

Triple Modular Redundancy untuk Meningkatkan Kualitas Pengukuran Parameter Meteorologi

David Yulizar, Hariyanto, Bowo Prakoso

Program Studi Instrumentasi Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
Jln. Perhubungan I No. 5 Komplek Meteou Dephub, Banten 15221 INDONESIA

david.yulizar@bmgk.go.id

Abstrak— Teknik *Triple Modular Redundancy* (TMR) diimplementasikan dalam sistem pengukuran parameter meteorologi. Perangkat pengukuran direkayasa dengan menerapkan metode TMR yang mengusung konsep *voting* untuk pengukuran suhu dan kelembapan. Setiap modul pengukuran parameter terdiri dari tiga sensor yang dirangkai sesuai konsep 2oo3 (*two-out-of-three*). Dengan teknik ini, kualitas pengukuran menjadi lebih baik dalam hal kontinuitas dan akurasi. Diketahui dalam proses pengujian kalibrasi perangkat yang telah direkayasa dengan TMR, hasil pengukuran kelembapan menunjukkan akurasi yang baik dengan nilai rata-rata koreksi 0,26%, demikian juga dengan keakurasian pengukuran suhu yang memiliki nilai rata-rata koreksi 0,04 °C. *Continuity* perolehan data pengukuran selama periode pengujian mencapai 100%, hal ini dikarenakan dengan TMR memungkinkan pengukuran tetap menghasilkan data meskipun ada salah satu sensor yang mengalami kegagalan (*failure*). Unit pemrosesan pada perangkat menggunakan mikrokontroler ATMega 2560, dilengkapi dengan *fault warning* dengan sms gateway memungkinkan adanya informasi dini gangguan terhadap sensor.

Kata kunci— *Triple Modular Redundancy*, 2oo3, *voting*, akurasi, kontinuitas, pengukuran suhu dan kelembapan.

Abstract—*Triple Modular Redundancy (TMR) Technique is implemented to the measurement system of meteorological parameters. The measurement instrument is engineered by applying TMR with concept of voting for the measurement of temperature and humidity. For each parameter measurement module consists of three sensors that are arranged according to the concept of 2oo3 (two-out-of-three). This technique allows the quality of measurements to be better in terms of continuity and accuracy. Known in the testing process of calibration device has been engineered with TMR, humidity measurement results indicate good accuracy with the average value of a correction 0.26%, as well as to the accuracy of temperature measurement has an average value correction 0.04 ° C. Continuity acquisition of measurement data during the test period reached 100%, this is due to the TMR enables measurement still produce data even if there is a sensor failure. The processing unit on the device using a microcontroller ATMega 2560, equipped with a fault warning by sms gateway allows the early notification of sensor failure.*

Keywords— *Triple Modular Redundancy*, 2oo3, *voting*, accuracy, continuity, temperature and humidity measurement.

I. PENDAHULUAN

Penggunaan TMR untuk meningkatkan reliabilitas komputer dijelaskan oleh R.E. Lyon dan W. Vanderluk (1962), menunjukkan bahwa kegagalan komponen secara bergantian tidak mengakibatkan kegagalan sistem dengan TMR[11].

Penelitian Noor Cholis Basjaruddin (2009) menunjukkan bahwa rangkaian sensor yang mengadopsi konsep redundant memiliki tingkat keandalan yang lebih baik dibandingkan dengan sensor non-redundant[4].

Meskipun telah lama diperkenalkan di dunia industri, namun penerapan TMR untuk observasi meteorologi di Indonesia belum dikenal secara umum. Pada umumnya kegiatan observasi terhadap parameter meteorologi masih memanfaatkan pengukuran sensor tunggal. Penggunaan sensor

tunggal berisiko pada penurunan kualitas data pengukuran seiring waktu operasional perangkat. Kerusakan atau gangguan pada sensor berakibat pada hasil pengukuran yang tidak akurat dan bahkan berhentinya proses observasi akibat sensor mati.

Penelitian ini bertujuan menghasilkan sebuah perangkat pengukuran meteorologi yang menerapkan teknik TMR untuk menjaga kontinuitas dan akurasi data pengukuran tetap terjaga baik.

Agar lebih fokus pada analisis keandalan TMR untuk sensor observasi meteorologi, pada penelitian ini dibatasi jumlah parameter yang diukur ada dua yaitu suhu dan kelembapan.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Perekayasaan perangkat pengukuran suhu dan kelembapan terbagi dalam tiga modul. Modul input terdiri dari rangkaian tiga unit sensor suhu dan kelembapan (DHT22) dan satu RTC (*Real Time Clock*). Modul pemrosesan terdiri dari mikrokontroler ATmega2560 dan I2C. Modul output terdiri dari LCD display 20x4, SD card, dan GPRS/GSM modem shield.

Sensor DHT22 berfungsi sebagai unit pengukur suhu dan kelembapan. Rangkaian tiga sensor DHT22 terhubung dengan mikrokontroler arduino ATmega 2560 untuk memproses nilai keluaran dari ketiga sensor tersebut dengan menerapkan konsep voting 2oo3 TMR. Logika voting ditunjukkan dalam Tabel I.

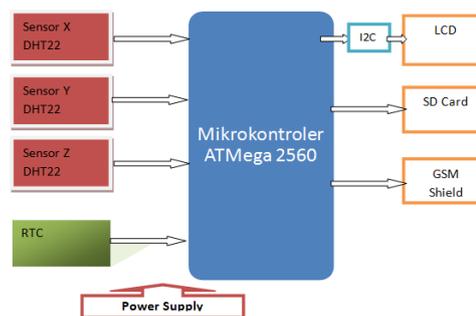
TABEL I
ATURAN VOTING KELUARAN SENSOR

Kondisi Nilai Input	Logic Confidence Level Unit Sensor			Keluaran Sensor Terpilih
	θ_x	θ_y	θ_z	
$X=Y \ \&\& \ Y=Z$	1	1	1	X/Y/Z
$X=Y \ \&\& \ Y!=Z$	1	1	0	X/Y
$X=Z \ \&\& \ X!=Y$	1	0	1	X/Z
$Y=Z \ \&\& \ X!=Y$	0	1	1	Y/Z
$X!=Y!=Z$	0	0	0	Tidak ada nilai (Warning)

Data pengukuran yang digunakan apabila setidaknya ada dua sensor yang menghasilkan nilai pengukuran yang sama atau nyaris sama dalam batas deviasi yang dapat diterima. Apabila nilai keluaran dari ketiga sensor tersebut berselisih melampaui ambang batas yang ditentukan, maka tidak ada satupun nilai yang digunakan sebagai keluaran sistem melainkan mikrokontroler akan memicu pesan kegagalan pada antarmuka pengguna melalui display LCD dan sms.

Ambang batas deviasi yang digunakan merujuk pada standar yang ditetapkan *World Meteorological Organization* (Dokumen WMO 8), dimana ambang batas deviasi untuk suhu (δ_T) adalah 0,2 °C dan untuk kelembapan relatif (δ_{RH}) adalah 5%.

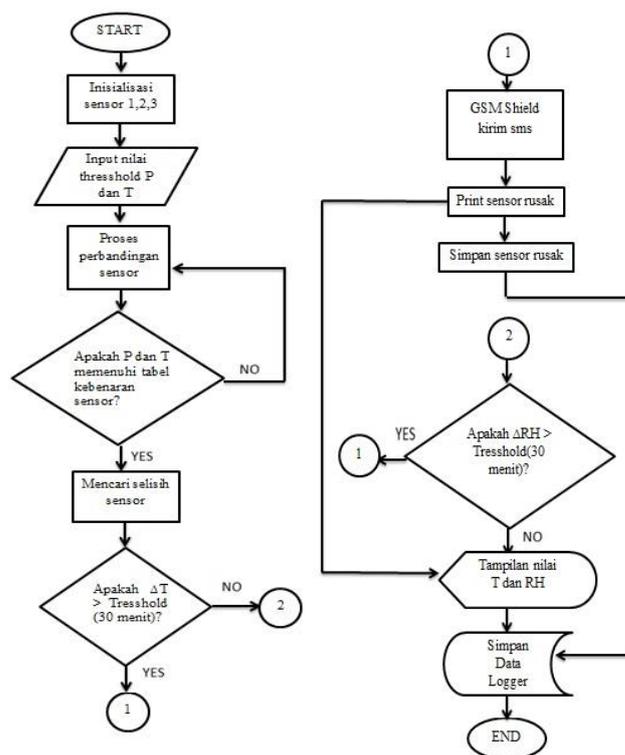
Perakitan hardware mengikuti skema diagram blok pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Pengukuran

Aturan voting dan batasan-batasan yang telah ditetapkan dituangkan dalam kode pemrograman mikrokontroler. Keseluruhan sistem pengukuran pada perangkat TMR ini bekerja dengan perintah yang dioperasikan dari mikrokontroler Arduino dengan bahasa C.

Alur kerja sistem pengukuran dengan TMR ditampilkan dalam diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Sistem

Pada tahap pengumpulan input, masing-masing sensor mengukur parameter suhu dan kelembapan secara independen sebagaimana cara kerja

pengukuran dengan sensor tunggal. Setiap sensor menghasilkan nilai pengukurannya masing-masing tanpa pengaruh dari sensor lainnya. Nilai pengukuran dari ketiga sensor X,Y dan Z kemudian diolah oleh mikrokontroler. Setiap nilai hasil pengukuran masing-masing sensor dibandingkan satu dengan lainnya, nilai pengukuran dianggap sama apabila memiliki selisih tidak melebihi ambang batas maksimum deviasi yang telah didefinisikan pada tahap inisiasi. Aturan *voting* 2oo3 diterapkan dimana nilai final pengukuran merupakan nilai yang dihasilkan setidaknya oleh dua dari tiga sensor DHT22 dalam rangkaian. Apabila ketiga nilai pengukuran terpaut selisih melampaui δ_T untuk suhu dan δ_{RH} untuk kelembapan, dalam hal ini ketiganya didefinisikan memiliki *logic confidence level* rendah, $\theta = 0$, maka nilai pengukuran tersebut tidak dapat diterima sehingga hasil pengukuran tidak digunakan.

Sistem memonitor hasil *voting* secara berkelanjutan, sehingga untuk sensor yang selama rentang waktu tertentu (30 menit) pada periode pengukuran selalu menghasilkan nilai pengukuran dengan $\theta = 0$, maka sensor tersebut dianggap sebagai suspect sensor bermasalah, sehingga sistem secara otomatis melaporkan hal tersebut melalui sms.

Nilai pengukuran setiap sensor dan nilai pengukuran final hasil *voting* ditampilkan pada layar LCD sebagai antarmuka perangkat dengan pengguna.

Keseluruhan aktivitas sistem selama periode pengukuran direkam dan tersimpan dalam sebuah media penyimpanan data berupa SD Card. Nilai pengukuran masing-masing sensor sebelum proses *voting* dan keluaran final hasil *voting* tersimpan pada media tersebut dalam file .txt. Hal ini memungkinkan analisis dan evaluasi operasional perangkat pengukuran secara periodik.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perangkat yang berhasil dirakit dalam penelitian ini tampak pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Perangkat pengukuran suhu dan kelembapan dengan TMR

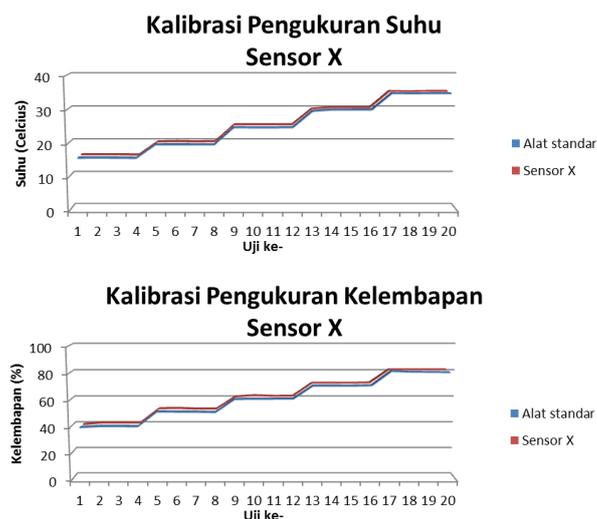


Gambar 3. Tampilan LCD

A. Pengujian Kalibrasi

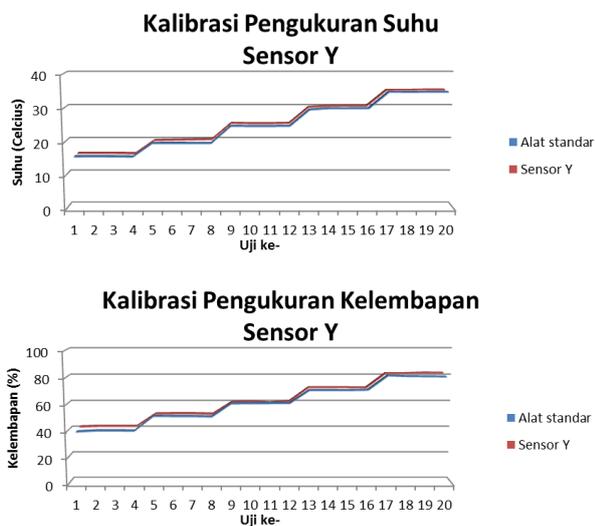
Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil keluaran perangkat rekayasa dengan hasil pengukuran alat standar di laboratorium kalibrasi Balai Besar Wilayah II BMKG, Ciputat.

Pengujian kalibrasi pertama dilakukan untuk menguji keakuratan pengukuran sensor secara independen. Dalam hal ini nilai pengukuran sensor X, Y dan Z masing-masing dibandingkan dengan hasil pengukuran alat standar.



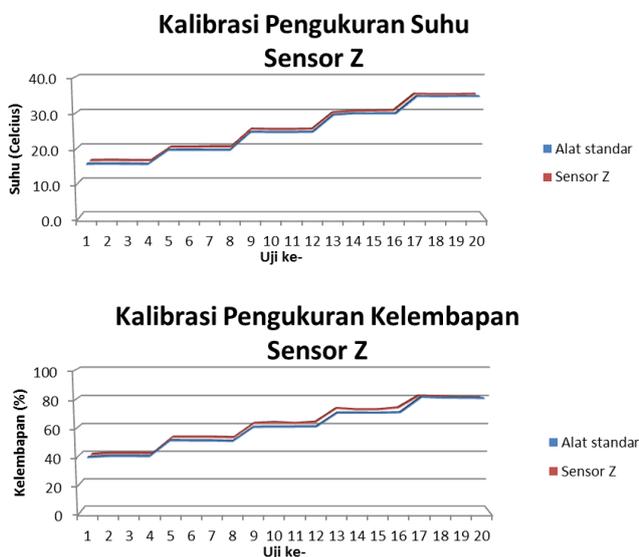
Gambar 4. Kalibrasi Sensor X (Suhu & Kelembapan)

Uji kalibrasi terhadap sensor X menunjukkan hasil yang baik dengan nilai maksimum koreksi sebesar 0,12 °C untuk pengukuran suhu dan 0,52 % untuk pengukuran kelembapan relatif.



Gambar 5. Kalibrasi Sensor Y (Suhu & Kelembapan)

Uji kalibrasi terhadap sensor Y menunjukkan hasil yang baik dengan nilai maksimum koreksi sebesar rata-rata koreksi sebesar 0,121 °C untuk pengukuran suhu dan 1,83 % untuk pengukuran kelembapan relatif.



Gambar 6. Kalibrasi Sensor Z (Suhu)

Uji kalibrasi terhadap sensor Z menunjukkan hasil yang baik dengan nilai maksimum koreksi sebesar rata-rata koreksi sebesar 0,145 °C untuk pengukuran

suhu dan 1,28 % untuk pengukuran kelembapan relatif.

Hasil uji kalibrasi terhadap sensor X, Y dan Z secara independen menunjukkan hasil yang baik. Secara keseluruhan nilai koreksi jauh di bawah ambang batas maksimum deviasi yang diijinkan WMO.

Pengujian kalibrasi tahap ke dua dilakukan terhadap rangkaian perangkat TMR sebanyak 20 kali uji terbagi dalam lima level *set point*. Resume kalibrasi ditampilkan pada Tabel II dan Tabel III.

TABEL II
PENGUJIAN KALIBRASI PERANGKAT PENGUKURAN SUHU

Set Point (°C)	Alat Standar (°C)	Perangkat TMR (°C)	Koreksi (°C)
15	15,82	15,80	0,02
	15,80	15,80	0,04
	15,80	15,80	0,02
	15,70	15,70	0,05
20	19,78	19,70	0,08
	19,82	19,80	0,02
	19,78	19,80	0,02
	19,79	19,80	0,02
25	24,83	24,90	0,07
	24,81	24,80	0,01
	24,80	24,80	0,00
	24,84	24,90	0,06
30	29,60	29,60	0,00
	30,01	30,00	0,01
	30,01	30,10	0,09
	30,02	30,10	0,09
35	34,92	34,90	0,02
	34,86	34,80	0,06
	34,91	34,90	0,01
	34,92	34,90	0,02

TABEL III
PENGUJIAN KALIBRASI PERANGKAT PENGUKURAN KELEMBAPAN

Set Point (%)	Alat Standar (%)	Perangkat TMR (%)	Koreksi (%)
40	40,22	39,59	0,63
	40,98	40,80	0,18
	41,03	40,80	0,23
	40,88	40,80	0,08
50	51,87	51,69	0,18
	51,74	51,69	0,05
	51,70	51,41	0,29
	51,40	51,41	0,01
60	60,98	60,71	0,27
	61,07	61,62	0,55
	61,15	61,11	0,04
	61,20	61,21	0,01
70	70,74	71,07	0,33
	70,72	71,13	0,41
	70,67	71,02	0,35
	70,95	71,32	0,37
80	81,56	81,29	0,27
	81,04	81,23	0,19
	80,93	81,22	0,29
	80,75	81,26	0,51

Hasil pengujian kalibrasi terhadap rangkaian perangkat TMR membuktikan bahwa perangkat yang direkayasa memiliki kemampuan operasional dengan tingkat akurasi hasil pengukuran yang baik. Pada pengukuran suhu didapatkan nilai koreksi minimum sebesar 0 °C, koreksi maksimum mencapai 0,09 °C dan rata-rata koreksi 0,04 °C. Pada pengukuran kelembapan, nilai koreksi minimum sebesar 0,01%, nilai koreksi maksimum mencapai 0,63% dan rata-rata koreksi 0,26%.

B. Pengujian Kegagalan Sensor

Dilakukan simulasi kegagalan sensor yang secara bergantian kegagalan pada masing-masing sensor. Kegagalan dimaksud adalah ketika nilai salah satu sensor memiliki selisih melampaui ambang batas δ_T maupun δ_{RH} terhadap sensor lainnya.

TABEL IV
RESUME SIMULASI KEGAGALAN PENGUKURAN SUHU

Jam Observasi	Sensor Gagal	Nilai Pengukuran Suhu (°C)			Keluaran Akhir (°C)
		X	Y	Z	
19:30	X	32,40	31,30	31,30	31,30
10:00	Y	30,10	30,60	30,10	30,10
12:30	Z	33,30	33,30	33,60	33,30

TABEL V
RESUME SIMULASI KEGAGALAN PENGUKURAN KELEMBAPAN

Jam Observasi	Sensor Gagal	Nilai Pengukuran Kelembapan (%)			Keluaran Akhir (%)
		X	Y	Z	
00:00	X	83,10	86,30	86,30	86,30
10:00	Y	70,60	72,00	70,60	70,60
20:00	Z	78,30	79,01	67,00	78,30

Hasil uji ini membuktikan bahwa perangkat dengan TMR lebih menjamin akurasi dan kontinuitas data observasi. Bahkan apabila salah satu sensor tidak menghasilkan keluaran dikarenakan kerusakan, perangkat TMR tetap akan menghasilkan data pengukuran berdasarkan nilai keluaran kedua sensor dengan syarat kedua sensor tersebut memiliki nilai dengan selisih di bawah ambang batas deviasi standar.

IV. KESIMPULAN

Penggunaan metode *Triple Modular Redundancy* pada perangkat observasi meteorologi dapat meningkatkan tingkat kepercayaan terhadap kualitas

data pengukuran. Kegagalan satu sensor tidak akan menghambat aktivitas observasi sehingga dapat dikatakan perangkat TMR lebih reliable dibandingkan dengan penggunaan sensor tunggal, dimana risiko kegagalan pengukuran dengan sensor tunggal akan lebih tinggi dibandingkan dengan rangkaian sensor TMR.

Pada pengembangan berikutnya dapat dilakukan rekayasa TMR dengan memberikan bobot kepercayaan untuk setiap sensor dalam rangkaian. Perolehan bobot hendaknya adaptif menyesuaikan kondisi sensor selama periode pengukuran, semakin sering suatu sensor mengalami kegagalan maka bobot kepercayaannya akan menurun. Dengan demikian proses voting akan menghasilkan data pengukuran yang lebih akurat.

Penambahan dua sensor *back-up* dalam rangkaian juga dapat dipertimbangkan untuk pengembangan berikutnya. Dengan demikian rangkaian perangkat pengukuran akan terdiri dari lima sensor, dimana tiga sensor aktif dan dua sensor *stand-by*. Dalam rangkaian ini diperlukan kontrol On/Off otomatis untuk mengaktifkan sensor-sensor dalam rangkaian. Kriteria On/Off dapat merujuk pada status kegagalan sensor ataupun dengan timer untuk memeperpanjang *lifetime* pengukuran.

REFERENSI

- [1] Akbar, Abdul. 2015. *Alat Untuk Memonitoring Suhu Dan Kelembaban Ruangan Radar Serta Sistem Warning Keamanan Ruangan Radar Menggunakan SMS*. Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. Jakarta.
- [2] Andoni, Sandi. 2015. *Alat Pengukur Suhu, Kelembaban Relatif, Dan Tekanan Udara Digital*. Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. Jakarta.
- [3] Apriaskar, Esa. 2012. *Aplikasi Redundant System Pada Prototype Sistem Penyaluran Tenaga Listrik Dengan Gangguan Pada Gardu Induk Penaik Tegangan Dan Bagian Pembebanan Menggunakan PLC Omron CPM1A-40 CDT-DV1*. Universitas Diponegoro. Semarang.
- [4] Basjaruddin, Noor Cholih. 2009. *Redundant Capacitive Sensor Untuk Pendeteksi Gelembung Udara Fault Tolerance*. Jurusan Teknik Elektro Negeri Bandung. Bandung.
- [5] Chen, Ling-Jyh. Gerla, Mario. Han, Chih-Chieh. Sun, Tony. *Improving Data Reliability via Exploiting Redundancy in Sensor Networks*. UCLA Computer Science Department. Los Angeles.
- [6] Djenal, Dyah Prihartini. 2015. *Sistem Monitoring Intensitas Radiasi Matahari*. Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. Jakarta.
- [7] Habinc, Sandi. 2002. *Functional Triple Modular Redundancy*. Gaisler Research. Swedia.
- [8] Moubray, John. 1997. *“Reliability Centered Maintenance”*. Second Edition, Penerbit Industrial Press Inc, New York.
- [9] Purba, Andry Boy Prima. 2015. *Studi Awal Perancangan Dan Pembuatan Alat Pengukur Suhu Kelembaban Dan Tekanan Udara Berbasis Mikrokontroler ATMEGA32*. Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. Jakarta.

- [10] Ridwan, Muhammad. 2015. Alat Pengukur Durasi Penyinaran Matahari Digital Dengan Pendeteksi Pergerakan Matahari. Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. Jakarta.
- [11] R.E. Lyons and W. Vanderkulk (1962). The Use of Triple-Modular Redundancy to Improve Computer Reliability, IBM Journal, April 1962, pp200-209.
- [12] World Meteorological Organization.2008.Guide to Meteorological Instruments dan Methods of Observation,Seventh Edition,Geneva.
- [13] <http://www.th-friedrichs.de/en/products/test-and-calibration/test-and-calibration/pressure-chamber> (diakses tanggal 19 Maret 2016)
- [14] <http://www.directindustry.com/prod/votsch-industrietechnik/product-16219-424302.html> (diakses tanggal 19 Maret 2016)
- [15] <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf> (diakses tanggal 13 Mei 2016)