

Diterima: 30 Juni 2015, Direvisi: 1 Juli 2015, Diterbitkan 31 Juli 2015



PENGUKURAN VISKOSITAS NITROGEN MENGGUNAKAN METODE PIPA KAPILER PADA TEMPERATUR 298 SAMPAI 500 K, DAN TEKANAN 5 SAMPAI 100 MPA

Elin Yusibani¹⁾, Yasuyuki Takata²⁾¹⁾Departemen Fisika, Universitas Syiah Kuala, Nangro Aceh Darussalam, Indonesia²⁾Department of Mechanical Engineering, Kyushu University, Japan

ABSTRAK

Alat ukur viskositas sebuah gas pada suhu dan tekanan tinggi telah di rancang menggunakan metode pipa kapiler. Pipa kapilari ini memiliki diameter 0.1 mm dan panjang sebesar 500 mm yang berbahan gelas Quartz. Telah dilakukan pengukuran pada empat suhu isoterm, yakni 298, 333, 400 dan 500 K pada tekanan dari 5 sampai 100 MPa untuk gas nitrogen. Hasil pengukuran telah dibandingkan dengan database REFPROP dan memiliki perbedaan sebesar $\pm 2\%$ yang mana besarannya konsisten dengan ketidakpastian alat ukur tersebut.

Kata kunci

Gas; nitrogen; pipa kapiler; viskositas; tekanan tinggi; suhu tinggi

PENDAHULUAN

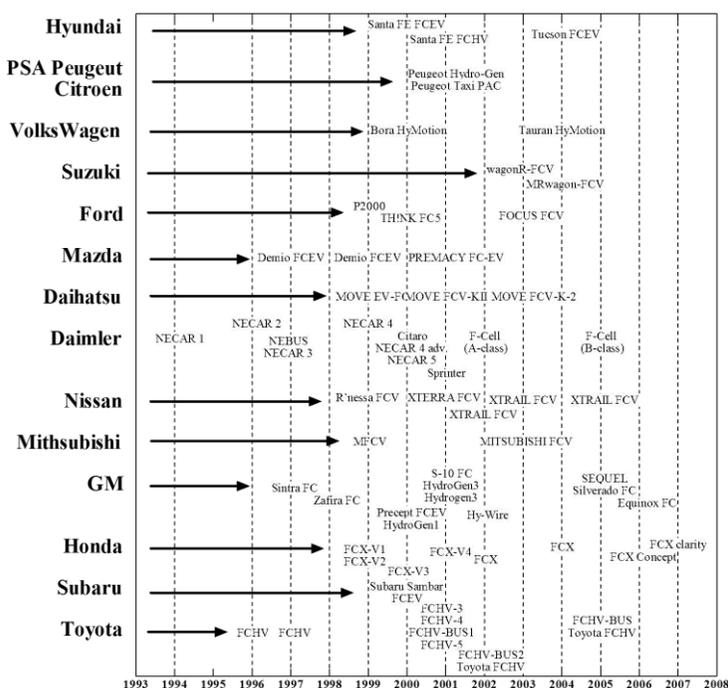
Energi merupakan salah satu agenda terbesar di dunia ini yang harus diselesaikan. Cadangan minyak yang terus menurun dan juga produksi carbon hasil pembakaran yang tidak ramah terhadap lingkungan menjadi salah satu pertimbangan pencarian sumber energi baru. Hidrogen merupakan gas molekul yang melimpah di alam. Dengan menggunakan teknologi tertentu maka hidrogen dapat menjadi salah satu sumber energi yang cukup diperhitungkan. Penggunaan

hidrogen saat ini cukup berkembang pesat pada kendaraan roda empat yang dikenal dengan nama *Fuel Cell Hydrogen Vehicle* (FCHV). Seluruh dunia telah berupaya mengembangkan FCHV. Berawal dari suksesnya peluncuran pesawat ruang angkasa GEMINI pada tahun 1965 [1] yang menggunakan *fuel cell* berbahan polymer elektrolit. Sekitar 30 tahun setelah peristiwa itu Daimler-Benz AG pertama kali mengeluarkan sebuah FCHV pada tahun 1994. Berangkat dari penemuan tersebut dalam hitungan 12 tahun telah lahir berbagai FCHV di seluruh dunia dengan berbagai merek perusahaan. Gambar 1 menunjukkan sejarah pertumbuhan FCHV di dunia sampai tahun 2008. Toyota memimpin perkembangan FCHV di Jepang dan diakhiri oleh Honda dengan FCX *clarity*. Tanki-tanki FCHV membutuhkan pengisian hidrogen sampai tekanan 70 MPa dari sebelumnya yakni 35 MPa. Penambahan volume hidrogen pada tanki FCHV diharapkan dapat menambah jarak tempuh sebuah FCHV sampai dengan ± 50 km. Seiring dengan perkembangan FCHV maka telah pula dipersiapkan hidrogen stasiun pada titik-titik pusat kota tertentu yang mana hidrogen siap di manfaatkan sampai dengan 70 MPa. hidrogen stasiun ini nantinya akan berfungsi untuk mengisi ulang bahan bakar hidrogen pada tanki-tanki FCHV. Sebagai contoh di negara Jepang, telah di persiapkan sekitar sebelas hidrogen stasiun yang beroperasi di pusat kota metropolitan Tokyo, Chubu distrik, Kansai distrik [2] dan juga telah dibangun di Kyushu University, kampus Ito, Kyushu distrik.

Sebuah review telah dilakukan oleh Leachman *et al* [3]. Dia menyebutkan bahwa data empirik dari *thermophysical properties* hidrogen tidak cukup pada suhu tinggi, tekanan tinggi dan juga pada suhu rendah, tekanan tinggi. Leachman bersama koleganya telah membuat sebuah persamaan untuk memprediksi data-data tersebut berdasarkan data empirik. Sehingga Leachman menyarankan dibutuhkan sebuah data terbaru pada kondisi tersebut diatas yang diharapkan memiliki tingkat keakuratan yang tinggi demi pengembangan database. Viskositas adalah salah satu transport properti yang sangat penting pada setiap sistem yang mengalir. Untuk dapat merancang sebuah sistem yang efektif dan efisien maka informasi data viskositas yang akurat sangat diperlukan.

Berdasarkan latar belakang tersebut diatas maka dirancanglah sebuah sistim alat ukur yang dapat mengukur gas viskositas pada suhu dan tekanan tinggi. Beberapa peneliti di dunia telah berhasil mengukur hidrogen menggunakan metode pipa kapiler. Metode pipa kapilar dipilih karena sangat sederhana dan juga efektif untuk mengukur viskositas yang bernilai rendah. Dengan pertimbangan tersebut maka metode ini dipilih. Dalam sebuah akuisisi data, diperlukan sebuah gas referensi

untuk mengecek performansi sebuah alat ukur. Dalam hal ini gas nitrogen telah dipilih sebagai gas referensi untuk mengkonfirmasi performansi dari alat ukur tersebut dan sekaligus menentukan tingkat ketidakpastian alat ukur tersebut. Alat ukur ini nantinya akan digunakan untuk mengukur hidrogen pada suhu 298 sampai 500 K and tekanan dari 5 sampai 100 MPa, maka pada kondisi tersebut pulagas nitrogen akan di ukur. Hasil pengukuran akan di bandingkan dengan sebuah persamaan empirik yang telah di kembangkan oleh NIST (USA) bernama REFPROP [4]. REFPROP adalah sebuah software komersial yang di jual bebas berisi kumpulan persamaan-persamaan yang akan menghitung sebuah properti pada kondisi input tertentu.



Gambar 1. Sejarah pertumbuhan FCHV di dunia [2]

Prinsip Pengukuran

Dalam menentukan viskositas menggunakan metode pipa kapiler dibutuhkan beberapa informasi sebagai berikut: beda tekanan di dalam pipa kapiler (ΔP),

geometri dari pipa kapiler (diameter, $D(=D/a)$ dan panjang pipa, l), temperature (T), flowrate (Q) dan rapat massa dari gas tersebut (ρ). Dengan menggunakan hukum persamaan *Hagenbach-Poiseulle*, maka informasi viskositas dapat di dapatkan berdasarkan Persamaan 1

$$\eta = \frac{\Delta P \pi a^4}{8Q(l+na)} - m \frac{\rho Q}{8\pi(l+na)} \quad (1)$$

Persamaan di atas berlaku apabila gas yang di alirkan pada pipa kapiler adalah *newtonian*, *incompresible* dan *laminar flow*. m dan n adalah koreksi yang berhubungan dengan hilang nya energi kinetik pada inlet dan outlet disebabkan *pressure head loss* dan faktor *end-effect* yang mengakibatkan pengkoreksian pada panjang pipa sebenarnya dari pipa kapiler tersebut. Apabila telah terjadi memampatan (*compressible*) maka yang akan terjadi adalah kerapatan massa di dalam pipa kapiler (ρ) akan bervariasi. Untuk mengantisipasi nya maka diperlukan koreksi lain untuk persamaan 1 diatas menjadi persamaan 2 di bawah ini.

$$\eta = \frac{\pi a^4 (P_{in} - P_{out} - \Delta P_o) P_{in} + P_{out}}{8Q_{in} (l+na) 2P_{in}} - \frac{\rho_{in} Q_{in}}{8\pi(l+na)} \left(m + \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (2)$$

Tetapi dalam analisa kita masih bisa menggunakan persamaan 1 di atas dengan melakukan koreksi pada kerapatan massa dan tekanan menjadi

$$\rho(P) = \frac{\rho(P_{in}) + \rho(P_{out})}{2} \quad (3)$$

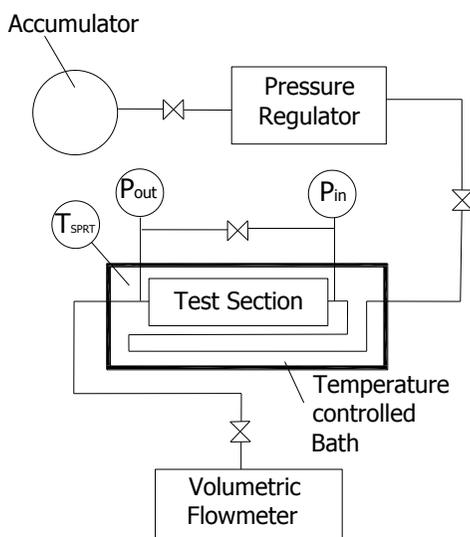
$$P = \frac{P_{in} + P_{out}}{2}$$

Eksperimen apparatus

Gambar 2 menunjukkan skematik diagram dari apparatus yang telah di rancang terkhususkan untuk pengukuran pada temperatur dan tekanan tinggi. Sampel gas dikumpulkan pada tabung akumulator sebanyak 1-4.5 liter lalu di lewatkan pada pipa kapiler melalui regulator tekanan. Regulator ini memiliki peranan yang

sangat penting sebagai penstabil tekanan di dalam pipa kapiler menjadi *steady state flow*.

Diameter pipa kapiler diukur menggunakan metode gravitasi. Metode ini menggunakan likuid merkuri yang di alirkan pada pipa kapiler pada suhu tertentu. Untuk pengukuran seakurat mungkin maka likuid merkuri yang di alirkan pada pipa maksimum sepanjang pipa tersebut, setelah itu besaran massa dari likuid merkuri itu diukur menggunakan timbangan METTLER TOLEDO. Diameter dari pipa didapatkan dengan menggunakan hubungan persamaan massa, rapat masa dan volume dari pipa kaliper. Sebagai perbandingan, pengukuran diameter pipa juga dilakukan dengan metode *electrical resistivity*. Dalam metode ini diameter dihasilkan dari hubungan resistan, panjang pipa dan elektrik resistiviti dari likuid merkuri pada suhu tertentu. Pengukuran suhu pada pipa kapiler menggunakan standard platinum resistivity temperature (SPRT) sensor yang di baca berdasarkan ITS90 oleh super termometer dari Hart Scientific. Tekanan dan beda tekanan di ukur menggunakan instrumen dari Paroscientific. Inc. Flowrate diukur menggunakan gas meter dari RITTLER[®]. Semua intrument di rancang untuk mengukur secara otomatis dengan bantuan komputer sehingga cukup aman dan praktis.



Gambar 2. Skematik diagram aparatus

Dengan membuka katup pada flowmeter dan mengatur besarannya maka akan terjadi beda tekanan pada inlet dan outlet pipa kapiler yang nantinya berguna untuk menentukan viskositas berdasarkan hubungan persamaan *Hagenbach-Poiseulle*. Dengan menseting temperatur maka kita bisa mendapatkan data-data viskositas pada berbagai kondisi isotherm.

Beda tekanan yang di hasilkan pada rancangan ini di dapatkan dari pengukuran tekanan di inlet dan tekanan di outlet berdasarkan persamaan di bawah ini

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} - \Delta P_o \quad (4)$$

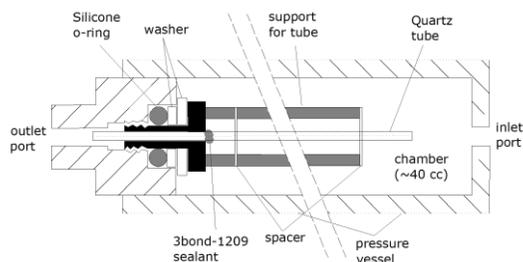
ΔP_o adalah koreksi terhadap *zero offset*, dimana.

$$\Delta P_o = \frac{\Delta P_{oi} + \Delta P_{of}}{2} \quad (5)$$

ΔP_{oi} and ΔP_{of} adalah pengukuran *zero offset* sebelum dan sesudah pengukuran. Koreksi ini terjadi karena dalam praktiknya dua sensor telah di gunakan yang mana keduanya telah dikalibrasi secara individual. Perbedaan nilai kalibrasi tersebut menimbulkan perbedaan pembacaan tekanan pada kondisi tertentu. Koreksi ini juga disebabkan oleh perbedaan suhu dan jeda waktu pengukuran karena keduanya diletakkan berbeda jarak sekitar 1m. Pemilihan dua sensor sebagai pengukur beda tekanan adalah dikarenakan saat ini belum tersedianya manometer yang dijual secara komersial terkhususkan untuk suhu dan tekanan tinggi.

Gambar 3 menunjukan penampang dari bagian *test-section*. Diameter dari pipa kapiler ini adalah 0.0945 mm dan panjang nya sebesar 501.6 mm. *Test-section* ini memuat volume gas sampel sekitar 40 cc. pipa Quartz berada tepat di pusat *test-section* dengan bantuan empat buah besi batangan dan diikat dengan sebuah lingkaran besi yang di buat khusus (*spacer*). Bagian terpenting dari *test section* ini adalah *sealant*. *Sealant* ini akan menahan tekanan gas yang keluar dari *test-section* selain dari dalam pipa kapiler. Apabila *sealant* ini mengalami kebocoran maka beda tekanan yang di hasilkan pada inlet dan outlet pipa kapiler tidaklah akurat lagi, melainkan telah tereduksi oleh kebocoran dari arah *sealant* tersebut. Yang berperan sebagai *sealant* pada rancangan ini adalah: *3bond-1209*, dua buah

washer dan *silicone o-ring*. Ketiganya memiliki peranan penting terutama saat beda tekanan mencapai kurang dari 100 kPa.

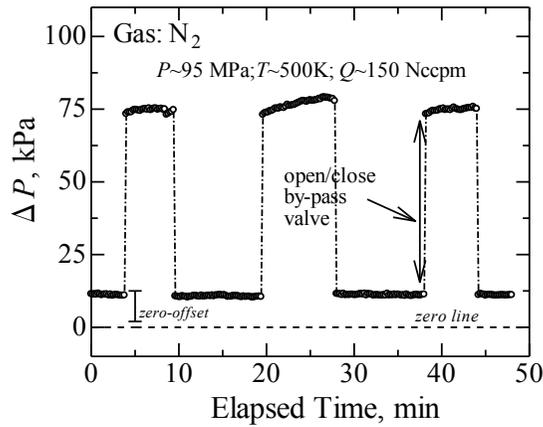


Gambar 3. Detail dari test section

Prosedur dari pengukuran viskositas menggunakan sistem alat ukur ini adalah menseting besaran *flowrate* pada *flowmeter*, lalu pada temperature tertentu dilakukan pengukuran beda tekanan untuk setiap absolut tekanan tertentu dari 5 sampai 100 MPa.

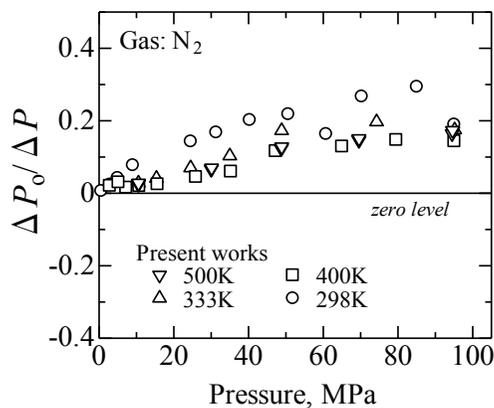
HASIL EKSPERIMEN

Seperti yang telah di sebutkan di atas bahwa dalam mengukur beda tekanan dibutuhkan informasi tekanan pada posisi inlet dan outlet. Gambar 4 menunjukkan contoh hasil pengukuran absolut dari gas nitrogen yang dialirkan pada pipa kapiler. Terlihat jelas bahwa kondisi titik NOL telah berpindah beberapa kPa yang mana telah kita sebut sebagai *zero-offset*. Ketika kita menutup/membuka katup *by-pass* maka saat itu gas akan mengalir/tidak mengalir melalui pipa kapiler sehingga dapat di pahami bahwa saat katup ditutup maka gas akan melalui pipa kapiler sehingga akan timbul beda tekanan sebesar 75 kPa dan begitu sebaiknya menunjukkan NOL pada saat katup dibuka.



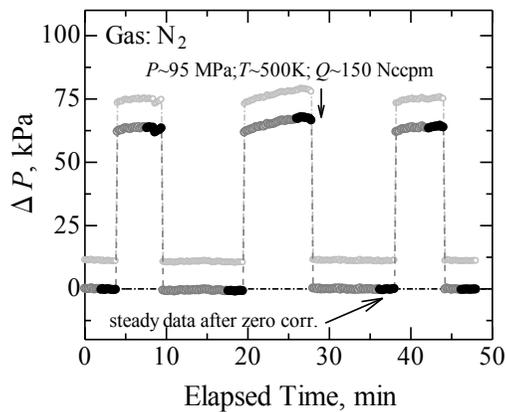
Gambar 4. Absolut pengukuran beda tekanan pada $P=95$ MPa $T=500$ K untuk nitrogen

Hal menarik pada gambar diatas bahwa nilai beda tekanan (ΔP) tidak menunjukkan konstant, melainkan kecenderungan menaik lalu konstan. Hal ini disebabkan telah terjadi efek transient karena jeda waktu aliran gas pada pipa yang sangat kecil. Analisa data diambil saat beda tekanan telah konstan.

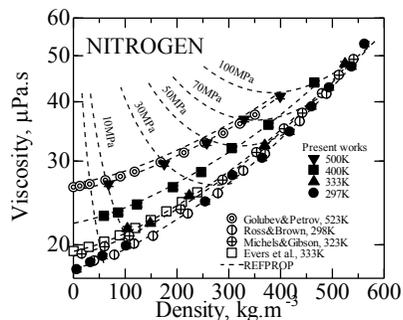


Gambar 5. Zero-offset relatif pada total beda tekanan

Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali untuk mengecek reproduktivitas data. Dari tiga kali pengukuran tersebut kita mendapatkan informasi besaran *zero-offset* juga selama 3 kali dan nilai rata-rata yang nantinya akan digunakan dalam persamaan 4. Gambar 5 menunjukkan kumpulan *zero-offset* relatif pada beda tekanan untuk setiap total absolut tekanan pada kondisi isoterm tertentu. Terlihat jelas bahwa *zero-offset* berubah untuk setiap absolut tekanan dan suhu tertentu sehingga kita harus selalu mengukur pada setiap pengukuran beda tekanan. *Zero-offset* ini bernilai sekitar 20 % dari total beda tekanan sehingga sangat penting untuk diukur seakurat mungkin.

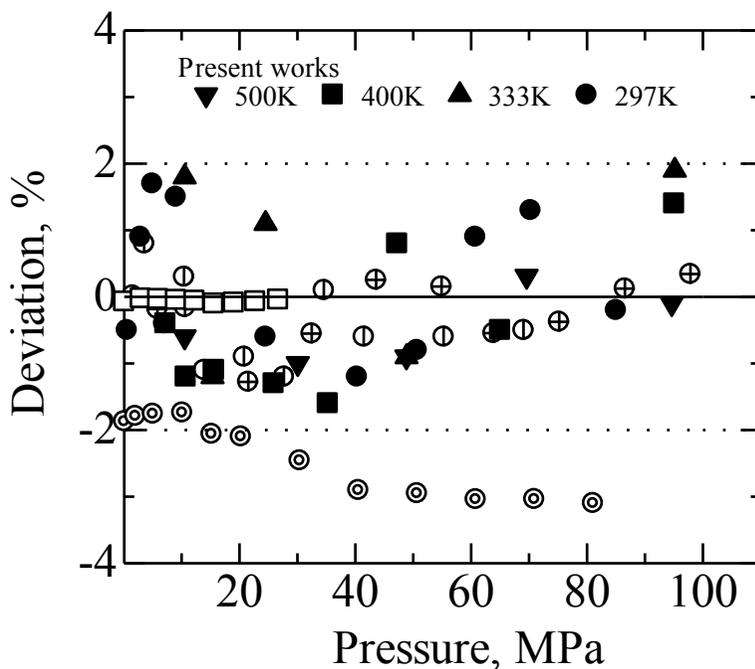


Gambar 6. Beda tekanan setelah *zero offset* koreksi



Gambar 7. Nitrogen viskositas

Gambar 6 menunjukkan hasil beda tekanan setelah dilakukan koreksi terhadap *zero-offset*. Data 2 menit pada akhir pengukuran digunakan untuk menganalisa viskositas data karena diharapkan gas sudah dalam kondisi *steady-state-flow* pada pipa kapiler tersebut. Gambar 7 menunjukkan hasil pengukuran nitrogen dari 298 sampai 500 K pada tekanan sampai 100 MPa. Hasil pengukuran memiliki deviasi sekitar 2 % dari REFPROP (Gambar8).



Gambar 8. Deviasi pengukuran viskositas nitrogen gas pada REFPROP.

Studi ketidakpastian telah dilakukan menggunakan *the law of error propagation* [9]. Ketidakpastian setiap alat ukur diambil dari data yang di berikan dari spesifikasi kalibrasi setiap alat tersebut. Berdasarkan perhitungan di dapatkan bahwa pengukuran menggunakan alat ukur rancangan ini menghasilkan ketidakpastian sebesar $\pm 2\%$. Kontribusi terbesar didapatkan dari beda tekanan, *zero-offset*, dan terakhir pengukuran flowrate.

KESIMPULAN

Sebuah alat ukur telah dirancang untuk menentukan viskositas gas pada temperatur dan tekanan tinggi. Performansi alat ukur tersebut telah di cek dengan gas nitrogen pada suhu 298, 333, 400 dan 500 K dan tekanan 100 MPa. Deviasi pengukuran dari REFPROP tidak lebih dari 2 % konsisten dengan estimasi ketidakpastian pada alat ukur tersebut. Berdasarkan hasil di atas maka dapat disimpulkan bahwa sistem alat ukur ini bisa digunakan untuk mengukur gas hidrogen dengan optimasi ketidakpastian sebesar 2 %.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] NEEF, H-J. "INTERNATIONAL OVERVIEW OF HYDROGEN AND FUEL CELL RESEARCH." ENERGY 34.3 (2009): 327-333.
- [2] POLITES, MICHAEL E. "TECHNOLOGY OF AUTOMATED RENDEZVOUS AND CAPTURE IN SPACE." JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS 36.2 (1999): 280-291.
- [3] W. LEACHMAN, R. T. JACOBSEN, S. G. PENONCELLO, M. L. HUBER, "CURRENT STATUS OF TRANSPORT PROPERTIES OF HYDROGEN", INT. J. THERMOPHYS. 28 (2007) 773
- [4] REFPROP ver.8.0 – REFERENCE FLUID THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES—DEVELOPED BY NIST (2007)
- [5] F. GOLUBEV AND V. A. PETROV, TRUDY GIAP, No. 2(1953)5 (AS GIVEN IN I. F. GOLUBEV, "VISCOSITY OF GASES AND GAS MIXTURES", A HANDBOOK ISRAEL PROGRAM SCI. TRANSL. (1970))
- [6] MICHELS AND R. O. GIBSON, "THE MEASUREMENT OF THE VISCOSITY OF GASES AT HIGH PRESSURES- THE VISCOSITY OF NITROGEN TO 1000 ATMS", PROC. ROY. SOC A 134-288 (1931)
- [7] J. F. ROSS AND G. M. BROWN, "VISCOSITY OF GASES AT HIGH PRESSURE", IND. ENG. CHEM., 49(1957) 2026
- [8] C. EVERS, H. W. LOSCH AND W. WAGNER, "AN ABSOLUTE VISCOMETER-DENSIMETER AND MEASUREMENTS OF THE VISCOSITY OF NITROGEN, METHANE, HELIUM, NEON, ARGON, AND KRYPTON OVER A WIDE RANGE OF DENSITY AND TEMPERATURE", INT. J. THERMOPHYS., 23 (6) (2002) 1411
- [9] GUIDELINES FOR EVALUATING AND EXPRESSING THE UNCERTAINTY OF NIST MEASUREMENT RESULTS, NIST TECH. NOTE 1927 (1994)