

## PENGUKURAN FLUKSI PANAS LOKAL DENGAN SENSOR FLUKSI PANAS METODE NOL ATAU METODE KOMPENSASI

Hendro Tjahjono

Pusat Penelitian Teknik Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

### ABSTRAK

PENGUKURAN FLUKSI PANAS LOKAL DENGAN SENSOR FLUKSI PANAS METODE NOL ATAU METODE KOMPENSASI. Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam disain Reaktor Nuklir tidak bisa dipisahkan dari permasalahan perpindahan panas. Tuntutan untuk mencapai kesempurnaan dalam disain suatu produk teknologi, khususnya untuk komponen-komponen dimana permasalahan perpindahan panas merupakan bagian yang penting, mendorong kebutuhan akan pengukuran-pengukuran yang lebih rinci. Makalah ini mencoba terlebih dahulu mengemukakan secara umum metode-metode yang digunakan untuk mengukur besaran panas secara lokal (fluksi panas lokal) serta permasalahan-permasalahannya maupun saran-saran pemecahannya, kemudian secara khusus membahas suatu metode pengukuran dengan sensor fluksi panas metode nol atau metode kompensasi. Studi tentang karakteristik dan permasalahan sensor fluksi panas ini telah kami lakukan di Laboratoire de Thermohydrauliques des Systemes-Service de Thermohydrauliques des Reacteurs - Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble, Prancis.

### ABSTRACT

MEASUREMENT OF LOCAL HEAT FLUX BY HEAT FLUX SENSORS USING NUL METHODE OR COMPENSATION METHODE. The development of science and Technology in nuclear reactor design can not be separated from heat transfer problems. The needs of achieving the perfect design of a technology product, especially for the components in which the heat transfer problems are an important part, leads to more detailed measurements. This paper describes the general methods to measure the local heat flux and then to explore the nul or compensation methode. Study of the characteristics of this methode and the problems of flux sensors has been done by the authors in Laboratoire de Thermohydrauliques des Systemes-Service de Thermohydrauliques des Reacteurs Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble France.

### PENDAHULUAN

Pengukuran fluksi panas semakin menjadi suatu kebutuhan dasar di dalam studi keseimbangan panas dari suatu sistem dengan lingkungan sekitarnya.

Di dalam perpindahan panas, fluksi panas didefinisikan sebagai panas (dalam watt) yang melewati suatu penampang tertentu. Kita juga bisa mendefinisikan 'kerapatan fluksi panas', yaitu besarnya fluksi panas per satuan luas tertentu ( $\text{watt/m}^2$ ). Dalam hal pengukuran fluksi panas lokal, yang diukur tidak lain adalah kerapatan fluksi panas di tempat/lokal tersebut.

Untuk memberikan gambaran lebih jelas tentang perbedaan fluksi panas 'lokal' dari fluksi panas 'global' yang dipertukarkan pada suatu sistem, kita bisa mengambil contoh dari sebuah setrika listrik. Fluksi panas global yang dikeluarkan setrika listrik (dalam hal ini merupakan sistem yang kita amati) dengan mudah dapat kita ukur dengan mengukur daya listrik

yang diserap oleh setrika tersebut. Jika yang ingin kita ketahui adalah distribusi panas yang dikeluarkan pada seluruh permukaan setrika (untuk keperluan disain yang optimal misalnya), kita harus melakukan pengukuran fluksi panas secara mendetail pada permukaan setrika tersebut. Dalam hal ini kerapatan fluksi panas lokal yang kita ukur.

### TINJAUAN UMUM TENTANG METODE - METODE PENGUKURAN FLUKSI PANAS LOKAL

Berbagai metode telah banyak digunakan untuk mengukur fluksi panas lokal yang penerapannya disesuaikan dengan kondisi-kondisi pengukurannya (geometri sistemnya, cara perpindahan panasnya, batas temperaturnya, tersedianya peralatannya, dsb.). Untuk itu kita bisa mengelompokkan secara garis besar dua grup metode yang berbeda, yaitu:

- Metode-metode pengukuran yang langsung menggunakan sensor fluksi panas (fluksimeter panas)
- Metode-metode yang tidak menggunakan sensor fluksi panas; dalam hal ini pengukuran fluksi panas biasanya dilakukan secara tidak langsung, misalnya : fluksi panas yang melewati suatu jendela kaca yang tebalnya (e) dan koefisien perambatan panasnya diketahui (k) diukur dengan cara mengukur temperatur di masing-masing permukaannya (T<sub>1</sub> dan T<sub>2</sub>). Maka kerapatan fluksi panas (φ) di titik tersebut bisa dihitung dengan formula Fourier:

$$\varphi = \frac{k (T_1 - T_2)}{e}$$

Demikianlah pada umumnya di dalam pengukuran fluksi panas, prinsip-prinsip yang digunakan seringkali sangat sederhana, tetapi tidaklah demikian dalam disain dan aplikasinya, dimana seringkali kita dihadapkan pada kondisi yang tidak memungkinkan untuk menerapkan prinsip-prinsip yang sederhana tersebut.

Mengenai sensor fluksi panas (fluksimeter panas), pada umumnya mereka berukuran sangat kecil dibanding dimensi sistem yang diukur dengan tujuan antara lain untuk memperoleh pengukuran yang lebih mendetail dan juga untuk mengurangi gangguan pengukuran yang ditimbulkan oleh sensor itu sendiri. Pada prinsipnya, kerapatan fluksi panas yang diukur diperoleh dengan mewakili besaran tersebut ke dalam besaran lain yang bisa dipresentasikan dalam bentuk sinyal, pada umumnya sinyal listrik, yang sebanding dengan besaran tersebut. Besaran-besaran yang dipresentasikan dalam bentuk sinyal bisa berupa , misalnya: perbedaan temperatur antara dua permukaan yang dilalui fluksi panas, perubahan temperatur sebagai fungsi waktu, atau besaran-besaran lain yang semuanya disesuaikan dengan tipe sensornya.

Di dalam realisasi suatu sensor fluksi panas, beberapa besaran yang penting dalam penentuan karakteristiknya antara lain adalah:

- dimensi, yaitu luas permukaan dan ketebalannya,
- Kelenturan, yang dinyatakan dalam jari-jari lengkungan maksimum, dimana semakin rendah besaran ini, semakin tinggi kemampuan sensor untuk mengikuti bentuk permukaan yang lengkung,

- sensitivitas, yaitu perbandingan antara besar sinyal yang dihasilkan dengan fluksi yang diukur,
- waktu respon, yaitu waktu yang diperlukan dari saat mana fluksi panas ditangkap oleh sensor sampai terbaca oleh alat ukur (dalam bentuk sinyal). Waktu respon yang pendek akan memberikan kemungkinan lebih baik untuk mengikuti setiap perubahan fluksi terhadap waktu,
- range temperatur penggunaannya, dan
- range fluksi panas yang diukur.

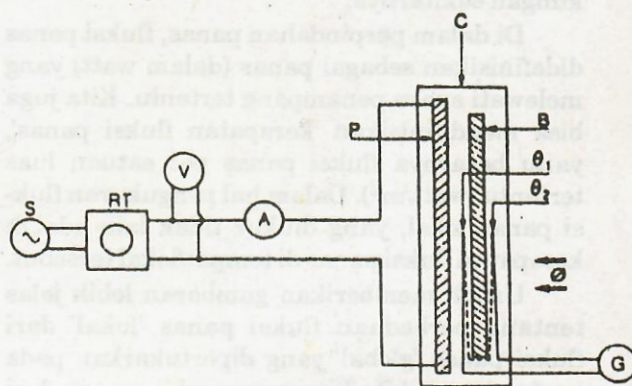
Tiga jenis sensor fluksi panas yang dibedakan berdasarkan prinsip yang digunakan bisa kita tinjau di sini, yaitu :

- Sensor-sensor fluksi panas tipe gradient, yang mengeksploitir gradient temperatur yang ditimbulkan oleh fluksi panas dalam suatu bahan konduktor. Sensor-sensor jenis ini merupakan yang paling terhadulu dikenal dan digunakan.
- Sensor-sensor fluksi panas tipe inersi, yang mengeksploitir kenaikan temperatur dari suatu bahan akibat penyerapan fluksi panas oleh bahan tersebut.
- Sensor-sensor fluksi panas metode nol atau metode kompensasi, yang mengenolkan gradient temperatur yang disebabkan oleh fluksi panas yang diukur dengan fluksi kompensasi yang melawan fluksi yang diukur.

### PRINSIP KERJA PLUKSIMETER PANAS METODE NOL

Secara garis besar prinsip kerja fluksimeter-fluksimeter panas metode nol bisa digambarkan dalam skema berikut ini:

Keterangan gambar:



Gambar 1. Prinsip kerja sensor fluksi metode nol

- A = ampermeter (pengukur arus listrik),
- B = lempeng bahan dimana perbedaan temperatur dideeteksi
- C = fluksimeter panas (sensor fluksi panas)
- G = galvanometer (untuk mendeteksi/mengukur perbedaan temperatur pada lempeng B),
- P = elemen pemanas (pembangkit fluksi panas kompensasi),
- RT = pengatur dan penstabilisasi tegangan,
- S = sumber listrik,
- V = voltmeter,
- $\phi$  = kerapatan fluksi panas yang diukur,
- $\phi_1, \phi_2$  = Temperatur-temperatur yang terukur di masing-masing permukaan lempeng B.

Dengan terlaluinya lempeng B oleh fluksi panas yang diukur, maka sesuai dengan hukum perambatan panas secara konduksi, akan timbul perbedaan temperatur di antara kedua permukaan lempeng B yang bisa dideteksi oleh galvanometer G. Dengan kata lain, yang terjadi pada lempeng B adalah identik dengan prinsip kerja fluksimeter panas metode 'gradient' (sensor fluksi panas tipe 'gradient').

Jika pada lempeng pemanas P kemudian dialirkan arus listrik, maka sebagian fluksi panas yang ditimbulkannya akan melawan aliran fluksi panas  $\phi$  yang diukur sehingga menyebabkan berkurangnya fluksi panas yang melampaui lempeng B. Hal ini bisa terdeteksi oleh penunjukan pada galvanometer G. jika arus listrik terus kita naikkan, kita akan sampai pada suatu kondisi penunjukan nol pada galvanometer. Kondisi ini menunjukkan bahwa kerapatan fluksi panas yang melawan fluksi  $\phi$  kita namakan saja 'fluksi panas kompensasi' ( $\phi$ ) telah sama besarnya dengan  $\phi$ . Jika kerapatan fluksi panas  $\phi$  diketahui maka berarti kerapatan fluksi  $\phi$  bisa diukur. Untuk mengetahui  $\phi$  hanya bisa dilakukan dengan pendekatan terhadap besarnya daya listrik W yang kita susutkan pada lempeng pemanas P, yaitu dengan cara membagi daya listrik W dengan luas lempeng pemanas (S). Agar harga  $\phi$  benar-benar mendekati W/S haruslah di dalam pengukurannya diusahakan agar tahanan panas pada sisi dalam dari elemen pemanas (sisi yang menggagang fluksi panas yang diukur) bisa diabaikan terhadap tahanan panas pada sisi lainnya.

Dua keuntungan yang menonjol dari metode ini adalah :

- a) Ketebalan dan konduktivitas panas bahan B, serta sensitivitas dari termokopel-termokopel yang digunakan tidaklah penting untuk diketahui, tambahan lagi kalibrasi terhadap jenis sensor ini bukan merupakan suatu

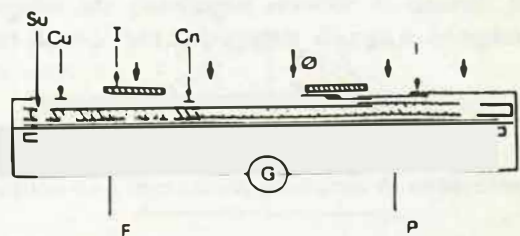
keharusan seperti halnya pada sensor-sensor tipe gradient.

- b) Kita bisa menggunakan sensor ini sebagai sensor fluksi panas tipe gradient dengan mengkalibrasinya terlebih dahulu. Kalibrasi ini bisa dilakukan dengan mengisolasi sisi luar elemen pemanas; kemudian dengan menggunakan elemen pemanas itu sendiri sebagai sumber fluksi, kita cacat gradient temperatur yang terdeteksi pada galvanometer.

### REALISASI DARI FLUKSIMETER PANAS METODE NOL

Realisasi dari fluksimeter panas jenis ini relatif masih sangat baru, itupun belum melangkah ke produksi dalam skala besar. Menurut sepengetahuan kami baru satu realisasi yang telah dipublikasikan dan diproduksi dalam skala laboratorium, yaitu yang dikembangkan oleh Laboratorium Elektronika Dasar dari Universitas Paris VI di Orsay, Perancis. Pengujian karakteristik dan keandalan fluksimeter panas ini (prototipenya) telah kami lakukan di Laboratoire de Thermohydrauliques des Systemes, Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble.

Dalam fluksimeter panas ini, termokopel-termokopel pengukur temperatur yang mengapit lempeng bahan B pada gambar 1, ditempatkan pada satu bidang sehingga memudahkan realisasinya (lihat gambar 2).



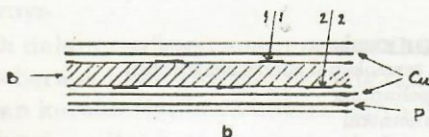
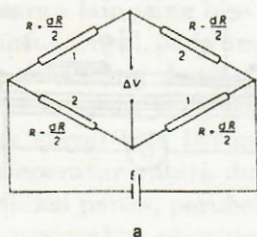
**Keterangan gambar:**

- Cu, Cn = termokopel cuivre/constantan
- F = film pelindung
- G = galvanometer
- I = bahan isolasi
- P = elemen pemanas
- Su = lempeng penyangga (support)
- $\phi$  = fluksi yang diukur

Gambar 2. Realisasi dari fluksimeter metode nol

Agar perbedaan temperatur tetap bisa diperoleh dengan adanya fluksi panas yang diukur, maka salah satu dari dua termokopel ditutup dengan bahan isolasi (resine) secara berselang-seling. Termokopel yang digunakan adalah dari jenis Cu/Cn yang mempunyai sensitivitas sekitar 41  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Mengingat tipisnya sensor ini (bahan isolasi tersebut di atas hanya setebal 25  $\mu\text{m}$ ), maka perbedaan temperatur yang dihasilkannya pun sangat kecil sehingga sulit terdeteksi oleh galvanometer. Masalah ini diatasi dengan memperbanyak jumlah termokopel yang dirangkai secara seri. Berkaitan perkembangan teknologi mikroelektronik, telah berhasil ditempatkan tidak kurang dari 400 termokopel untuk luas sekitar 1  $\text{cm}^2$  dan dengan tebal total tidak lebih dari 200  $\mu\text{m}$ . Sistem ini mampu mengukur dengan baik rapat fluksi panas yang hanya sebesar 1  $\text{W}/\text{m}^2$ .

Satu alternatif yang lain dari realisasi sensor fluksi panas jenis ini adalah dengan mengganti termokopel-termokopel pendeteksi beda temperatur dengan satu rangkaian jembatan (jembatan Wheat Stone misalnya) dari tahanan-tahanan termometrik (gambar 3). Kedua grup tahanan dalam rangkaian ini masing-masing diletakkan pada kedua permukaan lempeng bahan B pada gambar 1. Dengan adanya perbedaan temperatur yang ditimbulkan oleh fluksi panas, maka keseimbangan jembatan ini menjadi terganggu sehingga galvanometer akan mencatat penunjukkan tidak nol. cara kerja selanjutnya identik dengan model yang terdahulu.



a) Jembatan tahanan-tahanan termometrik  
b) Penampang fluksimeter

Gambar 3. Fluksi metode nol dengan tahanan termometrik

Sebagai contoh perhitungan bisa diberikan di sini bahwa jika rangkaian jembatan diberi sumber tegangan sebesar  $E$ , maka ketidakseimbangan yang terjadi adalah :

$$\Delta V = \frac{E}{2} \frac{dR}{R}$$

dengan  $dR$  adalah beda tahanan antara kedua grup tahanan yang disebabkan oleh timbulnya perbedaan temperatur antara kedua permukaan lempeng B.

Dengan memasukkan koefisien temperatur dari tahanan yaitu :

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T} \frac{dR}{R}$$

kita peroleh

$$\frac{dR}{R} = \alpha \Delta T$$

Sebagai contoh, untuk tahanan termometrik dari nikel dengan harga  $\alpha = 4 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ ; maka untuk lempeng B setebal  $e = 0,1 \text{ mm}$  dengan konduktivitas panas sebesar  $k = 0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  serta untuk kerapatan fluksi panas sebesar  $\phi = 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , beda tegangan relatif yang dihasilkan adalah

$$\frac{\Delta V}{E} = \frac{\alpha}{2} \phi \frac{e}{k} = 2 \times 10^{-6} \text{ atau } 2 \mu\text{V}/\text{V}$$

Harga ini cukup memadai untuk dideteksi oleh peralatan yang digunakan pada umumnya.

### MASALAH DALAM PENGUKURAN FLUKSI PANAS DENGAN FLUKSIMETER

Mengingat penempatannya sebagai interface ( di antara permukaan sistem dan lingkungan sekitarnya ), maka jelas bahwa seluruh tipe sensor fluksi panas akan memodifikasi keadaan dari permukaan tersebut, yaitu antara lain yang menyangkut :

- koefisien perpindahan panas secara radiasi, haruslah diusahakan agar keadaan permukaan fluksimeter panas sama dengan keadaan permukaan sistem yang diukur;
- koefisien perpindahan panas secara konveksi, antara lain dengan adanya ketebalan lebih, kekasaran permukaan yang berbeda, dsb.
- tahanan panas yang berlebihan yang baik disebabkan oleh ketebalan dari fluksimeter itu sendiri maupun adanya tahanan kontak antara fluksimeter dan permukaan sistem, yang terakhir ini sangat bergantung dari pemasangan fluksimeter itu sendiri.

Khusus mengenai fluksimeter panas metode nol, dari hasil pengujian dan kalibrasi lebih mendalam tentang karakteristik dan teknik-teknik penggunaannya yang telah kami lakukan di Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble, bisa diangkat dua problem utama yaitu :

- Selama kompensasi fluksi panas berlangsung, dimana kedua fluksi saling menghilangkan, maka fluksi yang diukur tidak bisa lagi melewati fluksimeter. Keadaan ini bisa menyebabkan naiknya temperatur di tempat tersebut akibat naiknya tahanan panas dari fluksi yang merambat di dalam bahan di daerah di permukaan. Kenaikan temperatur ini menyebabkan naiknya fluksi kompensasi dari yang seharusnya diperlukan, sehingga menimbulkan kesalahan ukur.
- Mengingat prinsip kerja dari fluksimeter itu sendiri, maka kesalahan ukur akan bertambah besar jika tahanan panas dari sisi dalam (dari arah datangnya fluksi panas yang diukur) tidak bisa diabaikan terhadap tahanan panas dari sisi luar.

Memandang kedua problem ini, aplikasi yang terbaik dari sensor fluksi panas jenis ini bisa disebutkan antara lain untuk ;

- mengukur fluksi panas yang dikeluarkan oleh suatu permukaan dari bahan konduktor panas ke lingkungan sekitarnya yang memiliki koefisien perpindahan panas relatif rendah (konveksi bebas, radiasi pada temperatur rendah, dsb.)
- mengukur fluksi panas yang diserap oleh suatu permukaan isolator dari lingkungan sekitarnya yang memiliki koefisien perpindahan panas relatif cukup tinggi (konveksi paksa, dsb.).

#### DAFTAR PUSTAKA

1. THUREAU, P. : Fluxmetres Thermiques. Techniques de l'ingenieur, Mesures et controles, R-2300 (1987) 1-7.
2. HENDRO TJAHJONO : Methodes des Mesures de Flux Thermique Local. INSTN - Session d'Etude sur les Ecoulements et Transferts de Chaleurs Monophasiques, Grenoble (12-16 Mars 1990).
3. HENDRO TJAHJONO et PICUT M. : Utilisation de Fluxmeters Thermiques a Methode de Zero. Compte rendu d'essais STT/LTMP/89- 04-B/HT/MP/pd (Avril 1989).
4. BENJELLOUN, Y. cs.: Problemes poses par la determination precise de densites locales de flux de chaleur. Congres SFT (29 Nov. 1989).
5. THUREAU, P., CIAME ; Fluxmetre miniature a methode de zero utilisant les techniques de zero utilisant les techniques de la microelectronique. Congres SFT (20-1-1988).

Dari studi pengujian di atas juga diperoleh dispersi pengukuran fluksi panas sebesar  $\pm 10\%$ . Harga ini bisa diperkecil jika kondisi-kondisi pengukuran yang ideal bisa didekati dengan memperhatikan problema tersebut di atas.

#### KESIMPULAN

Dari seluruh pembahasan ini, kiranya bisa ditarik kesimpulan secara garis besar, yaitu bahwa pengukuran fluksi panas lokal yang dipertukarkan oleh suatu sistem dengan lingkungan sekitarnya pada umumnya menggunakan prinsip-prinsip yang sederhana tetapi dalam realisasi dan aplikasinya seringkali terbentur dengan problem-problem yang sulit diatasi. Oleh sebab itu maka realisasi suatu sensor fluksi panas hendaklah juga disertai pengujian-pengujian yang sistematis agar diperoleh teknik-teknik atau syarat-syarat penggunaan yang mendekati ideal.

Dalam aplikasinya di bidang reaktor nuklir yang memang tidak bisa terlepas dari permasalahan perpindahan panas, sensor fluksi panas inipun memegang peranan yang sangat penting terutama dalam studi-studi disain komponen-komponen reaktor dalam skala laboratorium (penukar kalor, perpipaan reaktor, dsb.) maupun untuk keperluan studi dasar (pengukuran koefisien-koefisien perpindahan panas, koefisien radiasi panas, bahkan bisa digunakan untuk mengukur karakteristik termik suatu bahan). Sebagai contoh, kami telah menggunakannya dalam studi perambatan panas secara konveksi bebas maupun campuran pada pipa injeksi air pendingin reaktor di daerah yang langsung berhubungan dengan rangkaian primer.

## DISKUSI

### Hengki:

Menurut pengalaman anda dari pengukuran fluksi panas tersebut berapa efisiensi daya listrik yang dapat diukur pada suatu heater?

Apakah kalau 100 KW listrik juga bisa diukur 100 KW panas.

### Hedro:

Kami sudah melakukan pengujian-pengujian terhadap dua jenis fluksimeter yaitu metode gradien dan metode nol. Pengujian dilakukan pada suatu kalibrator (berupa heater) yang bisa dievaluasi dengan ketelitian  $\pm 3\%$  besarnya fluksi yang dikeluarkan. Hasil pengujian ini memberikan dispersi pengukuran  $\pm 8\%$  untuk range rapat fluksi dari  $10 \text{ mV/cm}^2$  s.d  $150 \text{ mW/cm}^2$  dan range temperatur dari  $30^\circ - 150^\circ\text{C}$ . Percobaan dilakukan dengan pengulangan (pada kondisi yang sama) sebanyak  $\pm 10$  kali.

### Rickwan Mucksin:

1. Apakah dalam pengukuran yang dilakukan, pengaruh dari kehalusan permukaan pemanas dan sensor yang bersentuhan tsb diperhitungkan? Jika ya, apakah dibagi dalam daerah-daerah/range kehalusan tertentu?

2. Bagaimana caranya mengkalibrasi sensor dari alat pengukur flux panas?

### Hendro :

1. Kekasaran permukaan memang akan mempengaruhi ketepatan pengukuran fluksi panas karena akan menambah tahanan panas (tahanan kontrol) yang secara umum akan mengurangi fluksi yang hendak diukur. Khusus untuk fluksimeter metode nol, pengaruh kekasaran permukaan menjadi lebih besar karena akan menambah fluksi kompensasi yang harus diinjeksikan untuk "meng-nol-kan" fluksi yang diukur.

Tidak diberikan range kekasaran tetapi disarankan untuk menghaluskan/mengurangi kekasaran terlebih dahulu sebelum fluksimeter dipasang.

2. Pada prinsipnya diperlukan suatu alat yang bisa memberikan fluksi panas yang besarnya bisa diketahui dengan tepat. Misalnya alat pemanas yang pembagian panasnya diusahakan merata. Untuk fluksimeter metode nol bisa dikalibrasi dengan elemen pemanas yang dimiliki oleh fluksimeter tersebut.

### Abbas Salihum:

Dari beberapa metoda pengukuran Fluksi panas maka metoda mana yang terbaik dan menghasilkan data yang dapat dipercaya?

### Hendro:

Setiap metoda memiliki kelemahan dan kelebihan masing-masing dan hal ini sangat tergantung dari penerapannya masing-masing. Mungkin dari makalah terlampir ini bisa diambil kesimpulan metoda apa yang sebaiknya digunakan dalam suatu kondisi pengukuran.