu sistem pemantauan konsumsi energi yang lebih spesifik (*sub-metering*) terhadap jenis beban listrik agar dapat dilakukan tindak lanjut penghematan yang lebih spesifik pula. Penelitian ini mengakuisisi dan mengolah masukan analog berupa besaran arus listrik dari pemakaian *lighting*, *air-conditioning*, dan *power supply* AC, serta tegangan listrik bangunan untuk menampilkan daya dari masing-masing konsumsi listrik bangunan. Perangkat lunak untuk mengakuisisi data analog adalah Arduino UNO dengan

mikrokontroler ATmega-328. Perangkat lunak untuk menghubungkan sistem pemantauan ke jaringan Ethernet dan menyimpan data dalam *SD Card* adalah Arduino Ethernet Shield. Perangkat lunak untuk menampilkan grafik radar pada halaman web adalah RGraph.

Obyektif utama dari penelitian ini adalah membuat alat pemantau untuk *sub-metering* listrik dan dapat ditampilkan secara *real-time*. Sehingga dengan alat ini, pengguna dapat mengidentifikasi konsumsi listrik dan dapat segera melakukan penghematan dari informasi yang ditampilkan secara *real-time*.

2 Teori Dasar

Pemantauan *sub-metering* konsumsi energi merupakan kegiatan pengukuran dan pengumpulan data energi yang spesifik untuk suatu area tertentu. Dalam penelitian ini, *sub-metering* digunakan untuk implementasi pengukuran dengan membagi berdasarkan jenis beban. Dengan perangkat-perangkat keras yang telah didesain sesuai, maka devais *sub-metering* dapat langsung mengakuisisi dan memproses data penggunaan energi yang terbaca pada masing-masing beban yang diukur. Hasil pembacaan ini pula dapat diakses pada jarak jauh dengan integrasi tertentu, sehingga memudahkan pengguna untuk memantau konsumsi energinya. Sistem pemantauan ini akan sangat berfungsi ketika biaya konsumsi energi bergantung pada jumlah fasilitas yang tersedia dan jumlah pengguna energi. Berdasarkan penelitian lebih lanjut terkait teknologi ini dalam beberapa tahun terakhir, *sub-metering* merupakan pilihan yang efektif untuk mengatur energi dan biaya penggunaannya.

Pengolahan data dalam penelitian menggunakan Arduino UNO dengan mikrokontroler ATmega-328. Arduino merupakan suatu *platform* prototipe elektronik bebas pakai dari Italia. Arduino terdiri atas perangkat lunak dan keras yang fleksibel dan mudah digunakan. Apabila Arduino dihubungkan ke suatu sensor atau lebih untuk mendeteksi perubahan di lingkungan, data yang dibaca akan diolah di dalam Arduino sesuai dengan perintah pemrograman. Sedangkan untuk menghubungkan dengan jaringan Ethernet, penelitian ini menggunakan Arduino Ethernet Shield. *Shield* ini merupakan salah satu jenis *shield* (papan kerja) Arduino yang memiliki fungsi utama menghubungkan Arduino ke jaringan Ethernet. Papan kerja ini berbasis pada Chip Ethernet Wiznet W5100 yang menyediakan suatu susunan jaringan (Internet Protocol/IP) yang dapat beroperasi pada TCP maupun UDP. Cara menggunakan Arduino Ethernet Shield ini adalah dengan menanamkannya di atas Arduino yang telah diprogram. Sedangkan untuk menghubungkan Arduino ke jaringan Ethernet, digunakan kabel *socket* RJ45 dari *port* luaran pada papan kerja. Papan kerja ini juga dilengkapi dengan slot untuk kartu *micro-SD* yang dapat digunakan untuk menyimpan data hasil pengukuran yang masuk ke Arduino tanpa harus menghubungkannya ke jaringan Ethernet.

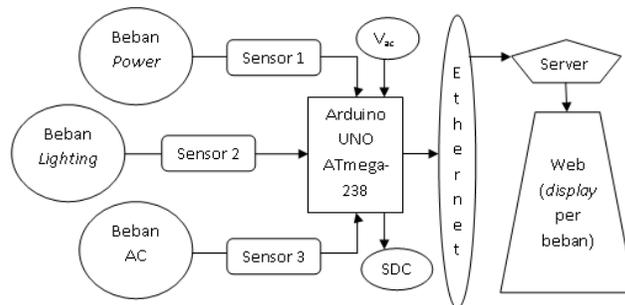
Hasil pengolahan data Arduino kemudian disimpan di server yang kemudian ditampilkan secara *real-time* lewat web browser dalam bentuk grafik radar. Perangkat lunak yang digunakan untuk menampilkan grafik radar ini adalah RGraph. RGraph adalah suatu perpustakaan grafik untuk HTML5 yang menggunakan tag `<canvas></canvas>` HTML5. Tag ini digunakan untuk menggambar grafik—dan hanya memuat rgrafik— dengan melakukan scripting, biasanya skrip yang digunakan adalah JavaScript.



Gambar 1 Arduino UNO dan arduino ethernet shield

3 Rancangan

Pemantauan *sub-metering* konsumsi energi listrik ini dilakukan dengan mempartisi data masukan sesuai dengan beban listrik yang masukannya dari sumber listrik yang dialirkan lewat MCB (*Miniatur Circuit Breaker*) yang diinstal khusus untuk masukan listrik kamar tersebut. Rancangan keseluruhan sistem ditampilkan dalam gambar berikut.

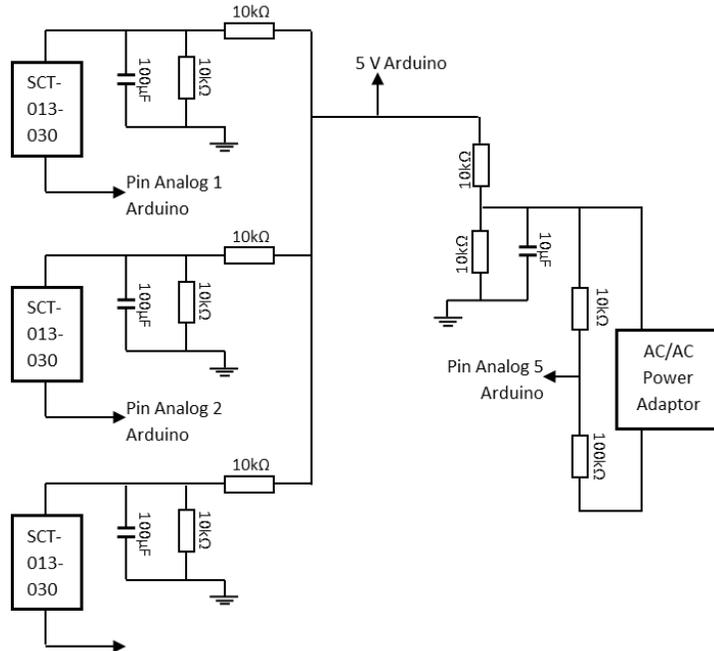


Gambar 2 Skema keseluruhan sistem komunikasi data

Dalam penelitian ini, beban ruangan yang diukur dibagi menjadi tiga: *Power Supply* (Stop kontak), *Lighting* (Pencahayaannya), dan *Air Conditioner*. Alat pengukur data analog yang dirancang memiliki tiga buah sensor arus dan sebuah sensor tegangan. Keempat sensor ini merupakan antarmuka alat ukur dengan obyek ukur. Data hasil akuisisi ini kemudian menjadi masukan analog yang diteruskan ke Arduino melalui masukan analog yang tersedia. Selain pada *database server*, data historis (data hasil akuisisi) juga dapat disimpan dalam SD Card (SDC) yang tersedia pula slotnya pada Arduino Ethernet Shield. Dari *shield* ini, dibutuhkan soket kabel RJ45 untuk menghubungkannya ke jaringan Ethernet. Kemudian data hasil akuisisi disimpan di basis data server. Untuk menampilkannya dalam halaman web secara *real-time*, dibutuhkan pemrograman berbasis JavaScript untuk menghasilkan tampilan yang dinamis. Dalam penelitian ini, perangkat lunak yang digunakan untuk menampilkan hasil pemodelan berupa grafik radar—sebagai data referensi—dan hasil pengukuran *real-time* adalah RGraph. Penelitian ini menggunakan tiga buah sensor untuk membaca keadaan masing-masing arus dan sebuah sensor tegangan yang membaca keadaan tegangan masukan.

Rangkaian seperti terlihat pada Gambar 3 memiliki tujuan untuk memberikan keluaran V_{rms} dan I_{rms} dari beban yang akan diukur. Pengukuran besaran arus listrik dalam hal ini menggunakan sensor *non-invasive* SCT-013-030 yang dihubungkan dengan rangkaian

pembagi tegangan yang terdiri atas dua buah resistor 10 kΩ. Di samping kedua resistor, ada pula sebuah kapasitor 100 μF yang berfungsi untuk menurunkan tegangan *ripple* dari masing-masing sensor dalam skema di atas. Pin analog 1, 2, dan 3 merupakan jalur masuk untuk keluaran rangkaian pengukur arus. Sedangkan pin analog 5 merupakan jalur masuk untuk keluaran rangkaian pengukur tegangan.



Gambar 3 Rangkaian listrik untuk alat ukur data arus dan tegangan

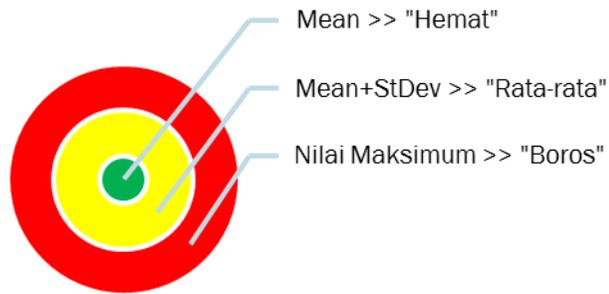


Gambar 4 Diagram kerja arduino

Library EmonLib.cpp dan EmonLib.h digunakan apabila masukan analog yang diaktifkan untuk masukan analog masing-masing arus dan tegangan hanya berjumlah satu. Dalam metode *sub-metering*, tentunya masukan analog untuk arus yang diaktifkan jumlahnya lebih dari satu. Dalam penelitian ini dibuat tiga masukan analog. Sehingga, penggunaan pin masukan analog yang berjumlah lebih dari satu ini mengharuskan untuk melakukan modifikasi pada kedua *library* tersebut.

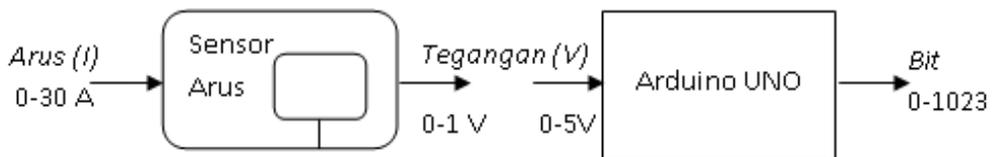
Modifikasi yang dilakukan pada kedua *library* adalah penduplikasian variabel-variabel atau fungsi-fungsi yang berhubungan dengan pengukuran arus. Jumlah variabel dan fungsi yang dibuat harus minimal sama dengan jumlah jenis bebas masukan arus yang ingin diakuisisi. Dengan modifikasi yang dilakukan, Arduino dapat membaca dan menampilkan keluaran untuk tiga jenis masukan analog berupa arus listrik. Sedangkan untuk masukan analog berupa tegangan tidak perlu melakukan duplikasi, karena hanya dibutuhkan satu masukan analog sesuai dengan *template* yang ada.

Hal penting dari pengolahan data historis ini adalah menghasilkan tampilan identifikasi yang mudah dimengerti oleh pengguna. Sedangkan tampilan dalam bentuk grafik radar membuat pemantauan dapat dilakukan secara bersamaan antara beban-beban yang ada. Pengolahan data ini akan menghasilkan nilai-nilai yang menjadi batas dari daerah "Hemat", "Rata-rata", dan "Boros" seperti gambar berikut.



Gambar 5 Diagram identifikasi konsumsi listrik

Untuk mendefinisikan karakteristik alat ukur ini, dilakukan dua perhitungan karakterisasi statik yakni sensitivitas dan resolusi. Sistem alat ukur yang dikarakterisasi adalah bagian sensor dan pengondisi sinyalnya, yaitu sensor arus dan Arduino seperti dalam Gambar 6 berikut.



Gambar 6 Bagian sensor (sensor arus) dan pengondisi sinyal (arduino UNO)

1. Sensitivitas

Sensitivitas merupakan perbandingan perubahan keluaran sistem terhadap perubahan masukan sistem. Masukan dari sensor arus dengan *range* 0-30 Ampere dikonversi menjadi *range* bit pada keluaran Arduino. Jika pada masukan sensor arus 0 A setara dengan keluaran sensor arus pada 0 V, maka masukan sensor arus 30 A setara dengan keluaran sensor arus pada 1 V. Sehingga dalam satuan bit:

$$\text{Batas atas: } \frac{0 \text{ V}}{5-0 \text{ V}} \times 1023 \text{ bit} = 0 \text{ bit}$$

$$\text{Batas bawah: } \frac{1 \text{ V}}{5-0 \text{ V}} \times 1023 \text{ bit} = 204,6 \text{ bit} \cong 205 \text{ bit}$$

$$\begin{aligned} \text{Sensitivitas} &= \frac{d(\text{Out})}{d(\text{In})} \\ &= \frac{205-0 \text{ bit}}{30-0 \text{ A}} = 6,83 \text{ bit/A} \cong 7 \text{ bit/A} \end{aligned}$$

2. Resolusi

Resolusi merupakan perubahan nilai terkecil masukan pengukuran yang memberi respon pada keluaran pengukuran. Dalam sistem pengukuran ini, respon pada keluaran terjadi pada setiap perubahan 1 bit pada Arduino. Namun karena masukan tegangan maksimum dari sensor arus ke Arduino hanya 1 V—yaitu seperlima maksimum masukan

Arduino, 5 V— nilai maksimum keluaran dari Arduino pun bukan 1023 bit, melainkan seperlimanya, atau sebesar 205 bit.

$$\begin{aligned} \text{Resolusi} &= \frac{d(\text{Out})}{d(\text{In})} \\ &= \frac{30 - 0 \text{ A}}{205 - 0 \text{ bit}} = 0,15 \text{ A/bit} \end{aligned}$$

Sehingga untuk menghasilkan perubahan pada keluaran Arduino sebesar 1 bit dibutuhkan perubahan minimum 0,15 Ampere pada masukan sensor arus.

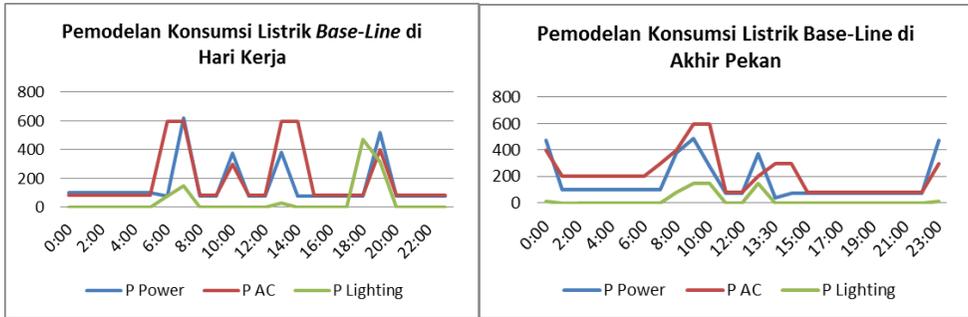
Selain karakterisasi di atas, dilakukan pula plotting kalibrasi dengan melakukan pengukuran pada dua buah lampu pijar dan hasilnya adalah sensor dan pengondisi sinyal memiliki presisi yang baik.

4 Hasil dan Analisis



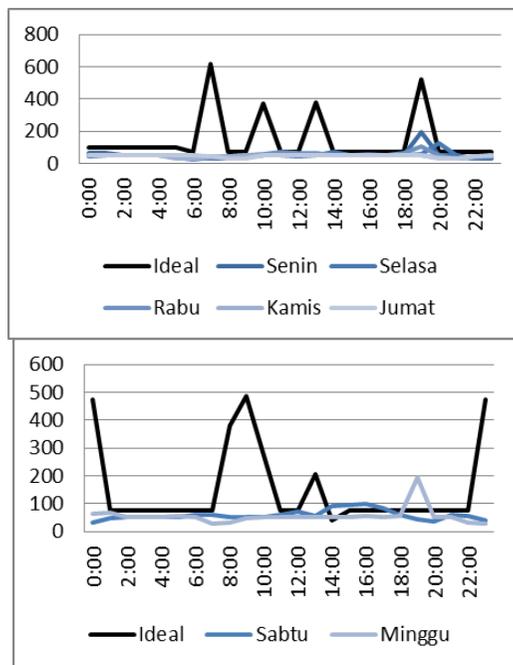
Gambar 7 Alat akuisis data untuk *sub-metering*

Gambar 7 adalah alat hasil penelitian yang digunakan untuk mengakuisi data *sub-metering*. Kemudian sebagai perbandingan data yang diakuisisi, penulis membuat pemodelan konsumsi listrik dari pengguna yang berdasarkan kebiasaan yang terpantau oleh staf pekerja di Hotel Sheraton dan asumsi-asumsi penggunaan listrik. Pencuplikan data ini juga melibatkan data tegangan, namun data hasil pengukuran tegangan tidak terakuisisi dengan baik. Namun hal ini tidak menjadi masalah karena sistem suplai tegangan yang digunakan pada Hotel Sheraton menggunakan stabilisator *capacitor bank*, sehingga tegangan masukan ke dalam kamar hotel relatif stabil pada nilai 215 Volt. Diketahui pula dari staf *engineer* hotel bahwa nilai $\cos \phi$ bangunan relatif stabil pada angka 0,99. Pemodelan ini disebut dengan pemodelan *base-line*, yang menghasilkan grafik seperti terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Pemodelan konsumsi listrik *base-line*

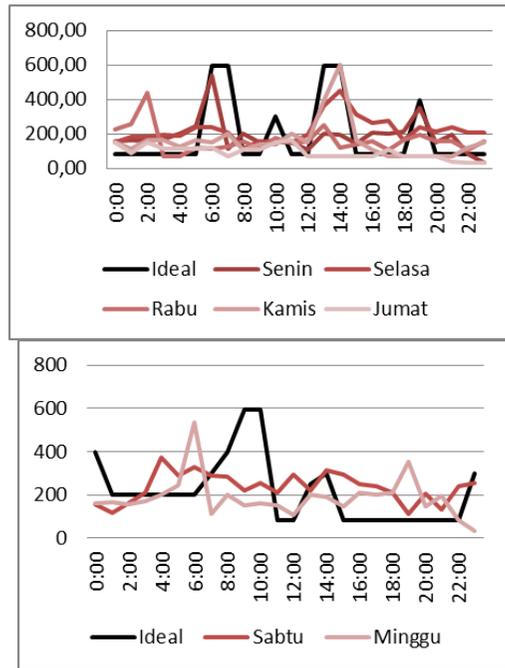
4.1 Analisis Konsumsi Listrik pada *Power Supply*



Gambar 9 Pemodelan konsumsi *power supply* pada hari kerja dan akhir pekan

Konsumsi listrik dari *power supply* AC baik di hari kerja maupun akhir pekan, ternyata konsumsi listrik yang dilakukan oleh pelanggan berada di daerah minimum pemodelan *base-line*. Pada grafik penggunaan pelanggan, kenaikan nilai konsumsi listrik hanya terjadi pada malam hari. Waktu ini diperkirakan merupakan saat pelanggan kembali ke kamar hotel setelah beraktivitas seharian di luar kamar. Konsumsi energi disinyalir merupakan konsumsi yang rutin dari alat elektronik yang sama karena berkisar pada nilai 100-200 Watt.

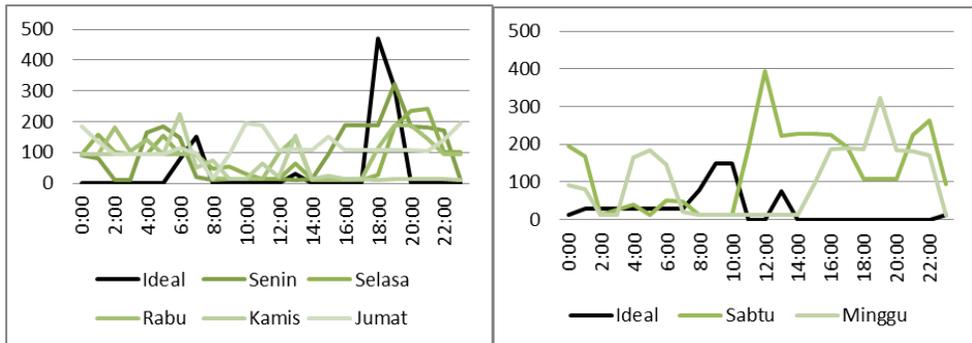
4.2 Air Conditioner



Gambar 10 Pemodelan konsumsi *air conditioner* pada hari kerja dan akhir pekan

Fluktuasi konsumsi energi pelanggan pada hari kerja relatif mirip dengan pemodelan *base-line*. Namun konsumsi minimum pelanggan justru tidak berada di atas *base-line*, bahkan cukup jauh lebih tinggi di banyak titik. Titik minimum ini disinyalir dalam keadaan tidak ada penghuni di dalam ruangan. Sehingga, keadaan ini sangat potensial untuk dilakukan penghematan, misalnya dengan membuat sistem otomatis untuk menaikkan suhu ruangan hingga pada angka yang masih dapat dianggap nyaman, disamping menurunkan kecepatan kipas. Karena konsumsi listrik AC jauh lebih berat pada kompresor ketimbang kipas. Kemudian untuk akhir pekan, dapat dilihat bahwa fluktuasi mirip dengan hari kerja. Bisa jadi pelanggan memiliki kebiasaan yang sama dengan yang biasa ia lakukan pada hari kerja. Namun dari kedua grafik pun belum terlalu menggambarkan kebiasaan pelanggan. Selain itu, hal yang menarik adalah peningkatan suhu lingkungan yang amat mempengaruhi beban kerja AC sehingga meningkat cukup signifikan. Kondisi ini tentu saja memiliki kesempatan penghematan yang juga besar. Misalnya saja bisa dibuat suatu sistem otomatis untuk menutup tirai secara otomatis pada siang hari atau pekerjaan ini dapat dibebankan kepada *housekeeping*.

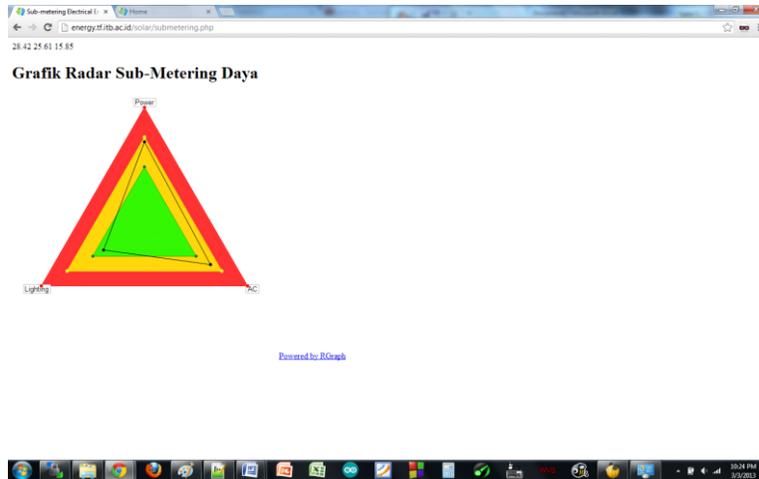
4.3 Penerangan Ambien



Grafik 11 Pemodelan konsumsi pencahayaan pada akhir pekan

Hal yang cukup mengganggu dari perbandingan data di atas adalah kisaran nilai konsumsi listrik untuk penerangan yang mirip pada sepanjang hari kerja. Hal ini disinyalir terjadi karena penggunaan lampu tidak dihentikan saat tidur. Bisa jadi karena terlalu lelah bekerja sehingga lupa, atau memang pelanggan tidak dapat tidur dalam keadaan terlalu gelap. Namun apabila ternyata karena kelalaian atau ketidakbiasaan, hal ini dapat menjadi potensi penghematan. Misalnya dibuat sistem otomatis pemadaman lampu dengan menggunakan sensor gerak. Pada daerah tertentu, misalnya di dekat pintu, dipasang sensor yang dapat memerintahkan pemadaman lampu apabila tidak ada aktivitas selama durasi tertentu, misalnya dua jam meskipun saat kartu (kunci kamar) terpasang pada slot aktivasi listrik ruangan. Begitu pula dengan konsumsi listrik AC, konsumsi listrik penerangan ambien di akhir pekan belum begitu konvergen. Untuk akhir pekan, pemodelan konsumsi listrik untuk AC dan penerangan ambien masih membutuhkan lebih banyak sampel agar dapat dihasilkan suatu pemodelan yang memiliki tingkat kemiripan yang baik.

Gambar 12 merupakan hasil tampilan *web browser* dengan menggunakan perintah pemrograman *real-time*. Grafik ini ditampilkan dari server pada Laboratorium Manajemen Energi karena tampilan dari server buatan di Hotel Sheraton tidak dapat dilakukan karena alamat IP pada server dan Arduino sama. Sehingga data hasil akuisisi tidak dapat masuk ke basis data server.



Gambar 12. Tampilan *Real-time* Grafik Radar pada *Web Browser*

5 Kesimpulan

Penelitian ini telah dapat mengembangkan dan mengimplementasikan sistem *monitoring* energi listrik untuk *sub-metering* dengan masukan dari tiga buah sensor arus. Sensitivitas dari alat ukur ini sebesar 7 bit/Ampere dengan resolusi sebesar 0, 15 Ampere/bit dan tingkat presisi baik. Dalam implementasinya di kamar 3311 Hotel Sheraton Bandung, sistem pemantauan ini juga dapat memudahkan pemantau untuk menganalisis kegiatan konsumsi listrik dari hasil pengukuran *offline* sehingga dapat menghasilkan rekomendasi penghematan energi sesuai dengan alat listrik yang dipantau. Penelitian ini juga telah berhasil mengembangkan tampilan grafik radar pada halaman web pemantauan dengan menggunakan Rgraph sebagai perangkat lunak sehingga mampu menampilkan konsumsi daya listrik pada masing-masing beban ukur secara bersamaan dan *real-time*.

6 Daftar Pustaka

- [1] "Energy Submetering". Fact Sheet. Energy Center of Winconsin. 2000.
- [2] "Energy management: Monitoring, visualization, evaluation and optimization of energy consumption". Building expert newsletter.
- [3] "Encourage reduced consumption: Install Sub-metering". Country Energy, Australia. 2009.
- [4] "Sub-Metering Energy Use in Colleges and Universities: Incentives and Challenges". Energy Star, United States. Desember, 2002.
- [5] "Arduino". <http://arduino.cc> (diakses pada bulan Desember 2012)
- [6] "RGraph - Free HTML5 and JavaScript Charts". <http://rgraph.net> (diakses pada bulan Januari 2013)
- [7] "How to Build an Arduino Energy Monitor - Measuring Mains Voltage and Current". <http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/how-to-build-an-arduino-energy-monitor?page=6> (diakses pada bulan Desember 2012)
- [8] "Energy Monitoring using Pachube, Arduino 1.0 and SCT-013-030".

- [9] <http://roysoala.wordpress.com/2012/04/20/energy-monitoring-using-pachube-and-arduino-1-0/> (diakses pada bulan Desember 2012)
- [10] Ambatoho, Ronald. 2011. "Perancangan Perangkat Lunak untuk Sistem Analisis Penggunaan Energi pada Bangunan Secara Waktu Nyata Berbasiskan Web". Tugas Akhir, Institut Teknologi Bandung.
- [11] Haq, Nashirul. 2010. "*Online Measurement for Energy Analysis in Supermarket Building*" Tesis Magister Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.
- [12] Bentley, John P., 2005. *Principles of Measurement System: Fourth Edition*. England: Pearson.