

**PENDEKATAN METODE KALIBRASI *FLOWMETER* GAS
BERTEKANAN DAN ANALISIS PERBANDINGAN
DALAM PERHITUNGAN ALIRAN**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Fisika**

**BUDI ROCHMANTO
0806469281**



UNIVERSITAS INDONESIA

**FAKULTAS MATEMATIKA
DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM MAGISTER FISIKA
DEPOK
JULI 2010**

**PENDEKATAN METODE KALIBRASI *FLOWMETER* GAS
BERTEKANAN DAN ANALISIS PERBANDINGAN
DALAM PERHITUNGAN ALIRAN**

TESIS

**BUDI ROCHMANTO
0806469281**



UNIVERSITAS INDONESIA

**FAKULTAS MATEMATIKA
DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM MAGISTER FISIKA
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Budi Rochmanto

NPM : 0806469281

Tanda Tangan :

Tanggal : 08 Juli 2010

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Budi Rochmanto
NPM : 0806469281
Program Studi : Magister Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis karya : Tesis

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : **Pendekatan Metode Kalibrasi Flowmeter Gas Bertekanan Dan Analisis Perbandingan Dalam Perhitungan Aliran** beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 08 Juli 2010
Yang menyatakan

(Budi Rochmanto)

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Subhanahu Wata'ala, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Fisika program Magister Fisika kekhususan Instrumentasi pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Santoso Sukirno, selaku dosen pembimbing pertama yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (2) Prof.Dr.Ir. Bambang Teguh P, DEA selaku dosen pembimbing kedua yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (3) Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi khususnya Balai Thermodinamika, Motor dan Propulsi yang telah banyak membantu dalam usaha mendukung dan menguji sistem kalibrasi saya kaji dan memperoleh data yang saya perlukan;
- (5) Keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (4) Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Allah Subhanahu Wata'ala berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 08 Juli 2010

Budi Rochmanto

ABSTRAK

Nama : Budi Rochmanto
Program Studi : Magister Fisika
Judul : Pendekatan Metode Kalibrasi *Flowmeter* Gas Bertekanan Dan Analisis Perbandingan Dalam Perhitungan Aliran

Suatu instrumen ukur yaitu *flowmeter* yang dipakai dalam operasi kerja fluida gas yang spesifik seperti media yang bertekanan tinggi memerlukan suatu pendekatan khusus dalam melakukan kalibrasi atau pengujian. Pembahasan yang cukup penting dalam hal ini adalah prinsip dasar dari kerja alat ukur tersebut dan pemahaman mengenai seberapa besar sifat properties suatu media kerja yang diberikan berpengaruh terhadap mekanisme *flowmeter* yang bersangkutan, karena berkaitan dengan validitas hasil ukur. Untuk ini penelitian dilakukan dengan pengambilan data, secara pendekatan dan aktual untuk suatu *flowmeter* tertentu pada kondisi yang berbeda-beda maupun secara analisa teoritis. Untuk kalibrator menggunakan perhitungan aliran dari *orifice plate* sebagai referensi pada proses kalibrasinya. Dari kajian tersebut dihasilkan suatu proses perhitungan yang lebih tepat dalam menunjang kegiatan kalibrasi *flowmeter* gas (spesifik) dalam bentuk metode atau formula sehingga diperoleh hasil kalibrasi yang lebih representatif dalam penerapannya. Hasil yang diberikan diharapkan lebih aplikatif dan akurat untuk diterapkan dalam proses penggunaan *flowmeter* gas pada berbagai kondisi pemakaian atau lebih bersifat universal. Selanjutnya dilakukan perbandingan dan analisa dengan metode teoritis serta pengukuran pada media aktual untuk mengetahui tingkat kesalahan dari metode yang dibuat dalam mendapatkan kurva hasil kalibrasi.

Kata kunci : *flowmeter*, kalibrasi, *orifice*, aliran, viskositas kinematik, densitas, bilangan *Reynolds*, *meter (k) factor*, kurva kalibrasi.

ABSTRACT

Name : Budi Rochmanto
Study Program: Magister Fisika
Title : Approach Method of Pressure Calibration Gas Flowmeter and
Comparative Analysis on the Calculation of Flowrate

An instrument measuring the flowmeter is used in the operation of gas fluid working as a media-specific high-pressure requires a special approach in performing the calibration or testing. The discussion is quite important in this regard is fundamental mechanism of this instrument and understanding how much the nature of the properties of a given working medium affects the working principles of the relevant flowmeter, which related to the validity of an outcome measure. For this research, conducted with data acquisition, the approach and the actual for a particular flowmeter in different conditions as well as theoretical analysis. For the calibrator using the calculation of the flow from the orifice plate as a reference in the calibration process. From these studies, produced a more precise calculation process in supporting the activities of gas flowmeter calibration (specific) in the form of the method or formula to obtain the calibration results are more representative in its application. Results expected more applicable given and accurate to be applied in the process of using gas flowmeter at various usage conditions or more universal. Furthermore, to compare and theoretical analysis method and also measurement of the actual media to know the error rate of the method made in obtaining the calibration curve

Key words: flowmeter, calibration, orifice, flowrate, kinematic viscosity, density, reynolds number, meter (k) factor, calibration curve.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Permasalahan	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan	3
1.5. Manfaat Umum	4
1.6. Metodologi / Rencanan Tahapan Kegiatan	5
BAB II LANDASAN TEORI	6
2.1. Dasar Pengukuran Aliran	6
2.2. Prinsip Dasar <i>Rotameter</i> dan <i>Turbine Flowmeter</i>	13
2.2.1. Prinsip Dasar <i>Rotameter</i>	14
2.2.2. Mekanisme Kerja <i>Turbine Flowmeter</i> Putaran Ideal	19
BAB III PERANGKAT KALIBRASI <i>FLOWMETER</i> GAS DAN ANALISIS MEKANISME KERJA	21
3.1. Instalasi Sistem Kalibrasi Dan Metode Uji	21
3.1.1. Instalasi Dan Perangkat Kalibrasi	22
3.1.2. Metode Operasional	26
3.2. <i>Orifice</i> Dan Perhitungan Aliran (<i>Flowrate</i>)	27
3.2.1. Gambaran Umum <i>Orifice</i>	27
3.2.2. Formula Perhitungan Aliran	28
3.3. <i>Flowmeter</i> / Debit Meter	30
3.3.1. Mekanisme Pemakaian Aktual <i>Floating Flowmeter</i> / <i>Rotameter</i>	30
3.3.2. Mekanisme Pemakaian Aktual <i>Turbine Flowmeter</i>	34

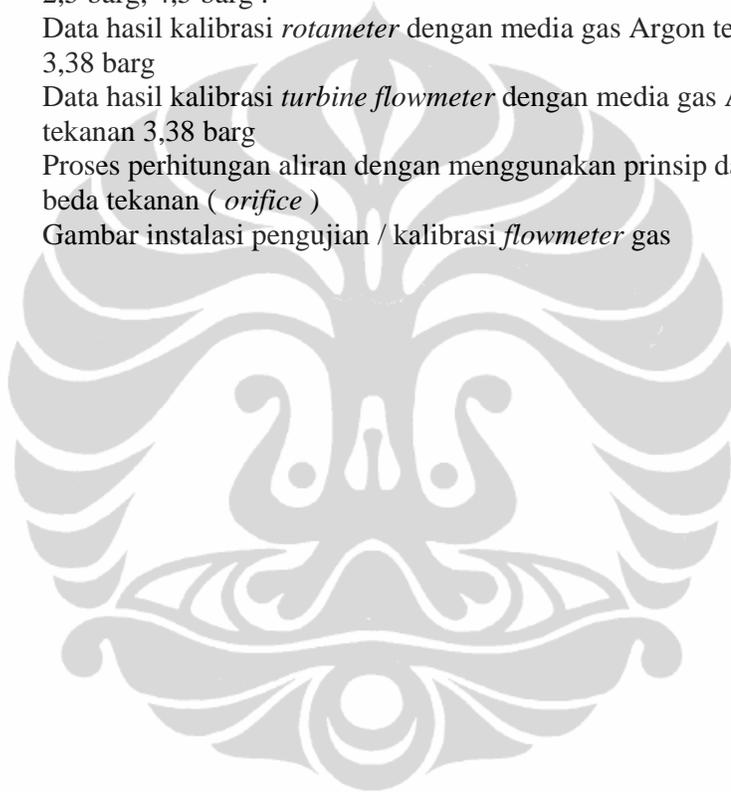
BAB IV PERUMUSAN METODE PENDEKATAN PERHITUNGAN KALIBRTASI, IMPLEMENTASI & ANALISIS HASIL	38
4.1. Analisa Pada Kondisi Pengukuran	38
4.1.1. Pengukuran Pada Kalibrasi <i>Rotameter</i>	38
4.1.2. Pengukuran Pada Kalibrasi <i>Turbine Flowmeter</i>	40
4.2. Pendekatan Proses Perhitungan Kalibrasi Untuk Media Yang Berbeda	43
4.3. Metode <i>Universal Calibration Curve</i> Untuk Hasil Kalibrasi	46
4.3.1. <i>Universal Viscosity Curve</i> Pada <i>Turbine Flowmeter</i>	46
4.3.2. <i>Universal Calibration Curve</i> Pada <i>Rotameter</i>	48
4.4. Implemantasi Pada <i>Floating Flowmeter (Rotameter)</i>	50
4.4.1. Perhitungan Pemakian Tekanan Kerja	50
4.4.2. Hasil Pengolahan Data Kalibrasi	53
4.4.3. Pembuatan <i>Universal Calibration Curve</i>	54
4.5. Implementasi Pada <i>Turbine Flowmeter</i>	58
4.5.1. Perhitungan Pemakian Tekanan Kerja	58
4.5.2. Hasil Pengolahan Data Kalibrasi	59
4.5.3. Pembuatan <i>Universal Viscosity Curve</i>	60
4.6. Perbandingan Metode Pengukuran Pada Perhitungan Aliran	62
4.6.1. Analisa Dan Perbandingan Pada <i>Rotameter</i>	63
4.6.2. Analisa Dan perbandingan Pada <i>Turbine Flowmeter</i>	68
BAB V PENUTUP	75
5.1. Kesimpulan	75
5.2. Saran	78
DAFTAR REFERENSI	xiii
LAMPIRAN	xv

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema umum kalibrasi <i>gas flowmeter</i>	6
Gambar 2.2	Skema gaya yg bekerja pd <i>rotameter</i> kondisi mengambang	14
Gambar 2.3	<i>Steady flow</i> masuk keluar <i>rotor</i> kondisi gesekan <i>rotor</i> ideal dengan pisau <i>helical rotor</i> yg sangat tipis pada sudut pisau β	19
Gambar 3.1	Instalasi kalibrasi untuk <i>flowmeter</i> gas tekanan tinggi	21
Gambar 3.2	Sumber gas tekanan tinggi	22
Gambar 3.3	Katup pengatur tekanan kerja	22
Gambar 3.4	Skema aliran dengan <i>orifice</i> dan pengukurannya	23
Gambar 3.5	<i>Incline manometer</i> pengukur tekanan	24
Gambar 3.6	<i>Thermocouple</i> dan indicator sebagai pengukur suhu	24
Gambar 3.7	<i>Turbine flowmeter</i> dan skema pemasangannya	25
Gambar 3.8	Skema <i>rotameter (floating flowmeter)</i>	25
Gambar 3.9	<i>Digital pressure indicator</i>	26
Gambar 3.10	<i>Orifice</i> dan prinsip dasar pengukuran tekanan	28
Gambar 3.11	Gambaran beberapa bagian pada <i>floating flowmeter</i>	31
Gambar 3.12	Beberapa bentuk fisik dan jenis <i>Rotameter</i>	32
Gambar 3.13	Pembacaan <i>float</i> pada skala ukur sebagai aliran aktual	32
Gambar 3.14	Ilustrasi skematis sinyal listrik yg dihasilkan gerakan <i>rotor</i>	35
Gambar 3.15	Berbagai bentuk desain <i>turbine flowmeter</i>	35
Gambar 4.1	Perbandingan penunjukan <i>rotameter</i> dengan <i>flowrate</i>	40
Gambar.4.2	Perbandingan penunjukan <i>turbine flowmeter</i> dengan <i>flowrate</i>	42
Gambar 4.3	Alur perhitungan aliran <i>turbine flowmeter</i> menggunakan <i>Univ.Visco.Curve</i>	48
Gambar 4.4	Rangkaian kurva kalibrasi pada <i>rotameter</i>	49
Gambar 4.5	Rangkaian kurva kalibrasi <i>rotameter</i> untuk beberapa kondisi	54
Gambar 4.6	Kurva kalibrasi pada <i>rotameter (universal calibration curve)</i>	57
Gambar 4.7	Kurva kalibrasi <i>turbine flowmeter (universal viscosity curve)</i>	60
Gambar.4.8	Kurva perbandingan beberapa kondisi kalibrasi pada <i>turbine flowmeter</i>	61
Gambar 4.9	Kurva perbandingan aliran <i>rotameter</i> metode pengukuran dan teoritis (beda kondisi kerja dengan media yang sama)	64
Gambar 4.10	Kurva perbandingan aliran <i>rotameter</i> metode pengukuran, teoritis (beda media dan kondisi kerja) & kondisi sebenarnya	68
Gambar 4.11	Kurva perbandingan <i>flowrate turbine</i> metode pengukuran & teoritis (beda kondisi kerja dengan media yang sama)	70
Gambar 4.12	Kurva perbandingan aliran <i>turbine flow</i> metode pengukuran, teoritis (beda media dan kondisi kerja) & kondisi sebenarnya	74

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Data hasil kalibrasi *rotameter* pada tekanan atmosfer
- Lampiran 2 Data hasil kalibrasi *rotameter* pada tekanan 2,5 barg
- Lampiran 3 Data hasil kalibrasi *rotameter* pada tekanan 4,5 barg
- Lampiran 4 Data hasil kalibrasi *rotameter* dengan variasi tekanan dan seting aliran
- Lampiran 5 Data hasil kalibrasi *turbine flowmeter* pada tekanan : atmosfer, 2,5 barg, 4,5 barg .
- Lampiran 6 Data hasil kalibrasi *rotameter* dengan media gas Argon tekanan 3,38 barg
- Lampiran 7 Data hasil kalibrasi *turbine flowmeter* dengan media gas Argon tekanan 3,38 barg
- Lampiran 8 Proses perhitungan aliran dengan menggunakan prinsip dasar beda tekanan (*orifice*)
- Lampiran 9 Gambar instalasi pengujian / kalibrasi *flowmeter* gas



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Perbandingan 2 kondisi pengukuran <i>rotameter</i>	39
Tabel 4.2	Perbandingan 2 kondisi pengukuran <i>turbine flowmeter</i>	41
Tabel 4.3	Perhitungan pemakaian tekanan kerja pada <i>rotameter</i>	51
Tabel 4.4	Hasil pengolahan data kalibrasi <i>rotameter</i> tekanan rendah	53
Tabel 4.5	Hasil pengolahan data kalibrasi <i>rotameter</i> tekanan sedang	53
Tabel 4.6	Hasil pengolahan data kalibrasi <i>rotameter</i> tekanan tinggi	53
Tabel 4.7	Hasil pengolahan data kalibrasi <i>rotameter</i> dengan variasi titik dan tekanan	55
Tabel 4.8	Hasil perhitungan <i>universal calibration curve</i> pada kalibrasi <i>rotameter</i>	56
Tabel 4.9	Hasil pengolahan data kalibrasi <i>turbine flowmeter</i> kondisi tekanan rendah	59
Tabel 4.10	Hasil pengolahan data kalibrasi <i>turbine flowmeter</i> kondisi tekanan sedang	59
Tabel 4.11	Hasil pengolahan data kalibrasi <i>turbine flowmeter</i> kondisi tekanan tinggi	60
Tabel 4.12	Hasil perbandingan aliran, Q_h pengukuran dengan aliran hasil perbandingan, Q_h' (teoritis) untuk <i>rotameter</i>	64
Tabel 4.13	Hasil perhitungan pemakaian tekanan kerja pada <i>rotameter</i>	65
Tabel 4.14	Hasil perbandingan aliran, $Q_{b(akt)}$ pengukuran dan aliran hasil perbandingan, $Q_{b(akt)'}'$ teoritis untuk <i>rotameter</i>	66
Tabel 4.15	Hasil pengolahan data kalibrasi <i>rotameter</i> dengan media gas <i>argon</i> (tekanan 3,38 bar g)	67
Tabel 4.16	Perbandingan hasil kalibrasi <i>rotameter</i> dengan media <i>argon</i> dengan kondisi pendekatan media udara	67
Tabel 4.17	Hasil perbandingan aliran, Q_h pengukuran dengan aliran hasil perbandingan, Q_h' (teoritis) untuk <i>turbine flowmeter</i>	69
Tabel 4.18	Hasil perhitungan pemakaian tekanan kerja pada <i>turbine flowmeter</i>	71
Tabel 4.19	Hasil perbandingan aliran, $Q_{b(akt)}$ pengukuran dan aliran hasil perbandingan, $Q_{b(akt)'}'$ teoritis untuk <i>turbine flowmeter</i>	71
Tabel 4.20	Hasil pengolahan data kalibrasi <i>turbine flow</i> dengan media gas <i>argon</i> (tekanan 3,38 bar g)	73
Tabel 4.21	Perbandingan hasil kalibrasi <i>turbine flowmeter</i> media <i>argon</i> dengan kondisi pendekatan media udara	73
Tabel 5.1	Perbandingan aliran <i>rotameter</i> pada 3 metode pengujian	76
Tabel 5.2	Perbandingan aliran <i>turbine flowmeter</i> 3 metode pengujian	76

BAB I PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG PERMASALAHAN

Dalam perkembangan kemajuan alat ukur khususnya *flowmeter* yang bekerja untuk servis atau media kerja gas, semakin menuntut fabrikasi instrumen atau alat ukur untuk memperluas spesifikasi produknya selain masalah kualitas alat ukur itu sendiri yang meliputi akurasi, presisi, sensitifitas, resolusi, linieritas dan lain sebagainya. Hal ini dikarenakan karena tuntutan pemakai di industri yang semakin luas dan meningkat, serta pemahaman pengguna yang semakin mementingkan kualitas dari instrumen ukur tersebut.

Sering dengan kondisi tersebut peran lembaga standarisasi, laboratorium uji dan kalibrasi sangat memegang peranan yang cukup krusial. Mengingat dari instansi dan laboratorium tersebut hasil dari suatu petunjuk atau pedoman penyetaran dan sertifikat kalibrasi atau laporan pengujian dijadikan sebagai acuan dalam pemakaian suatu alat ukur yang bersangkutan oleh *user* atau teknisi. Karena itulah diperlukan suatu petunjuk atau metode yang lebih tepat untuk mendapatkan hasil pengukuran yang lebih valid. Dalam hal ini dapat diwujudkan dalam bentuk *guide* untuk pengujian dan kalibrasi, metode atau prosedur kerja maupun formula atau perhitungan yang berkaitan pemakaian *flowmeter* gas yang mampu menunjang metode dan perhitungan yang sudah ada.

Sering terjadi kesulitan dalam kasus kalibrasi *flowmeter* untuk servis gas yang spesifik misalnya gas-gas yang bekerja pada tekanan tinggi, temperatur tinggi, *flameable* atau mempunyai sifat-sifat yang jauh berbeda dengan gas pada umumnya. Sementara kondisi ini cukup berbeda dengan fasilitas kalibrasi pada umumnya yang menggunakan sumber udara sebagai media kerjanya dan bekerja pada tekanan yang tidak beda jauh dengan kondisi atmosfer. Pada umumnya sumber yang digunakan dapat berasal dari *blower*, *compressed air* atau tabung gas yang biasanya menggunakan fluida oksigen atau nitrogen. Hal cukup beresiko tinggi bila kita membangun instalasi kalibrasi dengan media yang mudah terbakar dan berbahaya. Atau sangat tidak efektif dan tidak efisien bila kita selalu mengganti fluida kerja sebagai media setiap ada pengukuran atau kalibrasi

flowmeter yang menggunakan media gas yang berbeda-beda. Akhirnya sering terjadi proses kalibrasi yang kurang sesuai dengan kondisi dan kebutuhan sebenarnya untuk *flowmeter* tersebut karena keterbatasan instalasi kalibrasi atau pengujian dan metode yang ada, sehingga dirasa kurang representatif dan kurang aplikatif hasil pengukurannya.

Dalam penggunaan fluida *compressible* harus lebih diperhatikan karena sifatnya yang cukup mudah terjadi turbulensi dan mudah terjadi perubahan sifat properties karena pengaruh perubahan tekanan dan suhu. Sehingga proses kalibrasi dan penggunaan *flowmeter* dengan media tersebut cukup menyulitkan dan mendapat perhatian tersendiri. Apalagi setiap *flowmeter* gas mempunyai karakteristik yang berbeda-beda tergantung jenis sensor dan mekanisme kerjanya. Karena itu adanya perhitungan dalam mendukung proses kalibrasi atau pemakaiannya serta kemudahan dalam menggunakan hasil kalibrasi yang lebih akurat dan representatif sangat dibutuhkan oleh laboran atau *user* dalam aplikasinya dilapangan.

1.2. RUMUSAN MASALAH

- ❖ Bagaimana pengaruh hasil pengukuran aliran dengan adanya perubahan sifat properties fluida kerja yang diterapkan pada *gas flowmeter* jenis *floating flowmeter (rotameter)* dan *turbine flowmeter* tersebut secara analisis maupun eksperimental.
- ❖ Bagaimana pendekatan yang diperlukan untuk melakukan kalibrasi instrumen ukur *flowmeter* gas yang diterapkan pada media kerja yang mempunyai sifat cukup berbeda dengan media yang diberlakukan pada sistim instalasi kalibrasi yang digunakan.
- ❖ Bagaimana menentukan suatu hasil kalibrasi yang lebih tepat dan mudah diterapkan atau diaplikasikan untuk berbagai kondisi pemakaian media kerja pada *flowmeter* gas dalam penggunaannya.
- ❖ Bagaimana perbandingan metode perhitungan yang diterapkan terhadap metode yang ada sehingga dapat diketahui tingkat kesalahannya.
- ❖ Bagaimana karakteristik *flowmeter* gas jenis *rotameter* dan *turbine flowmeter* dari hasil kalibrasinya dengan menerapkan metode yang dilakukan.

1.3. BATASAN MASALAH

- ❖ Kajian atau analisa sifat properties media kerja diberikan yang berhubungan langsung dengan mekanisme kerja (gerakan atau deformasi) dari jenis sensor atau type *flowmeter* gas yang dikaji.
- ❖ Meter ukur yang digunakan sebagai bahasan atau benda uji yang dikaji sebagai unit yang dikalibrasi dibatasi pada *gas flowmeter* jenis *turbine* dan *rotameter (floating)* dengan penggunaannya hanya pada media gas.
- ❖ Media kerja atau fluida yang digunakan dalam instalasi kalibrasi *gas flowmeter* disini adalah udara (*air*) dan menggunakan kalibrator *orifice plate* untuk kalibrasinya, dengan spesifikasi yang sudah standar dengan asumsi semua instrumen pendukungnya sudah terkalibrasi dengan baik.
- ❖ Media kerja *flowmeter* sebenarnya yang digunakan adalah *argon (Ar)* pada tekanan tinggi, asumsi satu fase, serta kondisi yang lainnya disesuaikan dengan kondisi kerjanya.
- ❖ Pada proses kalibrasi tidak membahas perhitungan ketidakpastian pengukuran.

1.4. TUJUAN

- ❖ Mendapatkan proses perhitungan yang lebih tepat dalam menunjang kegiatan kalibrasi *flowmeter* gas (spesifik) yang sudah ada dalam bentuk metode atau formula sehingga diperoleh hasil kalibrasi yang lebih akurat dan representatif dalam penerapannya.
- ❖ Mengetahui tingkat kesalahan dari metode perhitungan yang dibuat dari analisa perbandingan dengan proses perhitungan yang lain.
- ❖ Mengetahui karakteristik dan sifat *flowmeter* gas jenis *floating (rotameter)* dan *turbine flow* dari hasil pengukuran atau kalibrasinya.
- ❖ Mengetahui dan memahami suatu hasil kalibrasi *flowmeter* gas yang dikaji yang mampu diterapkan dalam berbagai kondisi pemakaian atau bersifat universal.

1.5. MANFAAT UMUM

Dengan adanya kajian seperti ini diharapkan bagi seorang *user* atau laboran yang berkaiatan dengan pengukuran *flowmeter* gas akan lebih mampu memahami prinsip dan mekanisme kerja dari gas *flowmeter* jenis *turbine* dan *rotameter* serta faktor-faktor yang berpengaruh terhadap hasil ukurnya, dalam hal ini terutama yang berkaitan dengan sifat properties media kerja yang diterapkan. Selain itu pemahan yang cukup penting adalah prosedur pemakaian dan proses kalibrasi untuk jenis gas *flowmeter* tersebut, khususnya pada penggunaan fluida kerja yang spesifik untuk mendapatkan hasil yang lebih valid.

Diharapkan pula adanya suatu perkembangan tentang instalasi kalibrasi *flowmeter* gas, baik secara perlatan ukur (*hardware*), prosedur atau metode kerja maupun formula atau proses perhitungan (*software*) yang berkaitan dengan perhitungan aliran ataupun perhitungan ketidakpastian, mengingat untuk fasilitas kalibrasi *flowmeter* gas yang mendekati standar primer cukup jarang kita jumpai. Oleh karena itu penambahan fasilitas kalibrasi yang baru maupun perkembangan fasilitas yang ada cukup diharapkan untuk mendukung sistim kalibrasi yang telah tersedia.

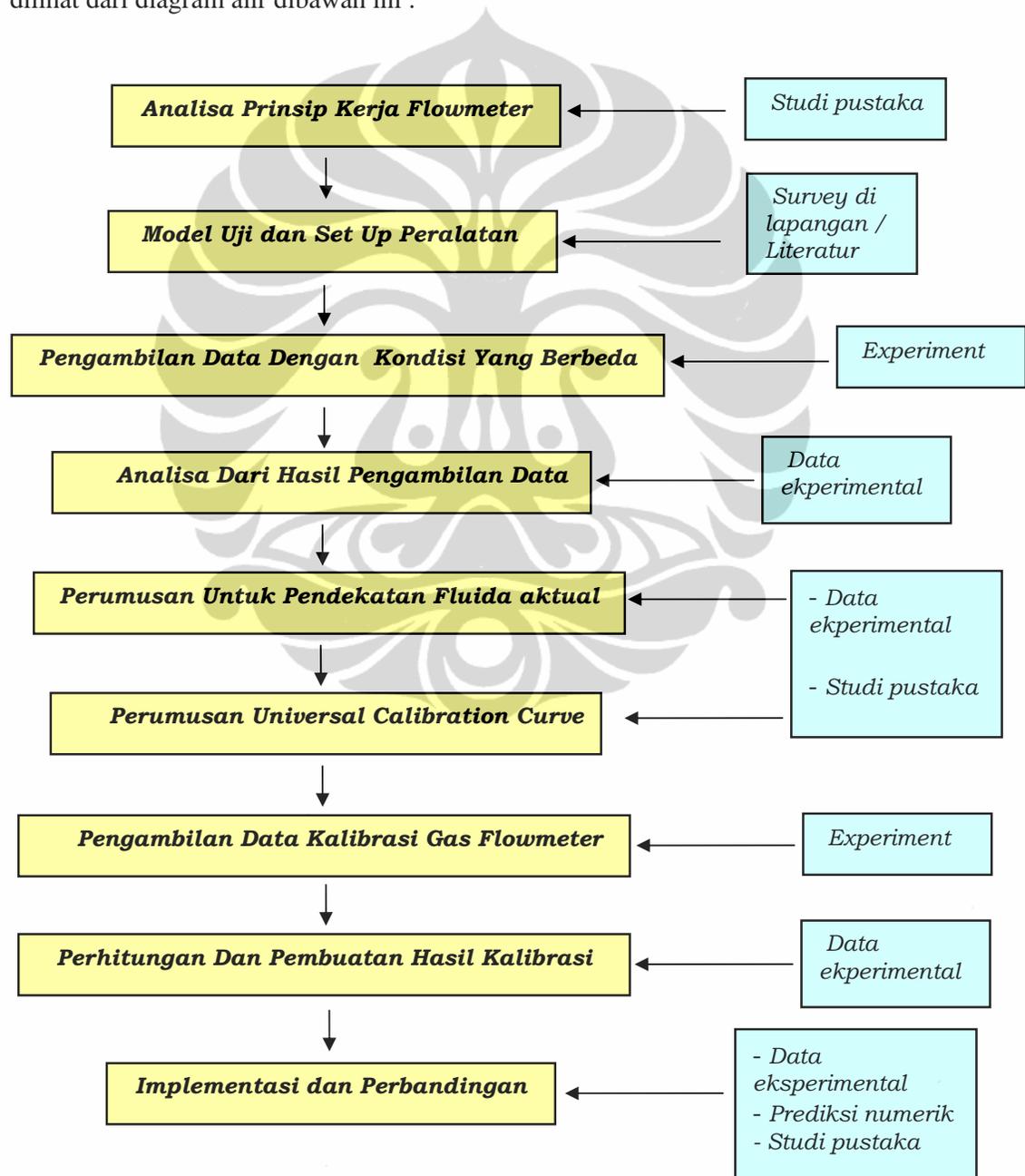
Seiring dengan semakin pesatnya kemajuan alat ukur atau instrumen ukur karena tingkat kebutuhan pengukuran yang semakin luas diharapkan adanya perkembangan kualitas alat ukur yang cukup memadai. Dalam hal ini sangat berhubungan dengan akurasi, kepresisian, sensitifitas, resolusi, rentang ukur dan lain sebagainya, maupun rekomendasi dan spesifikasi penggunaan suatu alat ukur untuk kebutuhan yang lebih khusus. Oleh karena itu selain fabrikasi peran laboratorium kalibrasi cukup penting sebagai badan pengkalibrasi atau penguji yang mengeluarkan hasil pengujian yang mana sebagai tolak ukur kualitas suatu instrumen ukur tersebut.

Diharapkan juga adanya suatu standar SNI atau semacam petunjuk yang berkaitan dengan cara atau sistim pengukuran dan kalibrasi *flowmeter* gas dengan media yang spesifik, seperti fluida gas bertekanan. Hal ini akan cukup memudahkan para laboran dalam melakukan kegiatan kalibrasi alat ukur yang bersangkutan atau sebagai pengguna dalam penerapannya dilapangan. Hasil ini secara keseluruhan nantinya diharapkan akan bermanfaat untuk proses

pelaksanaan dan pengembangan fasilitas uji dan kalibrasi *gas flowmeter* yang ada di laboratorium kalibrasi.

1.6. METODOLOGI / RENCANA TAHAPAN KEGIATAN

Dalam kajian ini ada beberapa langkah yang dilakukan. Hal ini dapat dilihat dari diagram alir dibawah ini :



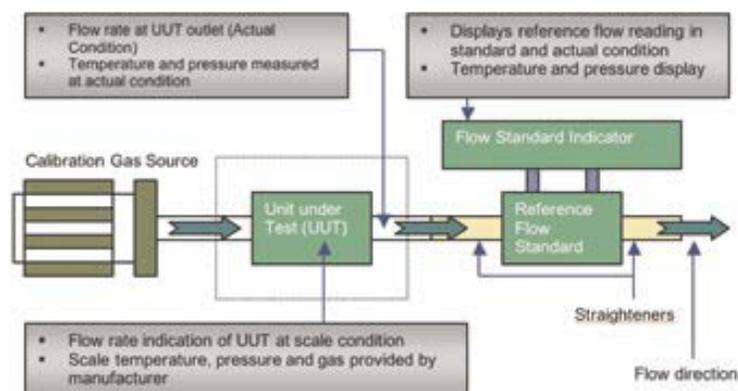
BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. DASAR PENGUKURAN ALIRAN

Semakin berkembangnya kebutuhan pengukuran khususnya dibidang aliran fluida gas mendorong semakin meningkatnya kebutuhan jenis instrumen ukur serta kebutuhan laboratorium uji dan kalibrasi yang lebih optimal. Selain itu dasar-dasar ilmu yang berhubungan dengan metrologi dan instrumentasi cukup diharapkan dalam membantu pelaksanaan dan perkembangan dalam kaitannya dengan pengukuran tersebut. Adapun pengujian dan kalibrasi adalah manifestasi dari seperangkat pengukuran pada suatu instrumen ukur (KAN [1]).

- Pengukuran (*measurement*) merupakan seperangkat kegiatan untuk menentukan kuantitas obyek. Dalam hal ini mengukur adalah suatu proses empirik dan obyektif pada sifat-sifat obyek atau kejadian nyata sedemikian sehingga angka tadi dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai obyek atau kejadian tersebut.
- Kalibrasi (*calibration*) adalah kegiatan untuk menentukan kebenaran konvensional nilai penunjukan alat ukur dengan cara membandingkan terhadap standar ukurnya (yang telah diketahui nilainya) yang mampu tertelusur (*traceable*) ke standar nasional untuk satuan ukuran dan / atau internasional.



Gambar 2.1. Skema umum kalibrasi *gas flowmeter*.

Pada pelaksanaan yang umum kalibrasi *flowmeter* khususnya gas dilakukan dengan kondisi ambien (dekat dengan kondisi atmosfer) atau pada kondisi yang disaratkan oleh laboratorium yang bersangkutan. Dengan ini didapatkan nilai penunjukan meter ukur yang dikalibrasi dan nilai dari meter ukur standar sebagai referensi, serta nilai koreksi atau kesalahannya. Jadi nilai hasil kalibrasi disertifikat, cukup akurat digunakan hanya pada kondisi yang sesuai dengan kondisi hasil sertifikat tersebut. Demikian juga untuk media yang dipakai harus sesuai dengan kondisi media yang digunakan pada saat kalibrasi.

Aliran fluida yang umumnya diukur dengan *flowmeter* sebagai *flowrate*, dibagi menjadi dua besaran yaitu *mass flowrate* (laju aliran massa) dan *volume flowrate* (laju aliran volume). *Volume flowrate* sangat bergantung pada kondisi fisik dari fluida yang bersangkutan yaitu densitas. Hubungan keduanya adalah :

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana :

$Q_v = \text{volume flowrate} \dots\dots\dots\text{ex: [l/sec]}$

$Q_m = \text{mass flowrate} \dots\dots\dots\text{ex: [kg/sec]}$

$\rho = \text{rapat massa} \dots\dots\dots\text{ex: [kg/l]}$

Rapat masa (densitas) bisa dilakukan dengan pengukuran langsung maupun dengan perhitungan (pengukuran tidak langsung) melalui formula yang ada, yaitu dengan melakukan pengukuran terhadap parameter yang dibutuhkan seperti tekanan dan suhu. Pendekatan paling mudah bisa dilihat dari tabel sifat-sifat properties zat.

Salah satu metode pengukuran aliran yang sering digunakan sebagai alat ukur maupun sebagai standar ukur adalah metode *differential pressure* atau metode pembatasan. Ini banyak diterapkan pada prinsip *orifice*, *ventury*, *nozzle*, *laminer flow element* dan lain sebagainya. Metode ini mengukur perbedaan tekanan dua penampang aliran yang sebanding dengan laju aliran. Perhitungan laju aliran teoritis dapat dilakukan berdasarkan hukum kontinuitas dan persamaan *Bernoulli*. Kapasitas aliran sebenarnya dapat ditentukan dengan memperhitungkan faktor koreksi dari masing-masing alat ukur yang ditentukan secara empiris. Alat

ukur metode tak langsung dengan pembatasan ini dianalisa pada penampang pertama yaitu sebelum masuk alat ukur, dan penampang kedua yaitu tepat di daerah alat ukur yang biasanya menimbulkan *vena contracta*. *Vena contracta* adalah daerah setelah pengecilan penampang aliran. Pada daerah ini kapasitas aliran minimum dan tekanan aliran pada penampang tersebut seragam. Secara umum pada kondisi garis arus (*stream line*).

Untuk aliran fluida pada *orifice plate* dengan asumsi *steady state* serta fluida *incompressible*, aliran laminar didalam suatu pipa yang horisontal tanpa ada perubahan elevasi serta dengan mengabaikan *frictional losses* persamaan *bernoulli* sebagai gambaran persamaan energi pada dua titik dalam garis aliran yang sama (Wikipedia [3]):

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \quad \text{atau} \quad P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2$$

Dengan persamaan kontinuitas :

$$Q = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad \text{atau} \quad v_1 = \frac{Q}{A_1} \quad \text{dan} \quad v_2 = \frac{Q}{A_2}$$

$$\text{Maka : } P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{Q}{A_2} \right)^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{Q}{A_1} \right)^2$$

$$\text{Penyelesaian untuk } Q \text{ adalah : } Q = A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2) / \rho}{1 - (A_2 / A_1)^2}}$$

$$\text{selanjutnya } Q = A_2 \sqrt{\frac{1}{1 - (d_2 / d_1)^4}} \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho}$$

Persamaan diatas adalah gambaran aliran volume secara teoritis. Secara aktual diberikan suatu nilai koefisien untuk aliran yaitu *coefficient of discharge*, C_d dan perbandingan diameter *orifice* dan pipa sebagai $\beta = d_2 / d_1$, sehingga didapatkan :

$$Q = C_d \cdot A_2 \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^4}} \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

Akhirnya dengan menjadikan nilai C sebagai *meter coefficient*, $C = \frac{Cd}{\sqrt{1-\beta^4}}$

maka diperoleh persamaan terakhir untuk *volumetric flowrate* (laju aliran volume) yang melewati *orifice* :

$$(1) \quad Q = Cd.A_2\sqrt{2(P_1 - P_2)/\rho} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan mengalikan densitas dari fluida diperoleh persamaan *mass flowrate* (laju aliran massa) :

$$(2) \quad \dot{m} = \rho.Q = Cd.A_2\sqrt{2.\rho(P_1 - P_2)} \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana:

- Q = volumetric flow rate (at any cross-section),..... m^3/s
- \dot{m} = mass flow rate (at any cross-section),..... kg/s
- Cd = coefficient of discharge, ...dimensionless
- C = orifice flow coefficient,dimensionless
- A_1 = cross-sectional area of the pipe,..... m^2
- A_2 = cross-sectional area of the orifice hole,..... m^2
- d_1 = diameter of the pipe,..... m
- d_2 = diameter of the orifice hole,..... m
- β = ratio of orifice hole diameter to pipe diameter,..... dimensionless
- v_1 = upstream fluid velocity,..... m/s
- v_2 = fluid velocity through the orifice hole,..... m/s
- P_1 = fluid upstream pressure,Pa dengan dimensions pada ... $kg/(m \cdot s^2)$
- P_2 = fluid downstream pressure,..... Pa dengan dimensions pada... $kg/(m \cdot s^2)$
- ρ = fluid density, kg/m^3

Secara umum persamaan tersebut aplikasi dari aliran untuk *incompressible* fluida. Tetapi untuk media yang bersifat *compressible*, formula tersebut dimodifikasi dengan menambahkan suatu nilai *expansion factor* ϵ , dan untuk fluida yang *incompressible* nilai *expansion factor*-nya adalah 1. Sehingga didapat:

$$(3) \quad \dot{m} = Cd.\epsilon.A_2\sqrt{2.\rho(P_1 - P_2)} \dots\dots\dots(2.5)$$

Secara umum *expansibility factor* ε , mengikuti perubahan densitas dari gas ideal untuk pemakaian kondisi yang aktual dan berhubungan dengan *specific heat ratio*, k dan β ratio.

Dalam hubungannya dengan metrologi, selama ini perkembangan perhitungan yang berhubungan dengan pemakaian media fluida yang berbeda sifat propertiesnya pada suatu *flowmeter* telah dirumuskan dengan suatu perbandingan parameter tertentu yaitu rapat masa atau dengan *specific gravity*. Hal ini biasa disebut dengan *conversion factor* untuk perhitungan *flowrate*. Bisa dilihat persamaan dasar kontinuitas :

$$A_1 \cdot v_1 \cdot \rho_1 = A_2 \cdot v_2 \cdot \rho_2 \quad \text{atau} \quad Q_1 \cdot \rho_1 = Q_2 \cdot \rho_2$$

Sehingga bila dilihat perbandingannya didapat : $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ (2.6)

Perbandingan dari rapat masa ini yang selama ini digunakan sebagai dasar konversi untuk menentukan kondisi perbedaan sifat fluida kerja sebagai media pada suatu *flowmeter*, walaupun untuk kondisi aktualnya pemakaiannya disesuaikan dengan mekanisme dasar dari meter ukur yang bersangkutan. Dari persamaan dasar (2.6) diatas selanjutnya kajian ini akan menentukan parameter-parameter apa saja yang bisa didekati dalam menghasilkan sifat fluida yang sama antara media kerja kondisi pemakaian dengan media kerja saat kalibrasi.

Kalau dilihat sifat penting dari suatu zat-cair, perubahan tekanan tak berpengaruh terhadap volume sehingga dalam praktek zat cair dianggap bersifat *incompressible*. Sedangkan gas akan mengkerut bila mengalami tekanan dan memuai tak-terhingga besarnya bila tekanan hilang. Jadi, sifatnya betul-betul *compressible*. Selanjutnya dari teori kinetik gas didapat hukum gas ideal :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{.....(2.7)}$$

Persamaan ini dikenal dengan persamaan gas ideal, dimana :

P : tekanan gas (N/m²)

V : volume gas (m³)

n : jumlah mol (mol)

R : konstanta gas universal (R : 8,314 J/mol.K)

T : suhu mutlak gas (K)

Dari persamaan (2.7) dapat diturunkan persamaan untuk perhitungan rapat massa atau densitas dari fluida gas. Densitas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan karakteristik gas :

$$\rho = \frac{P.M}{Z.R.T} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana R konstanta gas universal, M adalah masa molekul dan Z *compressibility factor*. Untuk udara dalam kondisi yang dijaga atau dalam ruangan yang terkondisikan variasi pada kondisi ambient Z dapat dianggap rata.

Viskositas adalah sifat fluida yang mendasari diberikannya tahanan terhadap tegangan geser oleh fluida tersebut. Hukum viskositas *newton* (Wikipedia [3]):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \dots\dots\dots (2.9)$$

Persamaan (2.9) menyatakan untuk laju perubahan bentuk sudut fluida yang tertentu maka tegangan geser berbanding lurus dengan viskositas. Cairan yang bersifat kental umumnya mempunyai viskositas yang tinggi sedangkan cairan yang encer dan gas mempunyai viskositas yang rendah. Viskositas ini sering disebut viskositas absolut atau viskositas dinamik. Untuk viskositas absolut (*absolute viscosity*) dapat dihitung dengan persamaan *Sutherland*, (Cussons [4]) yaitu :

$$\mu = \mu_{ref} \times \left(\frac{T_{ref} + C_s}{T + C_s} \right) \times \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{1,5} \dots\dots\dots(2.10)$$

C_s adalah *Sutherland constant* untuk untuk gas tertentu. Pada suhu referensi 293 K , nilai viskositas referensi untuk gas misalnya $\mu_{ref}=181,2 \mu P$ (*micropoise*) = 0,0001812 *Poise* = 0,00001812 *Pascal-second*. Sebagai tambahan dimensi untuk viskositas adalah $ML^{-1}T^{-1}$ dan $1P = 1 \text{ g/cm.s} = 0,1 \text{ kg/m.s} = 0,1 \text{ Pa.s}$ (*Pascal-second*)

Sedangkan viscositas kinematik merupakan perbandingan viskositas terhadap kerapatan massa :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dari formula densitas dan viskositas variabel tekanan P dan temperatur T cukup mudah dirubah sesuai kondisi media yang diterapkannya. Karena itu dengan memanfaatkan perubahan tekanan dan suhu diharapkan mampu melakukan pendekatan untuk menghasilkan kondisi tertentu pada suatu fluida. Kondisi ini yang nantinya akan diterapkan pada media kerja saat melakukan kalibrasi *gas flowmeter*. Selanjutnya tidak perlu melakukan koreksi terhadap hasil penunjukannya. Prinsip ini diharapkan lebih mendekati kondisi aktual yang terbaca pada *flowmeter* dan lebih memberikan tingkat akurasi yang lebih baik karena dilakukan pengukuran semua parameter secara langsung.

Seiring dengan adanya pemakaian *flowmeter* yang cukup variatif atau rentang yang lebar khususnya untuk jenis media yang *compressible*, dengan ini akan diuraikan mengenai hasil pengujian atau kalibrasi yang mudah diterapkan dan aplikatif pada berbagai kondisi pengukuran, mengingat hasil kalibrasi yang bersifat *universal* yang belum umum diberikan dan digunakan. Dengan diterapkannya *universal calibration result* diharapkan lebih memberikan hasil yang sesuai dan memudahkan pemakai dalam mengaplikasikan hasil kalibrasi dalam berbagai penggunaannya.

Pada suatu metode pengukuran aliran suatu *meter coefficient*, konstanta ataupun *calibration factor* merupakan suatu parameter yang tidak bisa dipisahkan dari prinsip dasar atau metode pengukuran dari suatu meter ukur yang bersangkutan. Besaran ini bisa diturunkan dari prinsip dasar perhitungan atau pengukurannya dan mempunyai pengaruh yang cukup penting dalam menentukan hasil akhir. Kedua besaran tersebut bisa ditetapkan dari proses perhitungan atau didapatkan dari proses kalibrasi dan mempunyai nilai yang spesifik sesuai dengan *flowmeter* yang bersangkutan. Selanjutnya dari parameter tersebut biasanya bisa dihitung besaran aliran (*flowrate*) yang dibutuhkan. Karena sifatnya yang unik atau spesifik maka dari parameter tersebut bisa dilihat sifat atau karakteristik *flowmeter* yang bersangkutan.

Bila kita berbicara dalam konteks aliran maka besaran yang cukup penting dan tidak bisa ditinggalkan adalah bilangan *reynolds* (*reynolds number*). Dalam mekanika fluida, bilangan *reynolds number* adalah rasio antara gaya inersia ($v\rho$) terhadap gaya viskos (μ/d) yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya

tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasi jenis aliran yang berbeda, misalnya laminar dan turbulen. Namanya diambil dari *Osborne Reynolds* [1842–1912] yang mengusulkannya pada tahun 1883. *Reynolds number* merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang paling penting dalam mekanika fluida dan digunakan, seperti halnya dengan bilangan tak berdimensi lain. Jika dua pola aliran yang mirip secara geometris, mungkin pada fluida yang berbeda dan laju alir yang berbeda pula, memiliki nilai bilangan tak berdimensi yang relevan, keduanya disebut memiliki kemiripan dinamis. Rumus *reynolds number* secara umum adalah (Wikipedia [3]):

$$R_e = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{\text{gaya_inersia}}{\text{gaya_viskos}} \dots\dots\dots(2.12)$$

dimana:

- v : kecepatan fluida
- d : panjang karakteristik fisik system
- ρ : densitas fluida (rapat masa)
- μ : viskositas dinamis (absolute) fluida
- ν : viskositas kinematik fluida : μ / ρ

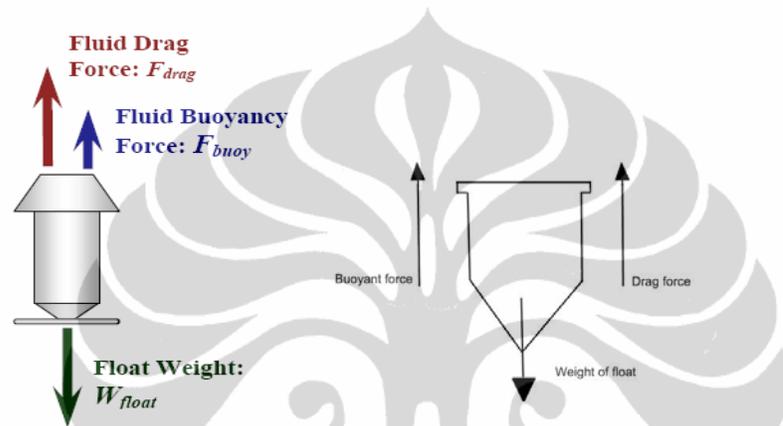
Dari kedua parameter yang berpengaruh tersebut yaitu *meter coefficient* atau k-faktor dan *reynolds number*, selanjutnya bisa disusun suatu hasil kalibrasi yang bersifat universal.

2.2. PRINSIP DASAR ROTAMETER DAN TURBINE FLOWMETER

Flowmeter jenis *turbine flowmeter* dan *rotameter* merupakan jenis meter ukur yang cukup banyak dipakai pada dunia industri dan laboratorium karena mempunyai kelebihan tersendiri. Selain *flowmeter* jenis tersebut sebenarnya masih banyak jenis *flowmeter* yang biasa gunakan seperti *magnetic*, *thermal*, *ultrasonic*, *coriolis*, *vortex* dan lain sebagainya. Sedangkan sebagai standar atau referensi adalah umumnya model penimbangan, *tank*, *volumetric prover*, *orifice*, *ventury*, *nozzle* dan lain-lain.

2.2.1. Prinsip Dasar *Rotameter*

Gaya-gaya secara umum yang terjadi pada *float* suatu *rotameter* yang berkerja digambarkan seperti gambar 2.2. Berat dari *float* sebanding dengan gaya gravitasi yang terjadi. Gaya apung (*buoyant force*) sebanding dengan gaya berat dari fluida (gas) yang menggerakkan *float* tersebut. Gaya seret/tarik (*drag force*) sebanding dengan gaya gesek (*frictional force*) antara *float* dan gerakan fluida yang mengalir.



Gambar 2.2. Skema gaya yang bekerja pada *rotameter* pada saat kondisi mengambang.

Secara matematis gaya –gaya yang terjadi adalah (APTI 435 [6]) :

$$\text{Drag force} = \frac{C_d \cdot A_f \cdot \rho_m \cdot v^2}{2} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\text{Weight force} = V_f \cdot \rho_f \cdot g \dots\dots\dots (2.14)$$

$$\text{Buoyant force} = V_f \cdot \rho_m \cdot g \dots\dots\dots (2.15)$$

dimana :

A_f = cross sectional area pada *float*

C_d = koefisien gaya tarik/seret (*drag coefficient*)

g = gravitasi lokal

v = kecepatan rata-rata dalam *annular area* pada *rotameter*

V_f = volume *float*

ρ_f = densitas / rapat masa bahan *float*

ρ_m = densitas / rapat masa dari fluida kerja

Ketika gaya yang bekerja pada persamaan (2.13);(2.14);(2.15) membuat keseimbangan, *float* akan berada pada kondisi yang seimbang pada *tube* atau pipa. Persamaan gaya yang terjadi :

$$\frac{C_d \cdot A_f \cdot \rho_m \cdot v^2}{2} + V_f \cdot \rho_m \cdot g = V_f \cdot \rho_f \cdot g$$

Selanjutnya formula untuk v dihasilkan :

$$v = \left[\frac{2 \cdot V_f \cdot g (\rho_f - \rho_m)}{C_d \cdot A_f \cdot \rho_m} \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.16)$$

Luasan dari *float* $= \frac{\pi \cdot D_f^2}{4}$ dimana D_f adalah diameter *float*. Dengan mensubstitusi A_f dengan besarnya luasan dari *float* tersebut didapat :

$$v = \left[\frac{8 \cdot V_f \cdot g (\rho_f - \rho_m)}{C_d \cdot \pi \cdot D_f^2 \cdot \rho_m} \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.17)$$

$C_m = \left(\frac{8}{C_d \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{2}}$, dimana C_m adalah koefisien *flowmeter* (*meter coefficient*) dan tergantung pada koefisien gaya tarik (*drag coefficient*). Dengan mensubstitusi C_m dengan formula (2.17) tersebut didapatkan :

$$v = C_m \left[\frac{V_f \cdot g (\rho_f - \rho_m)}{D_f^2 \cdot \rho_m} \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.18)$$

Karena *drag coefficient* C_d tergantung *reynolds number* (Aerodynamics[2]), maka C_m sebagai fungsi *reynolds number*. Densitas dari gas yang mengalir dalam *rotameter* jauh lebih kecil di dibandingkan dengan densitas dari bahan *float*, oleh

karena itu hubungan $(\rho_f - \rho_m)$ dapat ditulis sebagai ρ_f (APTI 435 [6]). Dengan memodifikasi hubungan tersebut dari persamaan (2.18) diperoleh :

$$v = C_m \left[\frac{V_f \cdot g \cdot \rho_f}{D_f^2 \cdot \rho_m} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.19)$$

Aliran volume (Q_m) yang mengalir pada *rotameter* sama juga fungsi dari kecepatan rata-rata (v) dan *annular area* dari meter tersebut (A_m). Dengan mensubstitusikan kecepatan tersebut dengan $\frac{Q_m}{A_m}$ maka diperoleh :

$$\frac{Q_m}{A_m} = C_m \left[\frac{V_f \cdot g \cdot \rho_f}{D_f^2 \cdot \rho_m} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.20)$$

selanjutnya dari persamaan (2.20) tersebut dapat disederhanakan lagi :

$$Q_m = \frac{C_m \cdot A_m}{D_f} \left[\frac{V_f \cdot g \cdot \rho_f}{\rho_m} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.22)$$

Densitas dari *float* ρ_f sama dengan masa dari *float* m_f dibagi dengan volumenya V_f . Jika kita substitusikan densitas tersebut dengan $(\frac{m_f}{V_f})$ dan menghilangkan V_f , maka persamaan (2.22) diatas menjadi :

$$Q_m = \frac{C_m \cdot A_m}{D_f} \left[\frac{g \cdot m_f}{\rho_m} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.23)$$

Densitas dari gas yang melalulhi meter tersebut ρ_m adalah $\left(\frac{P_m \cdot M_m}{R \cdot T_m} \right)$, dimana P_m adalah tekanan absolut pada meter ukur, M_m merupakan berat molekul gas media, R adalah konstanta gas universal dan T_m adalah suhu absolut gas. Dengan mensubstitusikan hubungan tersebut untuk ρ_m pada persamaan (2.23) diperoleh persamaan umum aliran untuk *rotameter* :

Dari persamaan (2.24) bisa didapatkan nilai C_m :

$$C_m = \frac{Q_m \cdot D_f}{A_m} \left(\frac{P_m \cdot M_m}{g \cdot m_f \cdot R \cdot T_m} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2.29)$$

Dengan membagi R_e pers. (2.28) dengan C_m pers. (2.29) didapatkan suatu parameter perbandingan tak berdimensi :

$$\frac{R_e}{C_m} = \frac{\frac{Q_m (D_r - D_f) P_m \cdot M_m}{A_m \cdot \mu_m \cdot R \cdot T_m}}{\frac{Q_m \cdot D_f}{A_m} \left(\frac{P_m \cdot M_m}{g \cdot m_f \cdot R \cdot T_m} \right)^{\frac{1}{2}}} \dots\dots\dots(2.30)$$

Dengan penyederhanaan pada persamaan (2.30) dihasilkan:

$$\frac{R_e}{C_m} = \left[\frac{(D_r - D_f)}{\mu_m \cdot D_f} \right] \left(\frac{g \cdot m_f \cdot P_m \cdot M_m}{R \cdot T_m} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2.31)$$

Dalam pemakaiannya diberikan penyederhanaan hubungan antara $(D_r - D_f)$ dan D_f pada persamaan (2.31) diatas, sehingga mendapatkan suatu faktor tak berdimensi yang tak terbatas pada salah satu *reynolds number*, R_e atau *meter coefficient*, C_m :

$$\frac{R_e}{C_m} = \frac{1}{\mu_m} \left[\frac{D_r}{D_f} \right] \left(\frac{g \cdot m_f \cdot P_m \cdot M_m}{R \cdot T_m} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2.32)$$

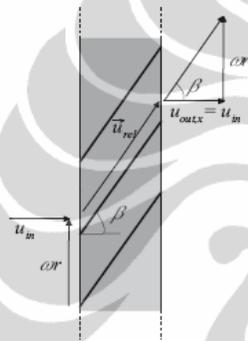
Parameter tak berdimensi ini selanjutnya bisa diplot dengan *meter coefficient* , C_m sebagai kurva kalibrasi dari *rotameter* (APTI 435 [6]) .

2.2.2. Mekanisme Kerja Turbine Flowmeter Putaran Ideal

Untuk putaran yang ideal, diasumsikan aliran yang melalul *turbine flowmeter* seragam, *incompressible* dan *steady*, yang mana putaran *rotor* (baling-baling) tanpa gesekan dan permukaan *rotor* mempunyai bentuk *helix* yang sempurna dengan pisau yang sangat tipis. Pada kondisi ini kecepatan putar *rotor* ditentukan oleh *pitch* dari *rotor* S , yang didefinisikan sebagai (Stoltenkamp[10]) :

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\tan \beta} \dots\dots\dots(2.33)$$

dengan r adalah jari-jari *rotor* dan β adalah sudut pisau *rotor* terhadap sumbu *rotor* (lihat gambar 2.3).



Gambar 2.3. *Steady flow* masuk keluar *rotor* pada kondisi gesekan *rotor* yang ideal dengan pisau *helical rotor* yang sangat tipis pada sudut pisau β .

Dalam kasus ideal *pitch* berkaitan perpindahan aksial dari fluida selama satu putaran *rotor*. Untuk bentuk *helical* yang sempurna dari *rotor* *pitch* S adalah konstan untuk seluruh jari-jari *rotor*, sedangkan sudut pisau β berubah. Karena gesekan tidak dipertimbangkan aliran masuk dan meninggalkan *rotor* sejajar dengan pisau *rotor*. Ini berarti kecepatan masuk dan kecepatan putar yang terkait pada sudut baling-baling β adalah :

$$\frac{\omega_{id} r}{u_{in}} = \tan \beta \dots\dots\dots(2.34)$$

dengan ω_{id} adalah kecepatan *angular* (sudut) *rotor* untuk pertimbangan situasi yang ideal dan u_{in} adalah kecepatan aliran masuk *rotor*. Kecepatan *angular* dalam situasi yang ideal ini adalah :

$$\omega_{id} = \frac{u_{in} \tan \beta}{r} = \frac{2\pi \cdot u_{in}}{S} \dots\dots\dots(2.35)$$

Karena *volume flow*, Q (volume aliran) sama dengan kecepatan aliran masuk dikalikan dengan *crosssectional area* dari *rotor* yaitu

$$Q = u_{in} \cdot A \dots\dots\dots(2.36)$$

maka kita akan menemukan hubungan antara aliran volume dan kecepatan putar :

$$Q = \frac{A \cdot S}{2\pi} \omega_{id} \dots\dots\dots(2.37)$$

hubungan ini diterapkan pada aktual *turbine flowmeter* dalam bentuk :

$$Q = K \cdot \omega_{id} \dots\dots\dots(2.38)$$

Dimana K adalah *meter factor (meter constant)* yang mana idealnya nilai dari K tersebut adalah konstan (Stoltenkamp [10]). Tetapi karena pada prakteknya kecepatan putar *rotor* dipengaruhi oleh *friction forces* dan *drag forces* maka pada aplikasinya diberikan suatu nilai *k-factor* atau koefisien aliran yang sudah disesuaikan nilainya untuk kondisi aliran tertentu.

Dalam hal ini untuk aliran yang *steady*, koefisien aliran untuk meter yang spesifik tergantung dari beberapa parameter yang tak berdimensi seperti (Stoltenkamp[10]) :

- *reynolds number*, Re : $\frac{u_{in} \cdot d}{\nu}$
- *mach number*, M : $\frac{u_{in}}{c_o}$
- Rasio torsi gesekan mekanis dan torsi fluida penggerak

dimana d adalah panjang karakteristik yaitu panjang penghubung antara pisau pada *rotor*, ν adalah viskositas kinematik dari fluida, c_o adalah kecepatan suara dan ρ densitas fluida. Fabrikasi umumnya menggunakan kalibrasi *steady flow* pada tekanan yang berbeda untuk membedakan efek *reynolds number* dan pengaruh gesekan mekanis. Secara umum pengaruh *mach number* mempunyai koreksi yang kecil karena efek bilangan *Mach* terlihat pada pengukuran temperatur pada aliran yang tinggi.

BAB IV

PERUMUSAN METODE SEBAGAI PENDEKATAN PERHITUNGAN KALIBRASI, IMPLEMENTASI DAN ANALISIS HASIL

4.1. ANALISA PADA KONDISI PENGUKURAN

Pada bab sebelumnya telah dianalisa prinsip dasar dan mekanisme kerja instrumen ukur *rotameter* dan *turbine flowmeter*. Dari analisis tampak adanya pengaruh yang cukup signifikan dari parameter fisik media yang diterapkan yaitu densitas serta viskositas fluida yang difusikan dalam bentuk viskositas kinematik. Parameter-parameter tersebut akan berpengaruh pada mekanisme sensor mekanis yang digunakan, sehingga akan cukup berpengaruh pada besaran yang dihasilkan meter ukur tersebut. Untuk memvalidasi analisis tersebut akan dilakukan pengukuran aktual dengan menggunakan meter ukur tersebut dengan pengkondisian media yang diberikan cukup berbeda. Pengukuran dilakukan pada instalasi kalibrasi yang telah dibahas pada bab III sebelumnya. Dari hasil pengukuran tersebut lebih membuktikan kondisi hasil ukur yang terjadi terhadap perubahan besaran fisik media kerja yang diterapkan.

4.1.1. Pengukuran Pada Kalibrasi *Rotameter*

Rotameter yang diambil datanya dipilih yang mampu diaplikasikan pada tekanan tinggi. Meter yang akan dicek tersebut dilakukan pengukuran atau kalibrasi dengan cara mengukur aliran aktual yang ditunjukkan melalui perhitungan aliran pada *orifice* sebagai standar atau kalibrator. Kondisi yang pertama diberikan pada *flowmeter* tersebut dengan seting tekanan kerja mendekati atmosfer (*low pressure*) dan suhu normal mendekati 20°C. Pada seting aliran yang ditetapkan pada penunjukan *grade rotameter* tersebut dihitung aliran aktual yang terjadi dari perhitungan *orifice* standar. Untuk ini dipilih beberapa titik seting aliran pada *rotameter* pada rentang ukurnya. Untuk kondisi yang lain diberikan seting kondisi tekanan lebih tinggi yaitu sekitar 5 bar dengan seting

suhu tidak berbeda. Dengan seting titik aliran di *rotameter* yang sama dengan sebelumnya dilakukan pengukuran dan perhitungan aliran aktual yang terjadi melalui perhitungan kalibrator *orifice* yang digunakan. Adapun selanjutnya dari data yang didapat dilakukan kajian dan evaluasi.

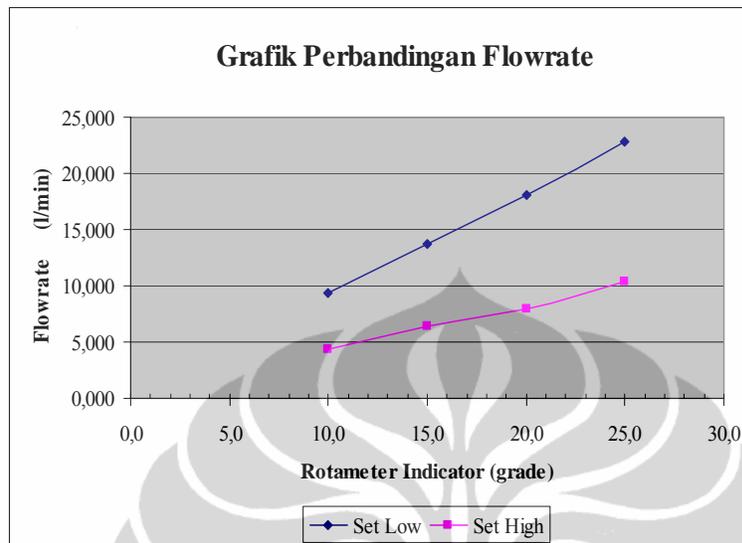
Dengan prosedur pengambilan data yang sesuai dengan bahasan pada bab III sebelumnya maka telah didapatkan data-data hasil pengukuran dan hasil pengolahannya. Selanjutnya diberikan analisa kedua hasil pengolahan data kalibrasi *rotameter* tersebut dalam tabel perbandingan dan grafik.

Sesuai dengan analisa pada *rotameter*, yaitu rapat masa media yang difusikan dalam bentuk viskositas kinematik mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap besarnya *drag force*, hal ini terbukti pada kondisi pengukuran sebenarnya. Dari hasil kalibrasi *rotameter* tersebut bisa dilihat pengaruh yang cukup signifikan pada perbedaan kondisi yang diterapkan pada meter tersebut (tabel 4.2). Dari pengujian *flowmeter* pada tekanan yang lebih tinggi (sekitar 5 bar) untuk seting laju aliran yang sama perubahan densitas (ρ), berpengaruh cukup signifikan pada *drag force* dan *buoyant force*. Perubahan tersebut selanjutnya akan mempengaruhi aliran yang terukur. Dari data yang didapatkan juga bisa dilihat adanya perbedaan dalam laju aliran massa (*mass flowrate*) dan laju aliran volume (*volume flowrate*). Dengan adanya kenaikan tekanan maka aliran volume yang terukur akan semakin kecil karena faktor perubahan densitas dan viskositas kinematiknya. Demikian sebaliknya yang terjadi untuk aliran masanya. Selanjutnya bisa dilihat prosentase perubahan yang terjadi dalam bentuk aliran volume untuk kedua kondisi yang berbeda pada tiap seting titik aliran :

Tabel 4.1. Perbandingan 2 kondisi pengukuran *rotameter*

Penunjukan alat <i>grade</i>	Δ Densitas, ρ ($H-L$)		Δ Aliran, Q ($H-L$)	
	kg/m^3	% (L)	l/min	% (L)
10,0	5,762	474,4	-5,078	-54,1
15,0	5,474	444,2	-7,326	-53,2
20,0	5,921	472,4	-10,177	-56,1
25,0	5,789	449,9	-12,446	-54,5
Rata-rata	5,737	460,2	-8,757	-54,5
Deviasi (\pm)	0,189	14,7	3,225	14,1

Untuk perbandingan dalam grafik dari kedua jenis data tersebut bisa dilihat pada gambar 4.1:



Gambar 4.1. Perbandingan penunjukan *rotameter* dengan *flowrate*.

Adanya perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa perlunya diberikan suatu faktor koreksi atau pendekatan terhadap media aktualnya pada suatu proses kalibrasi maupun pemakaian *rotameter* gas. Apalagi untuk kebutuhan akurasi yang tinggi untuk meter ukur yang bersangkutan.

4.1.2. Pengukuran Pada Kalibrasi *Turbine Flowmeter*

Untuk *turbine flowmeter* dilakukan melakukan pengukuran pada 2 kondisi berbeda juga. Untuk kondisi yang pertama dilakukan pada seting tekanan sekitar 5 bar dan suhu mendekati 20°C. Dilakukan pengukuran aliran pada seting frekuensi yang ditunjukkan pada *turbine flowmeter* tersebut.. Dalam satu rentang *flowmeter* tersebut ditetapkan beberapa titik frekuensi yang pada masing-masing titik tersebut akan diukur aliran aktual yang terjadi dengan menggunakan perhitungan aliran dari *orifice*. Kondisi yang berbeda diterapkan seperti diatas yaitu pada seting tekanan sekitar 10 bar dan kondisi suhu yang tidak berbeda. Selanjutnya dilakukan pengujian dengan prosedur yang sama pada *rotameter* tapi untuk *turbine flowmeter* seting berada pada titik frekuensi yang sama. Dari data

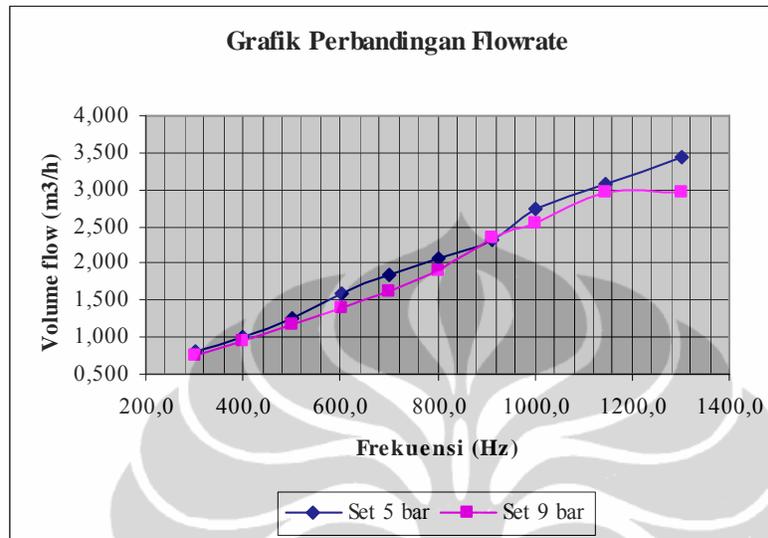
yang diperoleh akan dilakukan evaluasi. Sama seperti pengukuran pada *rotameter* setelah didapat data-data pengukuran *turbine flowmeter* selanjutnya dilakukan pengolahan data hasil kalibrasi dan analisisnya yang ditampilkan dalam bentuk tabel perbandingan dan grafik.

Bila ditinjau prinsip aliran *steady* pada mekanisme turbin parameter *reynolds number* dan *mach number* mempunyai pengaruh yang cukup besar. Dalam hal ini parameter berdimensi yang berpengaruh tersebut adalah viskositas kinematik. Dari perbedaan rapat masa yang diterapkan menyebabkan terjadinya perubahan viskositas kinematik. Dengan adanya perubahan parameter tersebut akan mempengaruhi gaya gesek *rotor* terhadap fluida yang akan berpengaruh terhadap besarnya kecepatan aksial fluida yang dihasilkan (u_{in}) oleh *rotor*. Pada akhirnya akan berpengaruh pada laju aliran volume yang dihasilkan. Dari perbedaan tekanan kerja yang mencapai kurang lebih 5 bar untuk seting aliran yang sama dihasilkan perbedaan densitas (ρ) dan aliran yang terukur bentuk aliran massa dan aliran volume. Dengan adanya kenaikan tekanan maka aliran volume yang terukur akan semakin kecil karena faktor perubahan densitas dan viskositas kinematiknya. Demikian sebaliknya yang terjadi untuk aliran massanya. Selanjutnya bisa dilihat prosentase perubahan yang terjadi dalam bentuk aliran volume untuk kedua kondisi yang berbeda pada tiap seting titik aliran :

Tabel 4.2. Perbandingan 2 kondisi pengukuran *turbine flowmeter*

Penunjukan alat <i>Hz</i>	Δ Densitas, ρ ($H-L$)		Δ Aliran, Q ($H-L$)	
	kg/m^3	% (L)	$m^3/hour$	% (L)
300,0	5,274	77,4	-0,052	-6,6
397,5	5,274	77,4	-0,075	-7,4
501,0	5,316	78,0	-0,095	-7,5
602,0	5,339	78,6	-0,199	-12,5
702,0	5,339	78,6	-0,239	-12,9
802,0	4,762	70,1	-0,168	-8,1
911,0	3,643	53,6	0,029	1,2
1000,0	3,665	54,1	-0,179	-6,5
1147,8	3,120	46,0	-0,112	-3,6
1226,0	3,120	46,0	-0,483	-14,0
Rata-rata	4,485	66,0	-0,157	-7,8
Deviasi (\pm)	0,976	14,4	0,139	4,0

Untuk perbandingan dalam grafik dari kedua jenis data tersebut bisa dilihat pada gambar 4.2:



Gambar 4.2. Perbandingan penunjukan *turbine flowmeter* dengan *flowrate*.

Adanya perbedaan tersebut juga mengindikasikan bahwa perlunya diberikan suatu faktor koreksi atau pendekatan terhadap media aktualnya pada suatu proses kalibrasi maupun pemakaian *turbine flowmeter*. Apalagi untuk kebutuhan akurasi yang tinggi untuk meter ukur yang bersangkutan. Walaupun dalam eksperimen yang dilakukan koreksi tidak sebesar yang dihasilkan oleh jenis *rotameter*.

Akhirnya dari analisis mekanisme kerja dan pengukuran yang dilakukan bisa disimpulkan bahwa sifat properties fluida yang diterapkan pada *flowmeter* cukup mempengaruhi kinerja dari kedua jenis sensor yang digunakan yaitu *turbine* dan *floating* yang selanjutnya akan berpengaruh pada akurasi penunjukan alat tersebut. Salah satu besaran yang merupakan sifat properties fluida yang cukup besar pengaruhnya adalah viskositas kinematik (ν) yang dihasilkan dari besaran viskositas dinamik (μ) dan rapat massa (ρ).

4.2. PENDEKATAN PROSES PERHITUNGAN KALIBRASI UNTUK MEDIA YANG BERBEDA

Dari beberapa pembahasan yang telah dilakukan bisa dilihat bahwa viskositas khususnya viskositas kinematik mempunyai peran yang cukup penting dalam mempengaruhi hasil pengukuran aliran pada suatu *flowmeter*. Hal ini berpengaruh pada gaya seret dan gaya gesek fluida terhadap material sensor yang terjadi selama proses berlangsung atau dengan kata lain kekentalan suatu fluida berpengaruh pada koefisien gesek yang terjadi.

Pada proses kalibrasi *flowmeter* perbedaan kondisi fluida kerja seharusnya diperhitungkan untuk kebutuhan pengukuran yang lebih akurat. Hal ini bertujuan agar data-data yang dihasilkan dari proses kalibrasi tersebut mampu dan mudah diaplikasikan pada penggunaannya aktualnya. Idealnya pada proses kalibrasi sebenarnya digunakan fluida yang sama dengan pemakaian aktualnya, sehingga karakteristik fluida kerjanya tidak berbeda. Tapi hal ini cukup menyulitkan dan hampir tidak mungkin karena faktor keamanan, kesulitan dan faktor ekonomis. Apalagi bila fluida gas yang digunakan sifatnya berbahaya, mudah terbakar dan mahal harganya. Pada umumnya instalasi kalibrasi *flowmeter* gas banyak menggunakan fluida udara dari tabung gas, *compressed air* atau *blower* sebagai sumber aliran. Selain itu juga bisa digunakan sumber nitrogen dari tabung gas, karena dirasa lebih mudah, murah dan aman. Oleh karena itu dilakukan kajian, dengan menggunakan media kalibrasi tersebut sebagai pendekatan terhadap media sebenarnya. Hal ini bertujuan agar fluida yang digunakan sebagai kalibrasi mempunyai sifat dan karakteristik yang dibutuhkan sama dengan fluida pemakaian sebenarnya.

Sebelumnya bisa dilihat bahwa viskositas kinematik merupakan perbandingan viskositas terhadap kerapatan massa atau densitas (ρ):

$$v = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots (4.1)$$

dimana :

- v : viskositas kinematik*centistoke* , *m²/sec* , ...*dsb*
- μ : viskositas dinamik *poise* atau *Pa.S* , ...*dsb*
- ρ : densitas*kg/m³* , *lb/feet³* , ...*dsb*

Karena viskositas dinamik tergantung pada suhu, apabila suhu fluida tidak banyak terjadi perbedaan, dan perubahan yang signifikan terjadi pada tekanan maka viskositas kinematik sangat dipengaruhi oleh densitasnya, karena densitas sangat dipengaruhi oleh tekanan statik. Dengan demikian besarnya tekanan yang diterapkan pada media kerja *flowmeter* sangat menentukan besarnya viskositas kinematik.

Yang penting sebelumnya harus diketahui viskositas kinematik fluida kerja aktual dari *flowmeter*. Dalam hal ini bisa dihitung atau didapat melalui tabel sifat properties fluida, yang mana parameter pengaruhnya adalah viskositas dinamik dan rapat masa.

Untuk viskositas dinamik beberapa gas khususnya udara bisa dihitung dari persamaan *Sutherland*:

$$\mu = \mu_{ref} \times \left(\frac{T_{ref} + C}{T + C} \right) \times \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{1,5} \dots\dots\dots (4.2)$$

dimana :

- μ : viskositas dinamik *poise* atau *Pa.S*, ...*dsb*
- C : *Sutherland constant* ,..... untuk udara 120
- T : suhu terukur (absolut)*Kelvin* atau *Rankie*
- T_{ref} : suhu referensi,..... udara 291,15 °K
- μ_{ref} : viskositas referensi, untuk udara $\mu_{ref} = 182,7 \mu P$ (*micropoise*) = 0,0001827 *Poise* = 0,00001827 *Pascal-second*.

Sedangkan densitas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan karakteristik gas :

$$\rho = \frac{p.M}{Z.R.T} \dots\dots\dots (4.3)$$

dimana :

- ρ : rapat massa atau densitas ...*kg/m³*, *lb/feet³*,... *dsb*
- p : tekanan terukur (tekanan mutlak),*Pa*, *mmH20*, *psi*, *bar*,.. *dsb*
- p : tekanan terukur (tekanan mutlak),*Pa*, *mmH20*, *psi*, *bar*,.. *dsb*
- T : suhu terukur (mutlak)*Kelvin* atau *Rankie*

- R : konstanta gas universal adalah $8314,3 \text{ J/kmol.K}$
- M : berat molekul per mol, gr atau $\text{kg}, \dots \text{ dsb.}$
- Z : *compressibility factor*. Untuk udara dalam kondisi yang dijaga atau dalam ruangan yang terkondisikan variasi pada kondisi ambient untuk Z dapat dianggap rata (Cussons [4]).

Dari viskositas kinematik fluida gas yang terpakai dilapangan dilakukan pendekatan nilai tersebut untuk viskositas kinematik fluida gas yang akan digunakan untuk kalibrasi atau *test*. Dalam hal ini berarti dilakukan pengaturan parameter yang memungkinkan pada fluida untuk kalibrasi, agar dihasilkan viskositas kinematik sama dengan fluida yang sebenarnya digunakan oleh *flowmeter* tersebut. Dengan asumsi suhu yang digunakan kedua fluida tersebut tidak jauh berbeda (umumnya kondisi normal) maka yang utama, cukup dilakukan pengaturan besaran tekanan statik yang diterapkan pada saat kalibrasi atau *test* berlangsung untuk menghasilkan densitas tertentu dalam menghasilkan nilai viskositas kinematik yang sama. Dari rumusan viskositas kinematik dan densitas, maka didapat besarnya tekanan yang bisa diaplikasikan :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{dan} \quad \rho = \frac{p}{R' T}$$

$$\text{Sehingga didapatkan : } p = \frac{\mu \cdot R' \cdot T}{\nu} \dots\dots\dots (4.4)$$

dimana :

- R' : konstanta gas spesifik, J/kg.K

$$\text{Konstanta gas spesifik bisa dihitung dari : } R' = \frac{R}{M}$$

Jadi dengan memasukkan nilai viskositas dinamik (μ) pemakaian fluida gas yang sebenarnya, serta suhu (T), viskositas kinematik (ν) dan konstanta gas spesifik (R') fluida gas yang digunakan sebagai fluida kalibrasi maka tekanan statik yang akan diaplikasikan pada proses kalibrasi (*working pressure*) bisa diketahui. Selanjutnya dengan melakukan pengaturan tekanan pada regulator sesuai dengan nilai tekanan yang telah dihitung akan memberikan sifat viskositas

kinematik fluida yang identik antara media kalibrasi dengan media servis sebenarnya pada *flowmeter* gas tersebut.

4.3. METODE UNIVERSAL CALIBRATION CURVE UNTUK HASIL KALIBRASI

Hasil dari proses kalibrasi atau pengujian sebaiknya mampu diaplikasikan oleh pengguna alat ukur yang bersangkutan dilapangan dengan mudah dan benar. Tapi untuk kebutuhan pengukuran yang lebih akurat dengan aplikasi sistem kerja yang berbeda atau cukup ekstrim kurang tepat apabila kondisi yang berbeda pada saat kalibrasi (alat, lingkungan, sistem dan fluida kerja) dengan kondisi sebenarnya, diterapkan di lapangan. Oleh karena itu adanya perhitungan tambahan atau pendekatan dengan pemakaian yang sebenarnya merupakan bentuk kompensasi untuk mengurangi tingkat kesalahan yang diakibatkan perbedaan situasi tersebut.

Secara umum pemakaian *flowmeter* gas yang membutuhkan suatu nilai *meter factor* (*k-factor*) dari proses kalibrasi seperti *turbine flowmeter* koreksi perbedaan kondisi tersebut didekati dengan mengkalibrasi meter ukur tersebut dengan fluida yang mempunyai karakteristik (yang berpengaruh) sama dengan fluida kerja yang sebenarnya. Tetapi untuk jenis *flowmeter* yang tanpa memasukkan unsur *k-factor* dari proses kalibrasi seperti jenis *rotameter*, faktor koreksi bisa dilakukan dengan model sederhana perbandingan parameter yang cukup berpengaruh seperti viskositas dan densitasnya. Selain itu bisa juga dilakukan dengan membuat suatu bentuk hasil kalibrasi yang bersifat umum (*universal calibration report*) yang bisa dipakai atau diaplikasikan pada berbagai situasi dan kondisi sifat fluida kerja yang berbeda.

4.3.1. Universal Viscosity Curve pada Turbine Flowmeter

Diketahui, bahwa *k-factor* (*calibration factor*) adalah jumlah pulsa per unit pengukuran yang dihasilkan oleh putaran turbin atau didefinisikan sebagai pulsa per unit volume. Kalibrasi *turbine flowmeter* sebenarnya menentukan *k-factor* sesuai dengan keperluan. Setiap *turbine flowmeter* memiliki *k-factor* yang unik atau berbeda-beda dan bahkan untuk berbagai kondisi aliran atau media. Karena

itu kalibrasi dilakukan dengan membuat suatu kurva *multiple calibration* pada kondisi viskositas kinematik yang berbeda untuk meng-cover rentang penggunaan yang diinginkan. Yaitu dengan membuat grafik atau mengplot suatu kurva *k-factor* dengan nilai frekuensi keluaran *flowmeter* (Hz) dibagi viskositas kinematik dari fluida, Hz/v. Dimana *k-factor* dihitung dari :

$$k - factor = \frac{f}{Q_v} \times Time_scaler \dots\dots\dots (4.5)$$

dimana :

$$k = k\text{-factor (meter factor)} \dots\dots\dots [\text{pulsa/unit volume}]$$

$$f = \text{frekuensi pulsa} \dots\dots\dots [\text{pulsa per time atau Hz}]$$

$$Q_v = \text{flowrate (from calibration)} \dots\dots\dots [\text{volume / unit waktu}]$$

Frekuensi diperoleh dari pembacaan *turbine flowmeter* pada saat kalibrasi dalam rentang pengukuran yang dikehendaki dan viskositas kinematik dilakukan perhitungan dengan melakukan pengukuran parameter tekanan statik dan suhu pada meter ukur yang bersangkutan.

Hubungan antara *k-factor* dan Hz/v merupakan kondisi yang mewakili suatu kurva umum yang biasa disebut dengan *universal viscosity curve*. Semakin banyak dihasilkan kondisi kurva dengan viskositas kinematik tertentu semakin menghasilkan kurva kalibrasi yang lebih representatif. Atau dengan beberapa titik ukur untuk satu kondisi viskositas kinematik dapat juga dibangun grafik antara *meter factor* tersebut dengan frekuensi per viskositas kinematiknya (Hz/v) untuk pembuatan *single curve*.

Setelah didapat nilai *k-factor turbine flometer* dari hasil kalibrasi serta pengambilan data frekuensi pada pemakainya selanjutnya aliran untuk pengoperasian secara teknis mengikuti persamaan secara umum (FlowTech [12]):

$$Flow_Rate_Indication = \frac{Frequency}{Meter_Factor} \times Time_Scaler \dots\dots\dots (4.6)$$

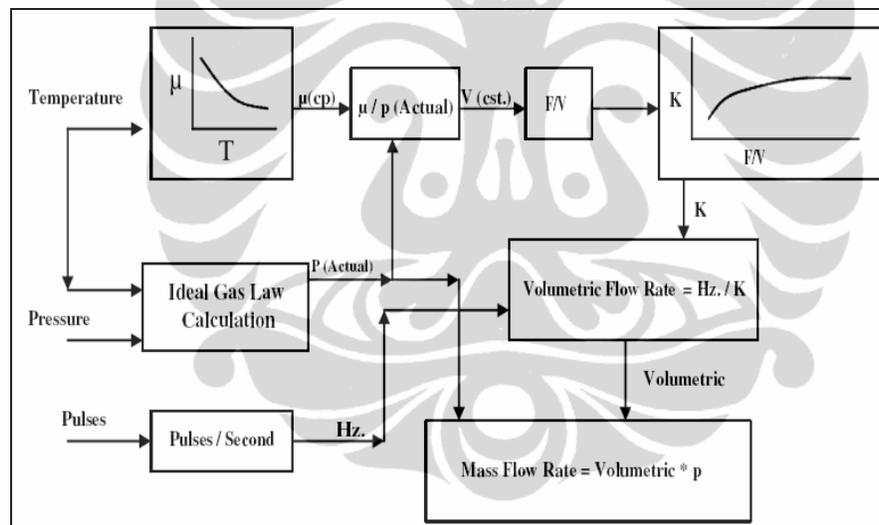
dimana untuk *time scaler* sama dengan :

- 1 untuk pembacaan *flowrate per second (sec)*
- 60 untuk pembacaan *flowrate per minute (min)*
- 3600 untuk pembacaan *flowrate per hour (h)*

Pada umumnya teknik pembacaan untuk pemakaian meter ukur turbin tersebut adalah dengan membaca frekuensi keluaran dari *turbine flowmeter* dan mencari nilai viskositas fluida atau dengan pengukuran temperatur fluida serta pengukuran tekanan untuk mengetahui besarnya viskositas dan densitas fluida, selanjutnya viskositas kinematik bisa dihitung, yang akhirnya Hz/v bisa diketahui. Langkah berikut dengan *universal viscosity curve* nilai k -factor yang sesuai dengan nilai Hz/v bisa ditentukan. Bila k -factor sudah diketahui aliran yang melalui *turbine flowmeter* tersebut dapat ditentukan dari persamaan 4.6. Misal untuk *cubic feet per minute* :

$$CFM = \frac{Hz.(60)}{k - factor} \dots\dots\dots (4.7)$$

Untuk memudahkan dalam pemakaian kurva kalibrasi tersebut bisa dilihat diagram pada gambar 4.3.dibawah (Trigas [14]) :

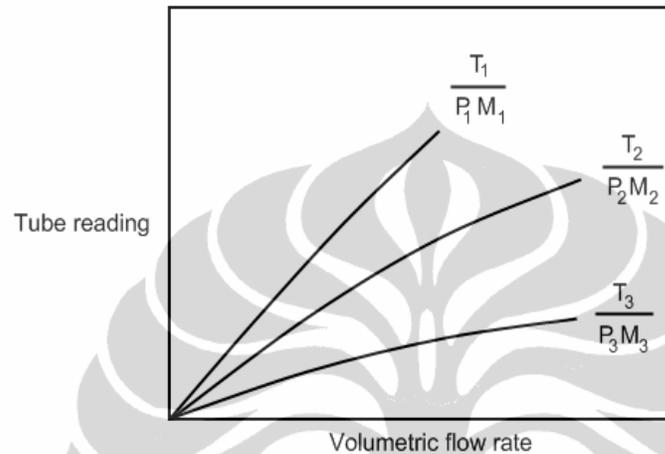


Gambar 4.3.Alur perhitungan aliran *turbine flowmeter* menggunakan *Univ.Visco.Curve*

4.3.2. *Universal Calibration Curve Pada Rotameter*

Dilakukan suatu pendekatan metode kalibrasi yang mampu diaplikasikan untuk meter ukur tersebut dalam berbagai kondisi atau bersifat independent terhadap kalibrasi serta bisa diaplikasikan pada berbagai kondisi pemakaian. Pendekatan yang paling mudah dibuatnya beberapa kurva kalibrasi yang menggambarkan berbagai kondisi operasi yang cukup lebar. Semakin lebar

kondisi kalibrasinya semakin mampu mengcover berbagai kondisi pemakaian. Variasi kondisi operasi yang dilakukan disini adalah tekanan (P), suhu (T) dan berat molekul (M). Ketiga parameter tersebut akan mewakili perbedaan kondisi media kerja dan beda fluida kerja. Gambaran rangkaian kurva kalibrasi tersebut bisa dilihat dibawah :



Gambar 4.4. Rangkaian kurva kalibrasi pada *rotameter* (APTI 435 [6])

Untuk kondisi pemakaian yang lebih universal model lain bisa dilakukan dengan membuat satu kurva yang mampu digunakan pada berbagai kondisi pemakaian. Pada pembahasan bab II disebutkan bahwa *flowrate* yang mengalir pada *rotameter* tergantung pada nilai C_m (*meter coefficient*) yang mana merupakan fungsi dari Re (bilangan *Reynold*). Karena itu untuk membuat suatu bentuk atau kurva yang *independent* atau tidak tergantung pada pemakain aktual, kurva kalibrasi harus dalam batasan C_m dan Re . Karena itu bisa dilakukan pengeplotan

dimensionless factor $\frac{Re}{C_m}$ ($\frac{Re}{C_m} = \frac{1}{\mu_m} \left[\frac{D_f}{D_r} \right] \left(\frac{g \cdot m_f \cdot P_m \cdot M_m}{R \cdot T_m} \right)^{\frac{1}{2}}$) yang didefinisikan

pada persamaan (2.32) dengan parameter *meter coefficient* C_m ,

($C_m = \frac{Q_m \cdot D_f}{A_m} \left(\frac{P_m \cdot M_m}{g \cdot m_f \cdot R \cdot T_m} \right)^{\frac{1}{2}}$) yang diberikan pada persamaan (2.29) pada

sebuah grafik sebagai *universal calibration curve* yang bersifat umum untuk berbagai kondisi pemakaian *rotameter* (APTI 435 [6]).

4.4. IMPELMANTASI PADA *FLOATING FLOWMETER* (*ROTAMETER*)

Untuk penerapan pada proses kalibrasi sesuai dengan bahasan terdahulu (sub.bab 4.2. dan 4.3.), digunakan *flowmeter* sebagai referensi atau kalibrator adalah *orifice* sedangkan alat ukur *flowmeter* yang dikalibrasi jenis *rotameter* yang mempunyai spesifikasi sebagai berikut :

Jenis alat : *Gas flowmeter*
 Merk : *Dwyer*
 Model/type : *Floating/rotameter*
 Rentang ukur : ~ *25 liter/min*
 Resolusi : *1 liter/min*

Dilakukan pengambilan data dengan cara melakukan setting titik ukur pada meter ukur yang dikalibrasi yaitu sebanyak 5 titik ukur. Kemudian setelah kondisi aliran stabil dilakukan pengambilan semua data pengukuran yang diperlukan untuk *rotameter* maupun *orifice* secara bersamaan. Untuk lebih mendapatkan data yang representatif dilakukan pengulangan pengambilan data untuk titik ukur yang sama. Semua data-data yang diperoleh bisa dilihat pada sub.bab.4.4.2. Hasil Pengolahan Data Kalibrasi.

4.4.1. Perhitungan Pemakaian Tekanan Kerja

Dilakukan pengambilan data untuk pemakaian fluida gas kalibrasi yaitu udara (*air*) untuk kondisi pemakaian tekanan yang berbeda beda. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemakaian kondisi yang berbeda serta aplikasi dari pada pemakaian fluida yang berbeda, pada proses perhitungan dan analisa nantinya.

Untuk pemakaian media kalibrasi yang sama dengan media aktual *flowmeter* tapi tekanan berbeda, kalibrasi dilakukan dengan pengaturan tekanan kerja yang sesuai dengan tekanan pemakaiannya (untuk suhu dianggap sama). Jadi dilakukan seting atau pengaturan pada regulator tekanan (sisi masuk dan sisi

keluar) di instalasi kalibrasi sehingga langsung mendapatkan tekanan kerja pada debit meter ukur yang dikalibrasi sesuai dengan aktual pemakaiannya. Jadi dengan memepertahankan besarnya tekanan kerja tersebut dilakukan pengukuran pada beberapa seting aliran dalam rentang kalibrasinya.

Untuk pemakaian media kalibrasi yang berbeda dengan media aktual yang dipakai alat ukur tersebut dilapangan, dilakukan pengaturan tekanan pada sistim kalibrasi untuk mendapatkan kondisi viskositas kinematik yang identik sesuai dengan media aslinya. Dalam hal ini dilakukan perhitungan pada *flowmeter* jenis *rotameter* dengan spesifikasi diatas yang digunakan pada media *argon* dengan kondisi tertentu yang akan dilakukan kalibrasi dengan *orifice* sebagai referensi dengan menggunakan media udara.

Tabel 4.3. Perhitungan pemakaian tekanan kerja pada *rotameter*

Untuk <i>Flowmeter</i> gas dengan fluida kerja :		<i>Argon</i>		
Beroperasi pada kondisi P :	4,38	bar A	T :	20 °C
Konstanta Gas (<i>argon</i>)	R'	=	R / M	
Konstanta Gas Universal	R	=	8314	J/k.mol.K
Massa Molekul (<i>argon</i>)	$M_{(argon)}$	=	39,95	kg/k.mol
	R'	=	208,1	J/kg.K
Temperatur	T	=	20	°C
Temperatur (mutlak)		=	293	°K
Tekanan	P	=	4,4	bar
		=	438000	Pa
	m / V	=	$P / R'.T$	
Densitas	ρ	=	7,183	kg/m ³
Viskositas Dinamik	μ	=	2,0,E-05	kg/m.s (ToolBox[15])
Viskositas Kinematik :	ν	=	μ / ρ	
		=	2,78E-06	m ² /s
Untuk mengkalibrasi <i>flowmeter</i> dengan menggunakan udara (<i>air</i>) dilakukan pengaturan tekanan untuk menghasilkan viskositas kinematik (ν) sama dengan aktualnya				

Tabel 4.3. (lanjutan)

Untuk media kerja kalibrasi gas :		Udara (<i>air</i>)	
Viskositas Dinamik	μ	= 1,82E-05 (ToolBox[15])	<i>kg/m.s</i>
Temperatur	T	= 20	$^{\circ}C$
		= 293	$^{\circ}K$
Konstanta Gas (<i>air</i>)	R'	= R / M	
Konstanta Gas Universal	R	= 8314	<i>J/k.mol.K</i>
Massa Molekul (<i>air</i>)	$M_{(air)}$	= 28,95	<i>kg/k.mol</i>
	R'	= 287,2	<i>J/kg.K</i>
Kombinasi dari persamaan diatas :			
Jadi :	ν	= μ / ρ	
	ρ	= $P / R'.T$	
	P	= $\mu . R'. T / \nu$	
	P	= 5,50E+05 5,50	<i>Pa</i> <i>bar</i>
Flowmeter untuk operasional :		Argon	dikalibrasi dengan gas :
Pada pengaturan (air) P :	5,50	bar A	T : 20 $^{\circ}C$
Menghasilkan kinematik viskositas sama ν :			2,78E-06 m^2/s
Pada gas operasi (argon) P :	4,38	bar A	T : 20 $^{\circ}C$

Asumsi komposisi udara (*air*) (ToolBox[15])

Udara (asumsi)	78%	N_2	21,86	<i>Kg/K.mol</i>
	21%	O_2	6,72	<i>Kg/K.mol</i>
Jumlah :			28,58	<i>Kg/K.mol</i>
Asumsi	(unsur lain)		28,95	<i>Kg/K.mol</i>

Jadi selanjutnya disini akan dikondisikan tekanan kerja pada *flowmeter* tersebut pada saat kalibrasi sebesar 5,5 *bar* absolut (sekitar 4,5 *bar gauge*) dengan suhu 20 $^{\circ}C$ dengan menggunakan media udara (*air*) agar mempunyai kondisi viskositas kinematik yang identik dengan gas *argon*.

4.4.2. Hasil Pengolahan Data Kalibrasi

Tabel 4.4. Hasil pengolahan data kalibrasi *rotameter* kondisi tekanan rendah (*atmospheric*)

A. Kondisi tekanan (P) dekat dengan atmosfer $\rightarrow (P_1, M_1) / T_1$

Tek. Statik (P)	Suhu (T)	Densitas	Penunjukan Alat	Aliran Massa (from orifice)	Aliran Volume (Actual) at P ; T (from orifice)	
(Bar)	$^{\circ}C$	kg/m^3	Grade	kg/sec	l/min	m^3/sec
0,010	22,5	1,197	5,0	0,00009	4,652	0,000078
0,025	22,4	1,214	10,0	0,00019	9,369	0,000156
0,042	22,2	1,235	15,0	0,00028	13,780	0,000230
0,070	22,2	1,269	20,0	0,00039	18,212	0,000304
0,108	22,2	1,313	25,0	0,00049	22,488	0,000375

Pengukuran P & T pada sisi hilir meter ukur

Tabel 4.5. Hasil pengolahan data kalibrasi *rotameter* kondisi tekanan sedang (*press.2,5 barg*)

B. Kondisi P = 2,5 bar $\rightarrow (P_2, M_2) / T_2$

Tek. Statik (P)	Suhu (T)	Densitas	Penunjukan Alat	Aliran Massa (from orifice)	Aliran Volume (Actual) at P ; T (from orifice)	
(Bar)	$^{\circ}C$	kg/m^3	Grade	kg/sec	l/min	m^3/sec
2,504	21,9	4,144	5,0	0,00022	3,226	0,000054
2,504	21,9	4,144	10,0	0,00039	5,619	0,000094
2,503	21,9	4,143	15,0	0,00054	7,864	0,000131
2,510	21,9	4,151	20,0	0,00071	10,192	0,000170
2,502	21,9	4,142	25,0	0,00091	13,208	0,000220

Pengukuran P & T pada sisi hilir meter ukur

Tabel 4.6. Hasil pengolahan data kalibrasi *rotameter* kondisi tekanan tinggi (*press.4,5 barg*)

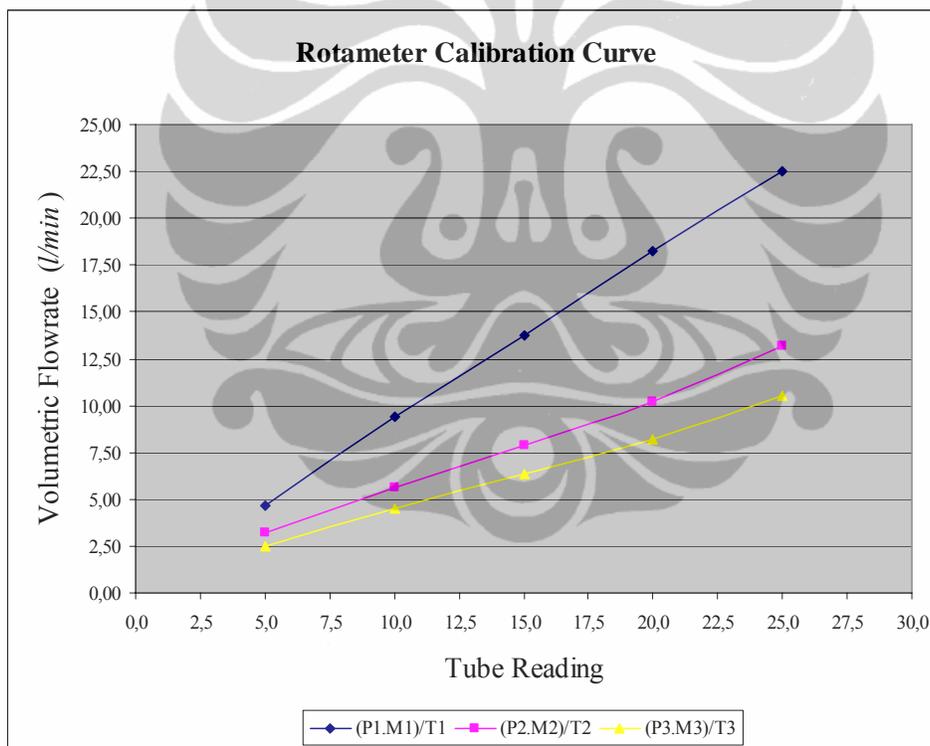
C. Kondisi P = 4,5 bar sesuai dengan perhitungan untuk pendekatan dengan fluida argon sebagai gas aktual untuk *flowmeter* tersebut. $\rightarrow (P_3, M_3) / T_3$

Tek. Statik (P)	Suhu (T)	Densitas	Penunjukan Alat	Aliran Massa (from orifice)	Aliran Volume (Actual) at P ; T (from orifice)	
(Bar)	$^{\circ}C$	kg/m^3	Grade	kg/sec	l/min	m^3/sec
4,504	21,9	6,505	5,0	0,00027	2,527	0,000042
4,503	21,9	6,505	10,0	0,00049	4,527	0,000075
4,503	21,9	6,505	15,0	0,00069	6,350	0,000106
4,503	21,9	6,505	20,0	0,00089	8,233	0,000137
4,503	21,8	6,507	25,0	0,00115	10,568	0,000176

Pengukuran P & T pada sisi hilir meter ukur

4.4.3. Pembuatan *Universal Calibration Curve*

Dari ketiga kondisi pengambilan data dilakukan plot untuk melihat kecenderungan bentuk grafik antara penunjukan *rotameter* yang dikalibrasi dengan aliran yang seharusnya ditunjukkan. Sehingga dengan demikian semakin banyak atau lebar kondisi yang bisa dibuat pada saat melakukan kalibrasi semakin mampu mengcover kebutuhan kondisi pemakaian dilapangan. Disinipun bisa didekati grafik tersebut sebagai fungsi persamaan garis untuk memudahkan dalam menghitung aliran aktual yang seharusnya ditunjukkan oleh *rotameter* tersebut sesuai dengan kesamaan kondisi yang diberikan. Yaitu penunjukan aliran aktual (Y) sebagai fungsi dari indikator alat (X).



Gambar 4.5. Rangkaian kurva kalibrasi pada *rotameter* untuk beberapa kondisi.

Selain itu juga bisa dilihat kecenderungan kondisi perbedaan aliran yang ditunjukkan oleh meter ukur yang dikalibrasi pada titik yang sama untuk kondisi pemakaian yang berbeda.

Untuk kondisi pemakaian yang lebih universal dari grafik tersebut, dibuat grafik bentuk lain dari data-data didapat sesuai dengan rumusan yang telah dibahas pada sub.bab 4.3.2 sebelumnya. Sehingga grafik tersebut mampu juga digunakan pada berbagai kondisi pemakaian. Ada sedikit perbedaan dalam pengambilan data disini yaitu dilakukan pengambilan titik-titik ukur dengan tekanan yang berbeda-beda dengan harapan bisa terlihat kecenderungan grafiknya untuk pemakaian tekanan yang lebih bervariasi dalam satu rentang titik ukur kalibrasi.

Tabel 4.7. Hasil pengolahan data kalibrasi *rotameter* dengan variasi titik dan tekanan

Tek. Statik (P)	Suhu (T)	Densitas	Penunjukan Alat	Aliran massa	Aliran Volume (<i>Actual</i>) at P ; T (from orifice)	
(Bar)	°C	kg/m ³	Grade	kg/sec	l/min	m ³ /sec
0,010	21,9	1,199	5,0	0,00013	6,481	0,000108
0,505	21,9	1,784	7,5	0,00020	6,619	0,000110
1,008	21,9	2,378	10,0	0,00028	7,082	0,000118
1,504	21,9	2,965	12,5	0,00039	7,877	0,000131
2,003	21,9	3,554	15,0	0,00050	8,433	0,000141
2,507	21,8	4,150	17,5	0,00059	8,480	0,000141
3,004	21,6	4,741	20,0	0,00076	9,646	0,000161
3,505	21,6	5,333	22,5	0,00092	10,309	0,000172
4,005	21,6	5,924	25,0	0,00111	11,281	0,000188
4,505	21,6	6,515	27,5	0,00130	11,936	0,000199

Pengukuran P & T pada sisi hilir meter ukur

Hasil pengukuran dan perhitungan dalam proses pembuatan *universal calibration curve* diberikana pada tabel 4.8. dibawah :

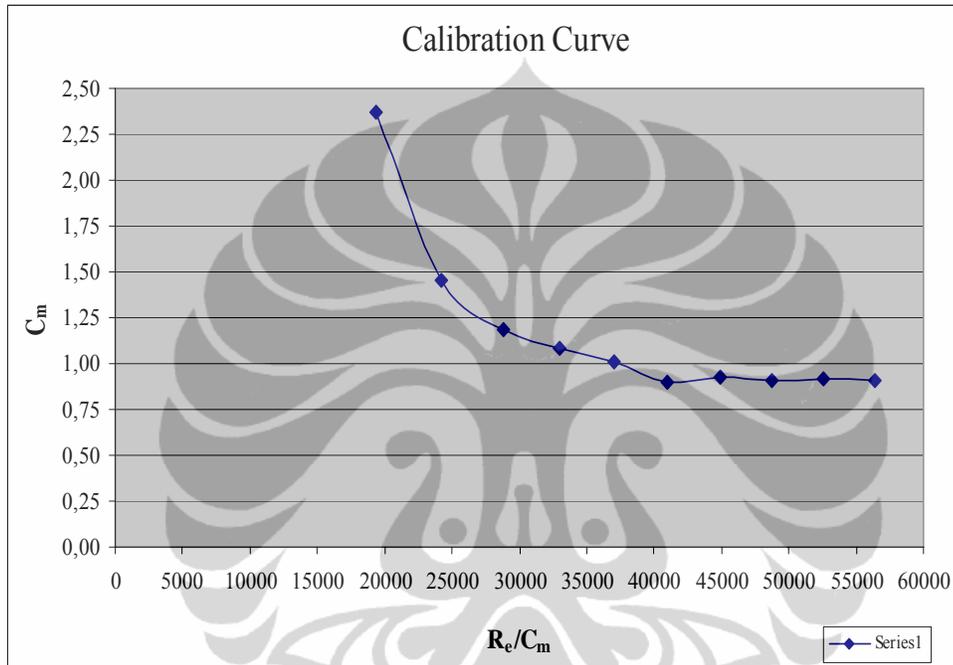
Tabel 4.8. Hasil perhitungan *universal calibration curve* pada kalibrasi *rotometer*

Parameter	Satuan	Σ Pengukuran									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aliran Volume, Q_m	m^3/sec	0,00011	0,00011	0,00012	0,00013	0,00014	0,00014	0,00016	0,00017	0,00019	0,00020
Diameter float, D_f	m	0,0035	0,0035	0,0035	0,0035	0,0035	0,0035	0,0035	0,0035	0,0035	0,0035
Annular area, A_m	m^2	5,57E-07	1,13E-06	1,72E-06	2,32E-06	2,94E-06	3,58E-06	4,23E-06	4,90E-06	5,58E-06	6,28E-06
Tek. Atmosfer	Pa	1,0E+05	1,0E+05	1,0E+05	1,0E+05	1,0E+05	1,0E+05	1,0E+05	1,0E+05	1,0E+05	1,0E+05
Tek.gas pd meter	Pa	950	50468	100800	150430	200330	250650	300410	350490	400510	450500
Tek.abs. gas pd meter, P_m	Pa	101350	150868	201200	250830	300730	351050	400810	450890	500910	550900
Massa molekul gas, M_m	$kg/kmol$	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95
Grafitasi lokal, g	m/sec^2	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
Massa float, m_f	kg	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Konstanta gas universal, R	$J/kmol.K$	8314	8314	8314	8314	8314	8314	8314	8314	8314	8314
Suhu abs.gas, T_m	K	295,2	295,2	295,2	295,2	295,2	295,1	294,9	294,9	294,9	294,9
Viskositas gas pd meter, μ_m	$Pa.S$	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05
Diameter rotometer, D_r	m	0,0036	0,0037	0,0038	0,0039	0,004	0,0041	0,0042	0,0043	0,0044	0,0045
Meter coefficient, C_m $C_m = \frac{Q_m \cdot D_f}{A_m} \left(\frac{P_m \cdot M_m}{g \cdot m_f \cdot R \cdot T_m} \right)^{\frac{1}{2}}$		2,369	1,455	1,183	1,087	1,005	0,898	0,924	0,905	0,916	0,903
R_e / C_m $\frac{R_e}{C_m} = \frac{1}{\mu_m} \left[\frac{D_r}{D_f} \right] \left(\frac{g \cdot m_f \cdot P_m \cdot M_m}{R \cdot T_m} \right)^{\frac{1}{2}}$		19344,1	24256,9	28769,5	32967,7	37024	41008,8	44902,9	48759,5	52588,2	56403,3

Dari data tersebut dapat diplot suatu grafik yang mana hubungan dari perbandingan antara *reynold number*, R_e dan *meter coefficient*, C_m dengan *meter coefficient*, C_m itu sendiri.

$$\frac{R_e}{C_m} = \frac{1}{\mu_m} \left[\frac{D_r}{D_f} \right] \left(\frac{g \cdot m_f \cdot P_m \cdot M_m}{R \cdot T_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{sebagai fungsi dari} \quad C_m = \frac{Q_m \cdot D_f}{A_m} \left(\frac{P_m \cdot M_m}{g \cdot m_f \cdot R \cdot T_m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Sehingga didapatkan hubungan keduanya sebagai *universal calibration curve* untuk *flowmeter* jenis *rotameter* seperti dibawah :



Gambar 4.6. Kurva kalibrasi pada *rotameter* (*universal calibration curve*)

Dari gambar 4.6. tersebut bisa dilihat kecenderungan bentuk grafik dari jenis *rotameter* yang dikalibrasi tersebut. Untuk ini bisa ditampilkan juga beberapa kurva lain dalam rentang tekanan kerja dan seting aliran yang berbeda dalam satu tampilan grafik guna mendapatkan kurva kalibrasi yang lebih mengcover pemakaian sebenarnya. Selanjutnya penggunaannya adalah dari data-data spesifikasi *rotameter* yang dikalibrasi dan kondisi fluida yang digunakan (tekanan, suhu dan media yang dipakai) dapat ditentukan besarnya perbandingan besaran *reynolds number*, R_e dan *meter coefficient*, C_m . Selanjutnya dari grafik dapat diketahui besarnya *meter coefficient*, C_m yang sesuai. Sehingga dari persamaan (3.10) pada bab III bahasan terdahulu dapat diketahui besarnya volume aliran yang seharusnya ditunjukkan oleh *rotameter* tersebut.

4.5. IMPLEMANTASI PADA *TURBINE FLOWMETER*

Untuk penerapan pada proses kalibrasi *turbine flowmeter*, digunakan *flowmeter* sebagai referensi atau kalibrator adalah *orifice* sedangkan alat ukur *flowmeter* yang dikalibrasi jenis *turbine* yang mempunyai spesifikasi sebagai berikut :

Jenis alat : *Gas flowmeter*
 Merk : *EG & G Flow Technology*
 Model/type : *FT-6-8-NENAU / Turbine*
 Rentang ukur flow : *0,25 ~ 2,5 ACFM*
 Max Frekuensi : *2000 Hz*

Dilakukan pengambilan data dengan cara melakukan setting titik ukur pada meter ukur yang dikalibrasi yaitu sebanyak 10 titik ukur. Kemudian setelah kondisi aliran stabil dilakukan pengambilan semua data pengukuran yang diperlukan untuk *turbine flowmeter* maupun *orifice* secara bersamaan. Untuk lebih mendapatkan data yang representatif dilakukan pengulangan pengambilan data untuk titik ukur yang sama. Semua data-data yang diperoleh bisa dilihat pada sub.bab.4.5.2. Hasil Pengolahan Data Kalibrasi.

4.5.1. Perhitungan Pemakaian Tekanan Kerja

Dilakukan juga pengambilan data untuk pemakaian fluida gas kalibrasi yaitu udara (*air*) untuk kondisi pemakaian tekanan yang berbeda. Hasilnya mengetahui pengaruh pemakaian kondisi yang berbeda serta aplikasi dari pada pemakaian fluida yang berbeda, pada proses perhitungan dan analisa pada *flowmeter* jenis ini. Untuk kajian *turbine flowmeter* perhitungan pemakaian tekanan kerja, proses kalibrasi untuk media sama dengan tekanan kerja berbeda serta proses kalibrasi yang diterapkan untuk media kalibrasi yang berbeda, sama dengan proses kalibrasi pada *rotameter* pada sub.bab. 4.41. dan hasil perhitungan tekanan kalibrasi yang digunakan diberikan pada tabel 4.3.

Selanjutnya untuk kalibrasi media kerja yang berbeda akan dikondisikan tekanan kerja untuk *flowmeter* tersebut pada *5,5 bar absolute* (sekitar *4,5 bar*

gauge) dengan suhu 20°C dengan menggunakan media udara (*air*) agar mempunyai kondisi viskositas kinematik yang identik dengan gas *argon* sebagai media aktualnya.

4.5.2. Hasil Pengolahan Data Kalibrasi

Tabel 4.9. Hasil pengolahan data kalibrasi *turbine flow* kondisi tekanan rendah (*atmospheric*)

(*low*) $\nu = 1,4E-05 \text{ m}^2/\text{s}$ (14 Cst)

Penunjukan Alat	Densitas	Aliran Massa (<i>from orifice</i>)	Aliran Volume (<i>Actual</i>) at <i>P</i> ; <i>T</i> (<i>from orifice</i>)		<i>Dinamic Viscosity</i> , μ	<i>Kinematic Viscosity</i> , ν	Hz / ν	<i>K factor</i>
			<i>l/min</i>	<i>m</i> ³ / <i>hour</i>				
<i>Hz</i>	<i>kg/m</i> ³	<i>kg/sec</i>	<i>l/min</i>	<i>m</i> ³ / <i>hour</i>	<i>kg/m.s</i>	<i>m</i> ² / <i>s</i>		<i>pulsa / m</i> ³
50,1	1,198	0,00013	6,338	0,380	1,845E-05	1,540E-05	3,25E+06	473802,0
100,7	1,204	0,00018	9,030	0,542	1,845E-05	1,532E-05	6,57E+06	669010,7
150,2	1,215	0,00024	11,635	0,698	1,844E-05	1,518E-05	9,89E+06	774606,6
200,5	1,227	0,00030	14,467	0,868	1,844E-05	1,503E-05	1,33E+07	831496,2
250,3	1,242	0,00036	17,296	1,038	1,844E-05	1,485E-05	1,69E+07	868259,4
300,5	1,262	0,00043	20,440	1,226	1,844E-05	1,462E-05	2,06E+07	882139,1
350,5	1,286	0,00050	23,463	1,408	1,844E-05	1,434E-05	2,44E+07	896276,5
400,2	1,314	0,00058	26,540	1,592	1,844E-05	1,403E-05	2,85E+07	904767,4
450,2	1,352	0,00068	30,102	1,806	1,843E-05	1,363E-05	3,30E+07	897387,3
500,2	1,399	0,00078	33,286	1,997	1,843E-05	1,318E-05	3,80E+07	901657,0

Tabel 4.10. Hasil pengolahan data kalibrasi *turbineflow* kondisi tekanan sedang (*pressure 2,5 barg*)

(*medium*) $\nu = 4,4E-06 \text{ m}^2/\text{s}$ (4,4 Cst)

Penunjukan Alat	Densitas	Aliran Massa (<i>from orifice</i>)	Aliran Volume (<i>Actual</i>) at <i>P</i> ; <i>T</i> (<i>from orifice</i>)		<i>Dinamic Viscosity</i> , μ	<i>Kinematic Viscosity</i> , ν	Hz / ν	<i>K factor</i>
			<i>l/min</i>	<i>m</i> ³ / <i>hour</i>				
<i>Hz</i>	<i>kg/m</i> ³	<i>kg/sec</i>	<i>l/min</i>	<i>m</i> ³ / <i>hour</i>	<i>kg/m.s</i>	<i>m</i> ² / <i>s</i>		<i>pulsa / m</i> ³
50,0	4,156	0,00032	4,664	0,280	1,844E-05	4,436E-06	1,13E+07	643754,6
100,2	4,155	0,00052	7,474	0,448	1,844E-05	4,437E-06	2,26E+07	804479,5
150,0	4,148	0,00072	10,378	0,623	1,843E-05	4,443E-06	3,38E+07	867244,9
200,6	4,158	0,00093	13,466	0,808	1,842E-05	4,431E-06	4,53E+07	893600,1
250,5	4,150	0,00116	16,715	1,003	1,842E-05	4,439E-06	5,64E+07	899189,8
300,4	4,156	0,00138	19,856	1,191	1,842E-05	4,433E-06	6,78E+07	907652,1
350,4	4,149	0,00160	23,121	1,387	1,842E-05	4,440E-06	7,89E+07	909413,1
400,5	4,149	0,00182	26,361	1,582	1,842E-05	4,440E-06	9,02E+07	911470,5
450,5	4,151	0,00205	29,654	1,779	1,842E-05	4,438E-06	1,02E+08	911570,9
500,3	4,150	0,00228	33,014	1,981	1,842E-05	4,439E-06	1,13E+08	909261,2

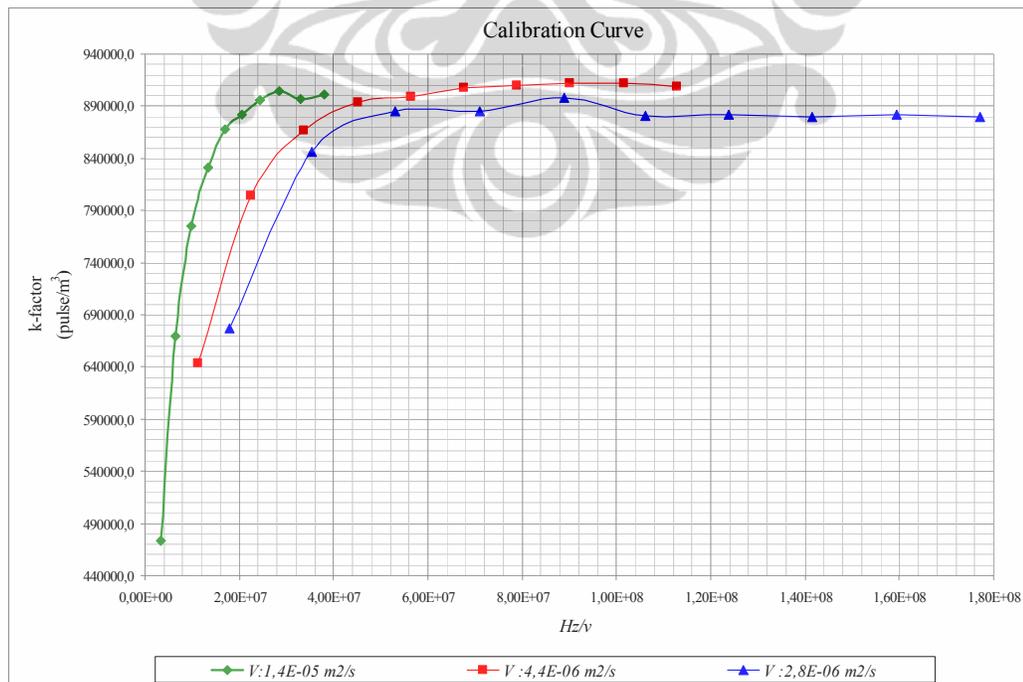
Tabel 4.11. Hasil pengolahan data kalibrasi *turbineflow* kondisi tekanan tinggi
(pressure 4,5 barg)

(high) $\nu = 2,8E-06 \text{ m}^2/\text{s}$ (2,8 Cst)

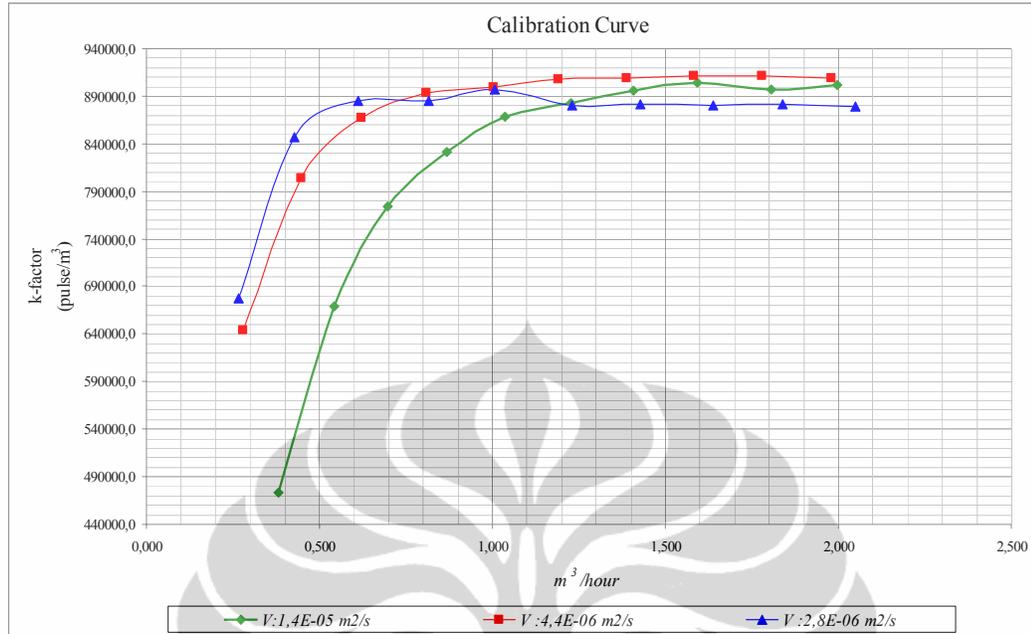
Penunjukan Alat	Densitas	Aliran Massa (from orifice)	Aliran Volume (Actual) at P ; T (from orifice)		Dinamic Viscosity, μ	Kinematic Viscosity, ν	Hz / ν	K factor
			l/min	m ³ /hour				
Hz	kg/m ³	kg/sec			kg/m.s	m ² /s		pulsa / m ³
50,4	6,515	0,00049	4,468	0,268	1,844E-05	2,830E-06	1,78E+07	677413,4
100,2	6,519	0,00077	7,103	0,426	1,844E-05	2,828E-06	3,54E+07	846777,0
150,5	6,512	0,00111	10,209	0,613	1,844E-05	2,831E-06	5,32E+07	884529,4
200,4	6,522	0,00148	13,594	0,816	1,843E-05	2,827E-06	7,09E+07	884647,2
250,9	6,523	0,00182	16,775	1,006	1,842E-05	2,824E-06	8,88E+07	897451,5
300,6	6,513	0,00222	20,489	1,229	1,844E-05	2,831E-06	1,06E+08	880277,4
350,1	6,522	0,00259	23,818	1,429	1,842E-05	2,825E-06	1,24E+08	881973,9
400,1	6,520	0,00296	27,275	1,637	1,842E-05	2,826E-06	1,42E+08	880147,5
450,2	6,521	0,00333	30,639	1,838	1,842E-05	2,825E-06	1,59E+08	881517,8
500,5	6,522	0,00371	34,136	2,048	1,842E-05	2,825E-06	1,77E+08	879696,0

4.5.3. Pembuatan *Universal Viscosity Curve*

Selanjutnya dari pengolahan data-data hasil kalibrasi *turbine flowmeter* diatas dibuat suatu grafik hubungan antara perbandingan antara frekuensi *output* per viskositas kinematiknya (Hz/ ν) dengan k-faktor dari perhitungan frekuensi dibagi aliran volume hasil kalibrasi (*pulsa/volume*)



Gambar 4.7. Kurva kalibrasi *turbine flowmeter* (*universal viscosity curve*)



Gambar 4.8. Kurva perbandingan beberapa kondisi kalibrasi pada *turbine flowmeter*

Dari kurva kalibrasi pada gambar 4.7. tersebut penggunaan hasil kalibrasi pada pemakaian sebenarnya *turbine flowmeter* yang dikalibrasi bisa diterapkan. Dengan melakukan pengukuran pada frekuensi pembacaan turbin pada saat pemakaian, dan kondisi media untuk menghitung viskositas kinematik akan diperoleh besaran perbandingannya (Hz/ν). Selanjutnya dari grafik hasil kalibrasi akan diperoleh nilai k -factor yang sesuai (sebaiknya kondisi pemakaian harus identik dengan kondisi kalibrasi alat ukur). Dari persamaan 4.6 pada bahasan sub.bab 4.3.1.sebelumnya, bisa dihitung nilai volume aliran yang seharusnya ditunjukkan oleh *turbine flowmeter* tersebut.

Dari kurva kalibrasi pada gambar 4.7 dan 4.8. dilihat adanya kecenderungan nilai k -factor yang semakin linear pada titik pengukuran yang semakin besar untuk ketiganya dan menuju kebentuk yang agak berimpit. Pemakaian grafik kalibrasi tersebut sebaiknya pada kondisi dimana nilai k -factor yang akan dicari pada kondisi linearnya untuk menghindari tingkat kesalahan yang lebih besar. Selain bisa dilihat adanya sedikit pergeseran pada nilai k -factor untuk ketiga kondisi tersebut juga terlihat adanya pergeseran nilai bilangan

reynold yang mana ditunjukkan sebagai fungsi dari (Hz/v) untuk ketiga jenis pengukuran tersebut, dimana untuk pengukuran yang menggunakan viskositas kinematik yang rendah (tekanan kerja tinggi) nilai (Hz/v) semakin bergeser kekanan dan rentangnya semakin lebar berarti bilangan *reynold* yang dihasilkan semakin besar untuk titik laju aliran yang sama.

4.6. PERBANDINGAN METODE PENGUKURAN PADA PERHITUNGAN ALIRAN

Perhitungan pada proses kalibrasi yang telah dibahas pada bab terdahulu pada dasarnya merupakan metode pengukuran secara langsung terhadap parameter-parameter yang dibutuhkan pada suatu proses pengukuran khususnya kalibrasi. Yang mana *flowmeter* yang dikalibrasi terpasang pada sistem kalibrasi dan secara langsung diberikan kondisi-kondisi media yang diperlukan sesuai kebutuhan. Untuk kalibrasi pada penggunaan media gas yang sama bentuk pengukuran pada kalibrasi disini adalah dilakukan pemberian media kerja yang sama dengan pengaturan parameter yang berpengaruh seperti tekanan dan temperatur kerja yang sesuai dengan pemakaian sebenarnya untuk *flowmeter* yang bersangkutan. Adapun pemberian parameter seperti kondisi tekanan kerja (suhu dianggap sama) dilakukan dengan pengaturan pada beberapa peralatan *regulator* dan katup yang terpasang pada sistem instalasi kalibrasi (Gb.3.1). Setelah tekanan tercapai dilakukan pengukuran untuk proses kalibrasi. Jadi dalam hal ini bisa dikatakan semua proses adalah murni pengukuran untuk menghitung aliran volume dari *flowmeter* gas yang dikalibrasi.

Untuk kalibrasi *flowmeter* gas dengan media yang lain dengan media kalibrasi dilakukan perhitungan terlebih dahulu terhadap tekanan dan suhu sebenarnya yang diterapkan untuk *flowmeter* tersebut guna mengetahui besaran viskositas kinematiknya. Dengan viskositas kinematik tersebut dilakukan perhitungan pada media untuk kalibrasi guna menghasilkan tekanan kerja (suhu telah ditetapkan) untuk mendapatkan nilai viskositas kinematik yang sama. Dari tekanan yang telah dihitung (persamaan 4.4) hasilnya diterapkan pada sistem kalibrasi dengan mengatur beberapa peralatan seperti yang disebutkan pada langkah kerja proses pengukuran untuk kalibrasi *flowmeter* (sub.bab 3.1.2).

Sehingga untuk kondisi yang ini bisa dikatakan gabungan dari proses perhitungan untuk mengetahui viskositas kinematikanya dan proses pengukuran untuk menghitung volume aliran yang ditunjukkan oleh *flowmeter* gas yang dikalibrasi.

Metode diatas akan dilakukan perbandingan dan analisa dengan proses perhitungan aliran volume pada suatu *flowmeter* gas dengan menggunakan pendekatan formula yang telah ada. Dengan menggunakan prinsip dasar formula persamaan gas dan persamaan energi (kontinuitas) yang telah dibahas pada Bab II. tentang Teori Dasar, selanjutnya dilakukan perhitungan volume aliran yang seharusnya ditunjukkan oleh *flowmeter* yang bersangkutan dengan metode perbandingan densitas (teoritis). Karena disini melibatkan perbandingan, sehingga untuk kondisi awal dibutuhkan data pengukuran untuk perhitungan aliran pada kondisi yang memungkinkan dilakukan atau yang lebih mudah dilakukan umumnya pada kondisi yang dekat dengan atmosfer karena tidak membutuhkan banyak regulator pengatur.

Sebagai perbandingan lain dalam rangka memastikan tingkat kesalahannya dilakukan juga pengukuran secara langsung terhadap fluida yang sama dengan kondisi pemakaian *flowmeter* gas yang sebenarnya yang mana dalam hal ini sebagai kajian untuk kondisi aktualnya adalah gas *argon*. Gas ini akan digunakan sebagai media kalibrasi yang selanjutnya hasil pengukurannya digunakan untuk perbandingan terhadap beberapa metode pendekatan yang telah dilakukan.

4.6.1. Analisa Dan Perbandingan Pada Rotameter

Dilakukan dua jenis pengambilan data pengukuran kalibrasi *rotameter* dengan media gas yang sama tetapi dengan kondisi yang berbeda yaitu dengan perbedaan tekanan kerja. Dari hasil kalibrasi yang telah dilakukan pada *rotameter* dihasilkan data-data pengukuran yang ditampilkan pada table 4.4. dan 4.5.

Dari tabel 4.4.pengukuran dilakukan pada kondisi seting tekanan yang rendah mendekati atmosfer (Q_l untuk kondisi P_1/T_1) dengan perhitungan *compressibility factor*, $Z = 0,9999$ (Perry's [16]), sedangkan pada tabel 4.5. pengukuran dilakukan pada setting tekanan yang lebih tinggi yaitu 2,5 bar g (Q_h untuk kondisi P_2/T_2) dengan perhitungan *compressibility factor*, $Z = 0,9993$ (Perry's [16]). Pengukuran secara langsung atau data dari eksperimen, Q_h

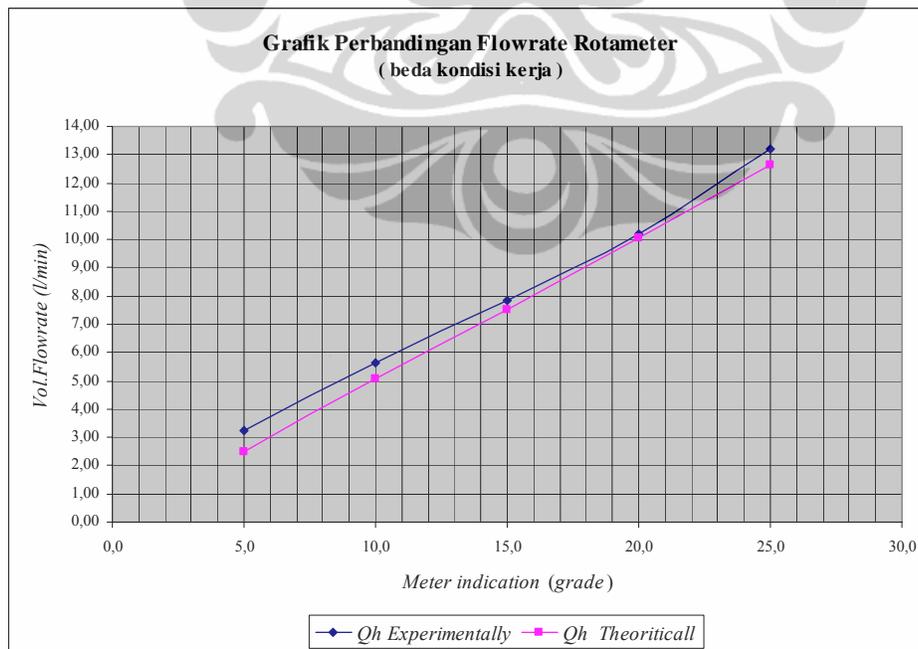
dibandingkan dengan perhitungan aliran melalui pendekatan teoritis dengan perbandingan kondisi media yang digunakan.

Tabel 4.12. Hasil perbandingan aliran, Q_h pengukuran dengan aliran hasil perbandingan, Q_h' (teoritis) untuk *rotameter*

$Q_h' = Q_l * ((P_1/P_2)(T_2/T_1)(Z_2/Z_1))^{1/2}$				
Penunjukan Alat	Q_l Tekanan rendah (<i>experimentally</i>)	Q_h Tekanan tinggi (<i>experimentally</i>)	Q_h' Tekanan tinggi (<i>theoretical</i>)	ΔQ_h $Q_{h(exp)} - Q_{h'(theo)}$
<i>grade</i>	<i>l/min</i>	<i>l/min</i>	<i>l/min</i>	% (Q_h)
5,0	4,652	3,226	2,497	22,6
10,0	9,369	5,619	5,066	9,9
15,0	13,780	7,864	7,515	4,4
20,0	18,212	10,192	10,060	1,3
25,0	22,488	13,208	12,650	4,2
(media udara, P: atmosfer)		(media udara, tekanan tinggi)	(tahap: media udara, tekanan tinggi)	Rata-rata : 8,5 Deviasi (\pm): 1,7

[STP pada 100.3 kPa ; 20°C]

Selanjutnya bila digambarkan dalam bentuk grafik perbandingan terlihat perbedaannya pada gambar 4.9.



Gambar 4.9. Kurva perbandingan aliran *rotameter* untuk metode pengukuran dan teoritis (beda kondisi kerja dengan media yang sama)

Dalam hal ini memang adanya perbedaan nilai atau pergeseran nilai dari perhitungan hasil pengukuran dengan perhitungan dengan pendekatan teoritis, yang mana kecenderungannya terjadi perbedaan yang stabil.

Untuk analisa perbandingan pada pemakaian fluida dan kondisi tekanan yang berbeda dilakukan pengambilan data pengukuran pada kondisi biasa atau umum dan pengambilan data kalibrasi pada pendekatan terhadap media yang beda. Dari sub.bab 4.4.1.dan 4.4.2. telah didapat pengolahan data hasil kalibrasi tersebut yang ditampilkan pada tabel 4.4. dan 4.6.

Dari tabel 4.4.pengukuran dilakukan pada kondisi seting tekanan yang rendah mendekati atmosfer ($Q_{a(akt)}$ untuk kondisi $P_1.M_{air}/T_1$) dengan menggunakan media kalibrasi udara serta perhitungan *compressibility factor*, $Z = 0,9999$ (Perry's [16]). Pada pembahasan perhitungan pemakaian tekanan kerja didapat :

Tabel 4.13. Hasil perhitungan pemakaian tekanan kerja untuk *rotameter*

<i>Flowmeter</i> untuk operasional :	argon		dikalibrasi dengan gas :	udara (<i>air</i>)
Pada pengaturan (<i>air</i>) P :	5,50	bar A	T ($^{\circ}C$) :	20
Menghasilkan kinematik viskositas sama ν :	2,7843E-06		m^2/s	
Pada gas operasi (argon) P :	4,38	bar A	T ($^{\circ}C$) :	20

Sehingga dilakukan kalibrasi dengan media udara sebagai pendekatan untuk gas *argon*. Hasil kalibrasi ditampilkan pada tabel 4.6. Pengukuran dilakukan pada setting tekanan yang 4,5 *bar g* ($Q_{b(akt)}$ untuk kondisi $P_2.M_{air}/T_2$) dengan perhitungan *compressibility factor*, $Z = 0,9987$ (Perry's [16]). Pengukuran secara langsung atau data dari eksperimen, $Q_{b(akt)}$ dibandingkan dengan perhitungan aliran melalulhi pendekatan teoritis dengan perbandingan kondisi media yang digunakan. Sebagai data pendukung diberikan massa molekul udara adalah 28,95 kg/kmol dan massa molekul gas argon (*Ar*) adalah 39,95 kg/kmol (ToolBox[15]).

Tabel 4.14. Hasil perbandingan aliran, $Q_{b(akt)}$ pengukuran dan aliran hasil perbandingan, $Q_{b(akt)}$ ' teoritis untuk *rotameter*.

[STP pada 100.3 kPa , 20°C] ; [Tekanan tinggi pada 3,38 Bar g , 20°C]

[X_a untuk udara; X_b untuk argon]

Penunjukan Alat	$Q_{a(akt)}$ udara → Tekanan atmosfer (<i>experimentally</i>)	$Q_{b(akt)}$ udara (pendekatan argon) Tekanan tinggi (<i>experimentally</i>)
<i>grade</i>	<i>l/min</i>	<i>l/min</i>
5,0	4,652	2,527
10,0	9,369	4,527
15,0	13,780	6,350
20,0	18,212	8,233
25,0	22,488	10,568
	(media udara, tekanan atmosfer)	(pendekatan media argon, tekanan tinggi)

$Q'_{a(akt)} = Q_{a(akt)} * ((P_{a(akt)}/P'_{a(akt)}) * (T'_{a(akt)}/T_{a(akt)}) * (Z'_{a(akt)}/Z_{a(akt)}))^{1/2}$
$Q'_{a(akt)}$ udara untuk tekanan tinggi (<i>theoretical</i>)
<i>l/min</i>
2,227
4,517
6,701
8,978
11,278
(tahap: media udara ,tekanan tinggi)

$Q'_{b(akt)} = Q'_{a(akt)} * ((P'_{a(akt)}/P_{b(akt)}) * (M_a/M_b) * (T_{b(akt)}/T'_{a(akt)}) * (Z_{b(akt)}/Z'_{a(akt)}))^{1/2}$
$Q'_{b(akt)}$ udara (pendekatan untuk argon) tekanan tinggi (<i>theoretical</i>)
<i>l/min</i>
1,894
3,843
5,701
7,637
9,594
(tahap: media udara sebagai pendekatan argon,tekanan tinggi)

Penunjukan Alat	Δ Aliran , Q_b ($Q_{b(akt)}(exp) - Q'_{b(akt)}(theory)$)	
<i>grade</i>	<i>l/min</i>	% ($Q_{b(akt)}$)
5,0	0,633	25,0
10,0	0,684	15,1
15,0	0,649	10,2
20,0	0,596	7,2
25,0	0,975	9,2
Rata-rata	0,707	13,4
Deviasi (±)	0,153	1,4

Adapun untuk kalibrasi langsung dengan media pemakaian *rotameter* tersebut yang mana dalam hal ini digunakan sebagai kajian adalah gas *argon* (*Ar*) dihasilkan hasil perhitungan data pengukuran sebagai berikut:

Tabel 4.15. Hasil pengolahan data kalibrasi *rotameter* dengan media gas *argon* (Tekanan 3,38 bar g)

Tek. Statik (P)	Suhu (T)	Densitas	Penunjukan Alat	Aliran Massa (from orifice)	Aliran Volume (Actual) at P : T (from orifice)	
					l/min	m ³ /sec
(Bar)	°C	kg/m ³	Grade	kg/sec		
3,381	23,6	7,110	5,0	0,00029	2,434	0,000041
3,383	23,6	7,113	10,0	0,00051	4,340	0,000072
3,383	23,6	7,113	15,0	0,00073	6,168	0,000103
3,383	23,6	7,113	20,0	0,00096	8,072	0,000135

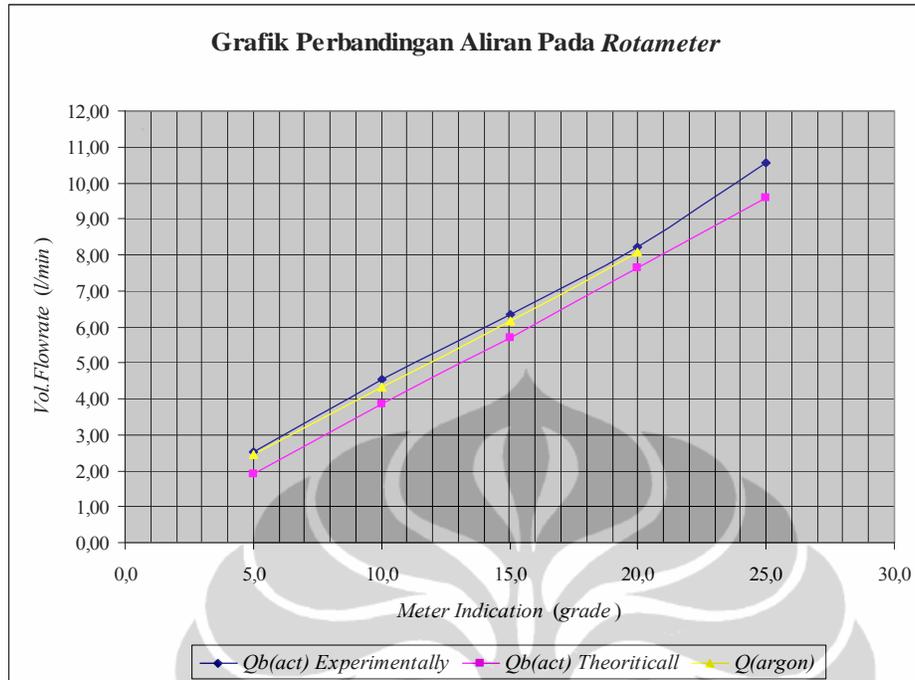
Pengukuran P & T pada sisi hilir meter ukur

Selanjutnya bisa diketahui hasil perbandingan kalibrasi *rotameter* dengan media gas *argon* pada tekanan kerja 3,38 barg (kondisi sebenarnya) dengan metode pendekatan yang telah dilakukan dengan media udara dengan tekanan kerja 4,5 barg, yang mana hasilnya bisa dilihat pada table 4.16 dan gambar 4.10. sebagai berikut :

Tabel 4.16. Perbandingan hasil kalibrasi *rotameter* dengan media *argon* dengan kondisi pendekatan media udara

Penunjukan alat <i>grade</i>	Δ Densitas, ρ ($\rho_{(air)} - \rho_{(argon)}$)		Δ Aliran, Q ($Q_{(air)} - Q_{(argon)}$)	
	kg/m ³	% ($\rho_{(air)}$)	l/min	% ($Q_{(air)}$)
5,0	-0,605	-9,3	0,094	3,7
10,0	-0,608	-9,4	0,187	4,1
15,0	-0,609	-9,4	0,182	2,9
20,0	-0,608	-9,3	0,162	2,0
Rata-rata	-0,608	-9,3	0,156	3,2
Deviasi (\pm)	0,002	0,03	0,043	0,5

Dari ketiga metode perhitungan untuk kalibrasi *rotameter* tersebut ditampilkan dalam suatu bentuk grafik perbandingan yang bisa dilihat pada gambar 4.10:



Gambar 4.10. Kurva perbandingan aliran *rotameter* untuk metode pengukuran, teoritis (beda media dan kondisi kerja) dan kondisi sebenarnya

Dari gambar 4.10 terlihat adanya perbedaan nilai atau pergeseran nilai dari perhitungan hasil pengukuran dengan perhitungan dengan pendekatan teoritis, maupun dengan pengukuran kondisi media sebenarnya. Tapi hasil pengukuran terlihat lebih mendekati dengan kondisi sebenarnya dibandingkan dengan perhitungan teoritis atau perbandingan. Atau dengan kata lain metode pengukuran yang telah dilakukan mempunyai tingkat kesalahan yang lebih kecil dibandingkan dengan pendekatan perbandingan teoritis.

4.6.2. Analisa Dan Perbandingan Pada *Turbine Flowmeter*

Sama dengan kalibrasi *rotameter* dilakukan juga dua jenis pengambilan data pengukuran kalibrasi *rotameter* dengan media gas yang sama tetapi dengan kondisi yang berbeda yaitu dengan perbedaan tekanan kerja. Dari hasil kalibrasi yang telah dilakukan pada *turbine flowmeter* dihasilkan data-data pengukuran yang ditampilkan pada tabel 4.9. dan 4.10.

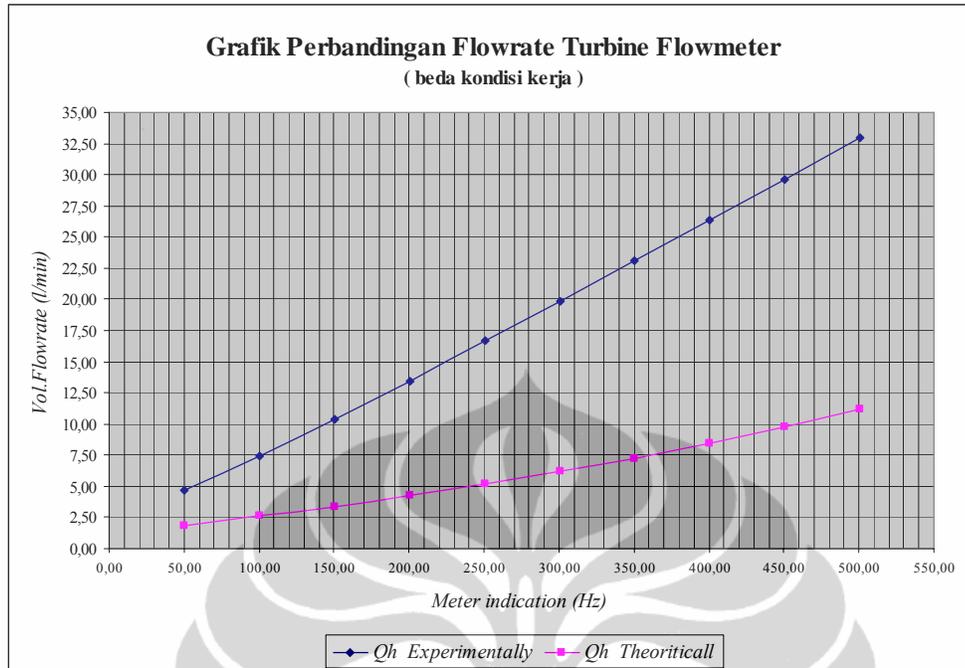
Dari tabel 4.9. pengukuran dilakukan pada kondisi seting tekanan yang rendah mendekati atmosfer (Q_l untuk kondisi P_1/T_1) dengan perhitungan *compressibility factor*, $Z = 0,9999$ (Perry's [16]), yang mana pada kondisi ini viskositas kinematik $\nu = 1,4E-05 \text{ m}^2/\text{s}$ (14 Cst). Sedangkan pada tabel 4.10. pengukuran dilakukan pada setting tekanan yang lebih tinggi yaitu 2,5 bar gauge (Q_h untuk kondisi P_2/T_2) dengan perhitungan *compressibility factor*, $Z = 0,9993$ (Perry's [16]) dan viskositas kinematik $\nu = 4,4E-06 \text{ m}^2/\text{s}$ (4,4 Cst). Pengukuran secara langsung atau data dari eksperimen, Q_h dibandingkan dengan perhitungan aliran melalui pendekatan teoritis dengan perbandingan kondisi media yang digunakan.

Tabel 4.17. Hasil perbandingan aliran, Q_h pengukuran dengan aliran hasil perbandingan, Q_h' (teoritis) untuk *turbine flowmeter*

$Q_h' = Q_l * ((P_1/P_2)(T_2/T_1)(Z_2/Z_1))^{1/2}$				
Penunjukan Alat	Q_l Tekanan rendah (<i>experimentally</i>)	Q_h Tekanan tinggi (<i>experimentally</i>)	Q_h' Tekanan tinggi (<i>theoretical</i>)	ΔQ_h $Q_{h(exp)} - Q_{h'(theo)}$
Hz	<i>l/min</i>	<i>l/min</i>	<i>l/min</i>	% (Q_h)
50,44	6,338	4,664	1,824	60,9
100,24	9,030	7,474	2,614	65,0
150,51	11,635	10,378	3,403	67,2
200,44	14,467	13,466	4,263	68,3
250,91	17,296	16,715	5,170	69,1
300,60	20,440	19,856	6,197	68,8
350,12	23,463	23,121	7,261	68,6
400,11	26,540	26,361	8,397	68,1
450,16	30,102	29,654	9,795	67,0
500,49	33,286	33,014	11,203	66,1
	(media udara, P: atmosfer)	(media udara, tekanan.tinggi)	(tahap: media udara,tekanan tinggi)	Rata-rata: 66,9 Deviasi \pm : 19,6

[STP pada 100.5 kPa ; 20°C]

Selanjutnya bila digambarkan dalam bentuk grafik perbandingan terlihat perbedaannya pada gambar 4.11.



Gambar 4.11. Kurva perbandingan *flowrate turbine* untuk metode pengukuran dan teoritis (beda kondisi kerja dengan media yang sama)

Dalam hal ini memang adanya perbedaan nilai atau pergeseran nilai dari perhitungan hasil pengukuran dengan perhitungan dengan pendekatan teoritis, namun dalam hal ini terlihat agak berbeda yang mana terjadi selisih yang cukup besar dan mempunyai kecenderungan selisih yang tidak stabil.

Untuk analisa perbandingan pada pemakaian fluida dan kondisi tekanan yang berbeda dilakukan pengambilan data pengukuran pada kondisi biasa atau umum dan pengambilan data kalibrasi pada pendekatan terhadap media yang beda. Dari sub.bab 4.5.1. dan 4.5.2. telah didapat pengolahan data hasil kalibrasi tersebut yang ditampilkan pada tabel 4.9. dan 4.11.

Dari tabel 4.9. pengukuran dilakukan pada kondisi seting tekanan yang rendah mendekati atmosfer ($Q_{a(act)}$ untuk kondisi $P_1 \cdot M_{air} / T_1$) dengan menggunakan media kalibrasi udara serta perhitungan *compressibility factor*, $Z = 0,9999$ (Perry's [16]) dengan viskositas kinematik $\nu = 1,4E-05 \text{ m}^2/\text{s}$ (14 Cst). Pada pembahasan perhitungan pemakaian tekanan kerja didapatkan :

Tabel 4.18. Hasil perhitungan pemakaian tekanan kerja pada *turbine flowmeter*

Flowmeter untuk operasional :	argon		dikalibrasi dengan gas :	udara (air)
Pada pengaturan (<i>air</i>) P :	5,50	bar A	T ($^{\circ}C$) :	20
Menghasilkan kinematik viskositas sama ν :	2,7843E-06		m^2/s	
Pada gas operasi (<i>argon</i>) P :	4,38	bar A	T ($^{\circ}C$) :	20

Sehingga dilakukan kalibrasi dengan media udara sebagai pendekatan untuk gas *argon*. Hasil kalibrasi ditampilkan pada tabel 4.11. Pengukuran dilakukan pada setting tekanan yang 4,5 bar g ($Q_{b(akt)}$) untuk kondisi $P_2.M_{air}/T_2$ dengan perhitungan *compressibility factor*, $Z = 0,9987$ (Perry's [16]) dengan viskositas kinematik $\nu = 2,8E-06 m^2/s$ (2,8 Cst). Pengukuran secara langsung atau data dari eksperimen, $Q_{b(akt)}$ dibandingkan dengan perhitungan aliran melalui pendekatan teoritis dengan perbandingan kondisi media yang digunakan. Sebagai data pendukung diberikan massa molekul udara adalah 28,95 kg/kmol dan massa molekul gas argon (*Ar*) adalah 39,95 kg/kmol (ToolBox[15]).

Tabel 4.19. Hasil perbandingan aliran, $Q_{b(akt)}$ pengukuran dan aliran hasil perbandingan, $Q_{b(akt)}$ teoritis untuk *turbine flowmeter*.

[STP pada 100.5 kPa , 20 $^{\circ}C$] ; [Tekanan tinggi pada 3,38 Bar g , 20 $^{\circ}C$]

[X_a untuk udara; X_b untuk *argon*]

Penunjukan Alat	$Q_{a(akt)}$ udara \rightarrow Tekanan atmosfer (<i>experimentally</i>)	$Q_{b(akt)}$ udara (pendekatan <i>argon</i>) Tekanan tinggi (<i>experimentally</i>)
Hz	l/min	l/min
50,44	6,338	4,468
100,24	9,030	7,103
150,51	11,635	10,209
200,44	14,467	13,594
250,91	17,296	16,775
300,60	20,440	20,489
350,12	23,463	23,818
400,11	26,540	27,275
450,16	30,102	30,639
500,49	33,286	34,136
	(media udara, tekanan atmosfer)	(pendekatan media <i>argon</i> , tekanan tinggi)

$$Q'_{a(akt)} = Q_{a(akt)} * ((P_{a(akt)}/P'_{a(akt)}) * (T'_{a(akt)}/T_{a(akt)}) * (Z'_{a(akt)}/Z_{a(akt)}))$$

$Q'_{a(akt)}$ udara untuk tekanan tinggi (<i>theoritically</i>)
l/min
1,455
2,084
2,708
3,401
4,116
4,941
5,780
6,684
7,801
8,921
(tahap: media udara ,tekanan tinggi)

$$Q'_b(akt) = Q'_{a(akt)} * ((P'_{a(akt)}/P_{b(akt)}) * (M_a/M_b) * (T_{b(akt)}/T'_{a(akt)}) * (Z_{b(akt)}/Z'_{a(akt)}))$$

$Q'_b(akt)$ udara (pendekatan untuk argon) tekanan tinggi (<i>theoritically</i>)
l/min
1,053
1,508
1,960
2,461
2,979
3,576
4,183
4,837
5,646
6,456
(tahap: media udara sebagai pendekatan argon,tekanan tinggi)

Penunjukan Alat	Δ Aliran , Q_b ($Q_{b(akt)}(exp) - Q'_b(akt)(theory)$)	
Hz	l/min	% ($Q_{b(akt)}$)
50,44	3,415	76,4
100,24	5,594	78,8
150,51	8,250	80,8
200,44	11,133	81,9
250,91	13,796	82,2
300,60	16,913	82,5
350,12	19,635	82,4
400,11	22,438	82,3
450,16	24,994	81,6
500,49	27,679	81,1
Rata-rata	15,385	81,0
Deviasi (\pm)	8,329	24,4

Adapun untuk kalibrasi langsung dengan media pemakaian *turbine flowmeter* tersebut yang mana dalam hal ini digunakan sebagai kajian adalah gas *argon* (*Ar*) dihasilkan hasil perhitungan data pengukuran sebagai berikut:

Tabel 4.20. Hasil pengolahan data kalibrasi *turbine flow* dengan media gas *argon* (Tekanan 3,38 bar g)

Tek. Statik (P)	Suhu (T)	Densitas	Penunjukan Alat	Aliran Massa (from orifice)	Aliran Volume (Actual) at P : T (from orifice)	
					(Bar)	$^{\circ}C$
3,3809	24,1	7,098	100,19	0,00085	7,199	0,432
3,3806	24,1	7,098	200,22	0,00161	13,568	0,814
3,3804	24,2	7,095	300,15	0,00243	20,532	1,232
3,3807	24,2	7,095	400,26	0,00327	27,679	1,661

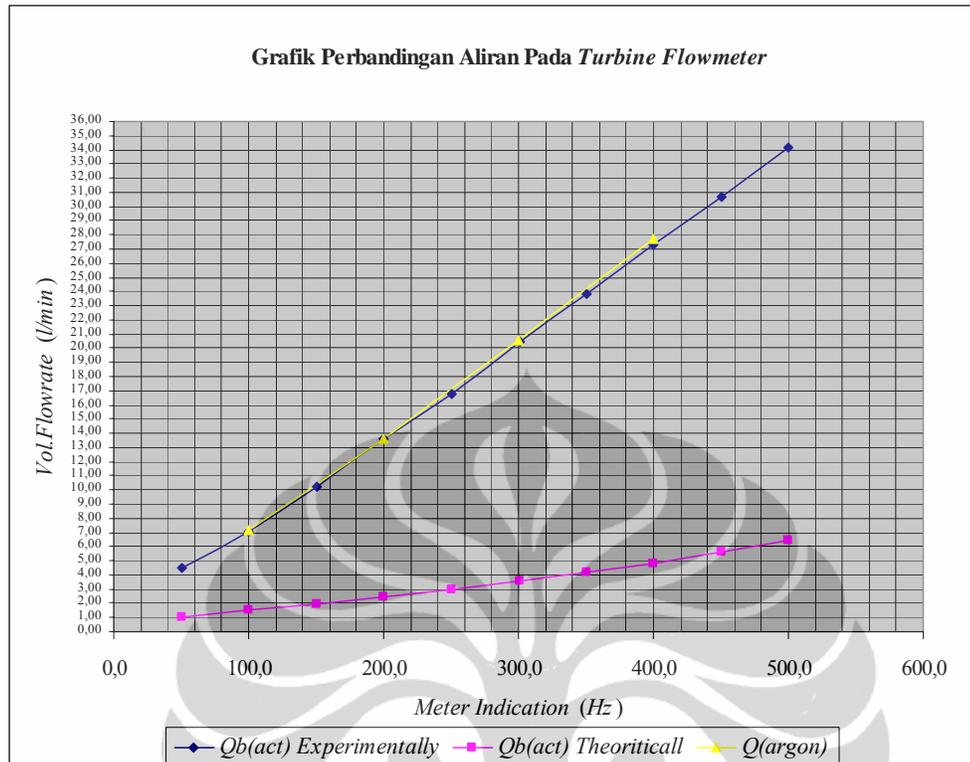
Pengukuran P & T pada sisi hilir meter ukur

Selanjutnya bisa diketahui hasil perbandingan kalibrasi *turbine flowmeter* dengan media gas *argon* pada tekanan kerja 3,38 barg (kondisi sebenarnya) dengan metode pendekatan yang telah dilakukan dengan media udara dengan tekanan kerja 4,5 barg, yang mana hasilnya bisa dilihat pada table 4.21. dan gambar 4.12. sebagai berikut :

Tabel 4.21. Perbandingan hasil kalibrasi *turbine flowmeter* media *argon* dengan kondisi pendekatan media udara

Nominal Penunjukan alat	Δ Densitas, ρ ($\rho_{(air)} - \rho_{(argon)}$)		Δ Aliran, Q ($Q_{(air)} - Q_{(argon)}$)	
	Hz	kg/m^3	% ($\rho_{(air)}$)	l/min
100,0	-0,579	-8,9	-0,097	-1,4
200,0	-0,576	-8,8	0,026	0,2
300,0	-0,582	-8,9	-0,043	-0,2
400,0	-0,575	-8,8	-0,404	-1,5
Rata-rata	-0,578	-8,9	-0,129	-0,7
Deviasi (\pm)	0,003	0,05	0,190	0,7

Dari ketiga metode perhitungan untuk kalibrasi *turbine flowmeter* tersebut ditampilkan dalam suatu bentuk grafik perbandingan yang bisa dilihat pada gambar 4.12:



Gambar 4.12. Kurva perbandingan aliran *turbine flow* untuk metode pengukuran, teoritis (beda media dan kondisi kerja) dan kondisi sebenarnya

Dari gambar 4.12 terlihat adanya perbedaan nilai atau pergeseran nilai dari perhitungan hasil pengukuran dengan perhitungan dengan pendekatan teoritis, maupun dengan pengukuran kondisi media sebenarnya. Tapi hasil pengukuran terlihat lebih mendekati dengan kondisi sebenarnya dibandingkan dengan perhitungan teoritis atau perbandingan. Atau dengan kata lain metode pengukuran yang telah dilakukan mempunyai tingkat kesalahan jauh lebih kecil dibandingkan dengan pendekatan perbandingan teoritis. Dalam hal ini perhitungan dengan perbandingan teoritis mempunyai perbedaan hasil yang cukup jauh dengan yang lainnya dan bahkan mempunyai kecenderungan yang tidak linear atau tidak stabil tingkat perbedaannya. Sehingga untuk pengukuran dengan *flowmeter* jenis turbin metode perbandingan tersebut kurang tepat diterapkan.

BAB V PENUTUP

5.1. KESIMPULAN

1. Karena pengaruh kondisi pemakaian kerja dan fluida yang berbeda kalibrasi *flowmeter* gas dilakukan dengan melakukan pendekatan terhadap *viskositas kinematik* (ν) yang terjadi pada media kalibrasinya, untuk memperoleh tekanan kerjanya. Dengan suhu yang ditetapkan, tekanan yang diaplikasikan pada proses kalibrasi tersebut yaitu :
$$p = \frac{\mu.R'.T}{\nu}$$
2. Kalibrasi *flowmeter* gas sebaiknya mudah diterapkan dan mampu mengcover rentang pemakaian yang cukup lebar untuk kondisi pemakaian dilapangan, sehingga dapat dilakukan dengan membuat kurva atau grafik kalibrasi yang sifatnya umum (*universal calibration curve*), yaitu yang dibangun dari :
 - A. *floating flowmeter* (*rotameter*), kurva dibangun dari penunjukan aliran aktual, Q (l/min) sebagai fungsi penunjukan meter ukur (*grade*) untuk beberapa kondisi pemakaian tekanan atau dibuat grafik *meter coefficient* (C_m) sebagai fungsi dari **bilangan reynold** dibagi *meter coefficient* $\left(\frac{R_e}{C_m}\right)$
 - B. *turbine flowmeter*, kurva dibangun dari ***k-factor*** (pulsa/unit volume) sebagai fungsi dari penunjukan frekuensi meter ukur dibagi viskositas kinematik $\left(\frac{H_z}{\nu}\right)$. Seri kurva ini bisa dibuat dalam berbagai kondisi viskositas kinematikya.
3. Hasil perbandingan dari beberapa mekanisme pengukuran dan perhitungan dihasilkan :

- Kalibrasi *rotameter* dengan penyesuaian tekanan kerja kalibrasi dengan tekanan kerja pemakaian dibanding dengan metode perbandingan densitas, menghasilkan nilai aliran dengan tingkat perbedaan rata-rata yang cukup kecil yaitu **8,5 % (Q_h)** dan cukup stabil yaitu dengan nilai sebaran selisihnya $\pm 1,7 % (Q_h)$ jika di bandingkan dengan penunjukan aliran untuk *turbine flowmeter*.
- Pengujian pada kalibrasi *rotameter* dengan media berbeda dihasilkan:

Tabel 5.1. Perbandingan aliran *rotameter* pada 3 metode pengujian

Penunjukan Meter Ukur	Q_1 : Media udara ; Tekanan 4,5 barg	Q_2 : Teoritis (perbandingan ρ)	$\Delta_1 (Q_1 - Q_2)$	Q_3 : Media argon ; Tekanan 3,38 barg	$\Delta_2 (Q_1 - Q_3)$
Grade	<i>l/min</i>	<i>l/min</i>	% (Q_1)	<i>l/min</i>	% (Q_1)
5,0	2,527	1,894	25,0	2,434	3,7
10,0	4,527	3,843	15,1	4,340	4,1
15,0	6,350	5,701	10,2	6,168	2,9
20,0	8,233	7,637	7,2	8,072	2,0
25,0	10,568	9,594	9,2		

Suhu ditetapkan $\pm 20^\circ\text{C}$

- Kalibrasi *turbine flowmeter* dengan penyesuaian tekanan kerja kalibrasi dengan tekanan kerja pemakaian dibanding dengan metode perbandingan densitas, menghasilkan nilai aliran dengan tingkat perbedaan rata-rata yang cukup besar yaitu **66,9 % (Q_h)** dan kurang stabil yaitu dengan nilai sebaran selisihnya $\pm 19,6 % (Q_h)$ jika di bandingkan dengan penunjukan aliran untuk *rotameter*.
- Pengujian pada kalibrasi *turbine flow* dengan media berbeda dihasilkan:

Tabel 5.2. Perbandingan aliran *turbine flowmeter* pada 3 metode pengujian

Penunjukan Meter Ukur	Q_1 : Media udara ; Tekanan 4,5 barg	Q_2 : Teoritis (perbandingan ρ)	$\Delta_1 (Q_1 - Q_2)$	Q_3 : Media argon ; Tekanan 3,38 barg	$\Delta_2 (Q_1 - Q_3)$
Hz	<i>l/min</i>	<i>l/min</i>	% (Q_1)	<i>l/min</i>	% (Q_1)
50,44	4,468	1,053	76,4		
100,24	7,103	1,508	78,8	7,199	-1,4
150,51	10,209	1,960	80,8		
200,44	13,594	2,461	81,9	13,568	0,2
250,91	16,775	2,979	82,2		
300,60	20,489	3,576	82,5	20,532	-0,2
350,12	23,818	4,183	82,4		
400,11	27,275	4,837	82,3	27,679	-1,5
450,16	30,639	5,646	81,6		
500,49	34,136	6,456	81,1		

Suhu ditetapkan $\pm 20^\circ\text{C}$

4. Dari analisa hasil perbandingan untuk kedua jenis *flowmeter* gas pada berbagai metode pengukuran didapatkan :

a. Rotameter

- Pengaruh viskositas kinematik fluida yang diterapkan sangat berpengaruh dalam menentukan besarnya aliran yang dihasilkan oleh meter ukur tersebut. Dari 2 hasil pengukuran pada perbedaan tekanan $\pm 5 \text{ bar g}$, rata-rata perbedaan densitas, ρ yang dihasilkan $5,737 \text{ Kg/m}^3$ dan rata-rata perbedaan aliran volume, Q $-8,757 \text{ l/min}$ atau $-54,5 \%$ (Q_{atm}).
- Kalibrasi dengan menerapkan pendekatan viskositas kinematik pada media kalibrasi ada sedikit perbedaan jika dibandingkan dengan pengujian dengan media sebenarnya yaitu menghasilkan nilai rata-rata dari perbedaan aliran, Q $0,156 \text{ l/min}$ atau $3,2 \%$ dari ($Q_{(air)}$) dan mempunyai sebaran nilai selisih yg cukup stabil dengan deviasi $\pm 0,043 \text{ l/min}$ atau $\pm 0,5 \%$ dari ($Q_{(air)}$).
- Perhitungan aliran dengan metode pendekatan perbandingan kondisi densitas media, (teoritis) memungkinkan diterapkan pada *flowmeter* jenis ini, hal ini bisa dilihat pada stabilitas nilai selisih yang diberikan dibandingkan dengan metode pendekatan viskositas kinematik hasil pengukuran yang cukup bagus yaitu dengan deviasi $\pm 0,153 \text{ l/min}$ atau $\pm 1,4 \%$ dari ($Q_{b(air)}$) dan mempunyai nilai rata-rata selisih yang cukup kecil yaitu $0,707 \text{ l/min}$ atau $13,4 \%$ dari ($Q_{b(air)}$).

b. Turbine flowmeter

- Pengaruh viskositas kinematik fluida yang diterapkan tidak banyak berpengaruh dalam menentukan besarnya aliran yang dihasilkan oleh meter ukur tersebut jika dibandingkan jenis *rotameter*. Dari 2 hasil pengukuran pada perbedaan tekanan $\pm 5 \text{ bar g}$, rata-rata perbedaan densitas, ρ yang dihasilkan $4,485 \text{ Kg/m}^3$ dan rata-rata perbedaan aliran volume, Q $-0,157 \text{ l/min}$ atau $-7,8 \%$ (Q_{atm}).
- Kalibrasi dengan menerapkan pendekatan viskositas kinematik pada media kalibrasi menghasilkan nilai aliran yang lebih mendekati pengujian dengan media sebenarnya jika dibandingkan jenis *rotameter* yaitu menghasilkan nilai rata-rata dari perbedaan aliran, Q $-0,129 \text{ l/min}$ atau $-0,7 \%$ dari ($Q_{(air)}$) dan

mempunyai sebaran nilai selisih yang cukup stabil juga dengan deviasi $\pm 0,190 \text{ l/min}$ atau $\pm 0,7 \%$ dari ($Q_{(air)}$).

- Perhitungan aliran dengan metode pendekatan perbandingan kondisi densitas media, (teoritis) tidak memungkinkan diterapkan pada *flowmeter* jenis ini, hal ini bisa dilihat pada stabilitas nilai selisih yang diberikan dibandingkan dengan metode pendekatan viskositas kinematik hasil pengukuran yang kurang bagus yaitu dengan deviasi $\pm 8,329 \text{ l/min}$ atau $\pm 24,4 \%$ dari ($Q_{b(air)}$) dan mempunyai nilai rata-rata selisih yang cukup besar yaitu $15,385 \text{ l/min}$ atau $81,0 \%$ dari ($Q_{b(air)}$).

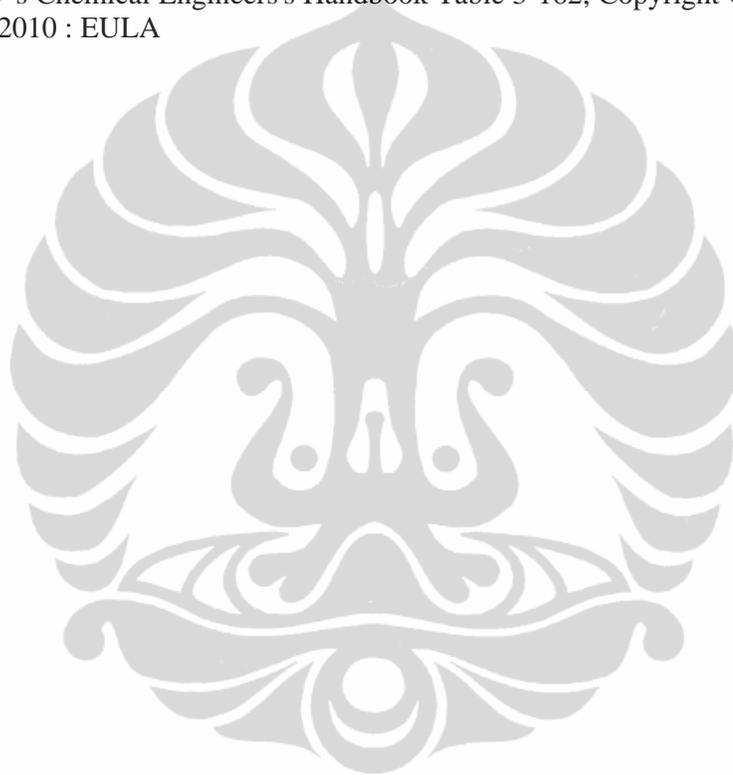
5.2. SARAN

1. Diperlukan kajian dan pelaksanaan kalibrasi dengan sistem instalasi yang lebih memadai untuk pemberian tekanan kerja dan gaya yang lebih tinggi serta lebih stabil sehingga mampu memberikan data-data ukur yang lebih banyak dan mempunyai rentang yang lebih lebar. Sehingga lebih terlihat tingkat perbedaan yang terjadi dan pada hasil kalibrasinya mampu mengcover rentang yang lebih lebar. Selanjutnya dibuatnya suatu panduan (SNI) terkait pengujian dan pemakaian alat ukur yang bersangkutan.
2. Studi kasus pada kajian ini sebaiknya diberikan untuk berbagai macam tipe *flowmeter* yang lebih banyak sehingga lebih terlihat jelas pengaruhnya terhadap kebenaran pengukuran aliran pada berbagai tipe *flowmeter* gas yang ada dipasaran
3. Penentuan parameter-parameter yang diperlukan seperti kepastian prosentase kandungan gas yang digunakan untuk mengetahui masa molekul, penggunaan tabel/grafik, pemakaian asumsi harus lebih dipastikan tingkat kebenarannya agar dihasilkan perhitungan akhir yang lebih akurat.
4. Hasil kalibrasi alat ukur seperti kurva kalibrasi sebaiknya digunakan semestinya oleh pemakai (*user*) mengingat perlunya memanfaatkan faktor koreksi dalam penggunaan alat ukur tersebut dalam mengeliminir tingkat kesalahan.

DAFTAR REFERENSI

- [1] KAN-DPLP-13, *Pedoman Ketidakpastian Pengukuran*, Rev-0-16 Desember 2005
- [2] Aerodynamics of bicycles introduction
http://www.efluids.com/efluids/bicycle/bicycle_pages/blunt.htm
- [3] Wikimedia Foundation, Inc., *Orifice Plate.html* , January 2010 & *Newtonian Fluid.html*, Maret 2009
- [4] Cussons Technology, LTMP Indonesia -*Air Flow Calibrtrion Rig*, 602 man2.doc, Juni 1999
- [5] BS 1042 : Section.1.1, 1992 ; ISO 5167-1:1991 : *Specification for square-edge Orifice plate, nozzle and venture tube inserted in circular cross-section conduits Running fall.*
- [6] APTI 435– Atmospheric Sampling Course : *Theory and Calibration Procedures for the Use of a Rotameter* ; Appendix F
- [7] Wellin D John, 2009, *Thermal Fluids Laboratory I*, EMEM 416
- [8] Instrumentation Guide , Mumbai-India,–Technical Buletin 2003 : *The Basic of Rotameters.*
- [9] Cole – Parmer Technical Library - Variable Area Flowmeters Technical Info. : *Rotameter.*
- [10] Stoltenkamp P Wilhelmina , Eindhoven ; Technische Universiteit Eindhoven, 2007 : *Dynamics of turbine flow meters* , Proefschrift ISBN 978 – 90 – 386 - 2192-0.
- [11] Cox Instrument Flow Measurement: *82 Series Turbine Flowmeter Installation and Maintenance Manual* , Bulletin: 82-TM Manual
- [12] Flow Technology, FTI Flow Technology Inc-99532 2001: *The Flow Resource*, BR3000.

- [13] Flowmeter Directory, 2002, Sponsler Co.,Inc. *Turbine flowmeter for liquid Measurement* , Submmited articles ARTC02011701
- [14] Trigas A, TrigasFI GmbH, Dec.2008, Practical Aspects of Turbine Flow Meters, *Calibration and UVC principles* Schusterweg 1 D-85375 Neufahrn-Germany
- [15] The Engineering ToolBox Home, WWW.EngineeringToolBox.com, *Chemical,Physical and Thermal Properies of Gases*.
- [16] Perry's Chemical Engineers's Handbook Table 3-162, Copyright © Pipeng Ltd 2010 : EULA



LAMPIRAN 8. Proses perhitungan aliran dengan menggunakan prinsip dasar beda tekanan (orifice)

Lembar Perhitungan Untuk Aliran Orifice

Viscosity =	$0.00001827 * ((291,15+120)/(273+B6+120)) * ((273+B6)/291,15)^{1,5}$
Orifice Air density =	$((D6*9.807+C6*100)*28,95)/(1*8314*(273+B6))$
Expansibility Factor =	$1-(0.41+0.35*(D12^4))*('Test Data'!D11*9.807)/(1.4*('Test Data'!A11*100+'Test Data'!B11*9.807))$
Invariant A =	$C9*D11^2*SQRT(2*'Test Data'!C12*9.807*A9)/(#REF!*D10*SQRT(1-D12^4))$
Mass flow 1st est =	$B10*D12*D14*F10*PI()/4$
Reynolds Number =	$D16*F11$
Discharge Coefficient =	$0.5959+0.0312*D15^{2.1}-0.184*D15^8+0.0029*D15^{2.5}*((10^6/C10)^{0.75})$ $0.039*D15^4/(1-D15^4)-0.01551*D15^3$

Tube number =	1 (2,25")
Orifice number =	14
Diameter ratio, Betta =	0,121719682
Discharge coefficient (inf) =	0,6

Pipe diameter (m) =	0,0503
Orifice Diameter (m) =	0,0061225

Ref	Viscosity Pa s	Orifice Air Density kg/m ³	Orifice Differential Pressure mm H2O	Expansibility Factor	Invariant	Mass Flow 1st Estimate kg/s	Reynolds Number 2nd est	Discharge Coefficient 2nd est
1	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
2	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
3	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
4	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
5	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!

Ref	Mass Flow 2nd estimate	Reynolds Number 2nd est	Discharge Coefficient 3rd est	Mass Flow 3rd estimate	Reynolds Number 4th est	Discharge Coefficient 4th est	Mass Flow 4th estimate	Mass flow residual error %
1	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
2	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
3	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
4	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!
5	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!

LAMPIRAN 1. Data hasil kalibrasi rotameter pada tekanan atmosfer

No	TEST DATA ORIFICE						DATA TEST ALAT FLOWMETER			
	Downstream Temperature	Atmospheric Pressure	Orifice Static Pressure	Orifice Air Density	Orifice Differential Pressure	Orifice Air Mass Flow	Meter Temperature	Meter Static Pressure	Meter Air Density	Meter Indicator
	deg C	m Bar	mm H2O	kg/m ³	mm H2O	kg/sec	deg C	mm H2O	kg/m ³	grade
1	22,5	1005	1,16	1,184595	1,15	0,000093	22,5	106,05	1,196718	5,00
2	22,5	1005	1,16	1,184595	1,15	0,000093	22,5	106,05	1,196718	5,00
3	22,5	1005	1,16	1,184595	1,15	0,000093	22,5	106,05	1,196718	5,00
4	22,5	1005	1,16	1,184595	1,15	0,000093	22,5	106,05	1,196718	5,00
5	22,5	1005	1,16	1,184595	1,15	0,000093	22,5	106,05	1,196718	5,00
1	22,5	1005	4,96	1,185034	4,96	0,000191	22,4	254,93	1,214336	10,00
2	22,5	1005	4,96	1,185034	4,96	0,000191	22,4	254,93	1,214336	10,00
3	22,5	1005	4,86	1,185022	4,86	0,000189	22,4	254,93	1,214336	10,00
4	22,5	1005	4,86	1,185022	4,86	0,000189	22,4	246,77	1,213393	10,00
5	22,5	1005	4,86	1,185022	4,86	0,000189	22,4	246,77	1,213393	10,00
1	22,3	1005	10,86	1,186519	10,96	0,000283	22,2	422,16	1,234508	15,00
2	22,3	1005	10,86	1,186519	10,96	0,000283	22,2	422,16	1,234508	15,00
3	22,3	1005	10,96	1,186531	11,06	0,000284	22,2	422,16	1,234508	15,00
4	22,2	1005	10,96	1,186933	11,06	0,000284	22,2	426,23	1,234980	15,00
5	22,2	1005	10,96	1,186933	11,06	0,000284	22,2	426,23	1,234980	15,00
1	22,3	1005	20,37	1,187618	20,54	0,000387	22,2	721,95	1,269194	20,00
2	22,3	1005	20,17	1,187595	20,44	0,000386	22,2	721,95	1,269194	20,00
3	22,2	1005	20,17	1,187998	20,44	0,000386	22,2	719,91	1,268958	20,00
4	22,2	1005	20,17	1,187998	20,24	0,000384	22,2	719,91	1,268958	20,00
5	22,2	1005	20,07	1,187986	20,24	0,000384	22,2	707,67	1,267542	20,00
1	22,2	1005	33,06	1,189490	33,30	0,000492	22,2	1099,24	1,312846	25,00
2	22,2	1005	33,06	1,189490	33,30	0,000492	22,2	1099,24	1,312846	25,00
3	22,2	1005	32,96	1,189478	33,30	0,000492	22,2	1099,24	1,312846	25,00
4	22,2	1005	32,96	1,189478	33,30	0,000492	22,2	1099,24	1,312846	25,00
5	22,2	1005	32,96	1,189478	33,50	0,000493	22,2	1105,35	1,313554	25,00

LAMPIRAN 2. Data hasil kalibrasi rotameter pada tekanan 2,5 barg

No	TEST DATA ORIFICE						DATA TEST ALAT FLOWMETER			
	Downstream Temperature	Atmospheric Pressure	Orifice Static Pressure	Orifice Air Density	Orifice Differential Pressure	Orifice Air Mass Flow	Meter Temperature	Meter Static Pressure	Meter Air Density	Meter Indicator
	deg C	m Bar	mm H2O	kg/m ³	mm H2O	kg/sec	deg C	mm H2O	kg/m ³	grade
1	21,9	1005	6,79	1,187658	6,77	0,000223	21,9	25548,58	4,145840	5,00
2	21,9	1005	6,79	1,187658	6,77	0,000223	21,9	25548,58	4,145840	5,00
3	21,9	1005	6,79	1,187658	6,77	0,000223	21,9	25523,09	4,142887	5,00
4	21,9	1005	6,79	1,187658	6,77	0,000223	21,9	25517,99	4,142297	5,00
5	21,9	1005	6,79	1,187658	6,77	0,000223	21,9	25517,99	4,142297	5,00
1	21,9	1005	20,30	1,189222	20,78	0,000389	21,9	25553,68	4,146430	10,00
2	21,9	1005	20,30	1,189222	20,78	0,000389	21,9	25553,68	4,146430	10,00
3	21,9	1005	20,30	1,189222	20,78	0,000389	21,9	25528,19	4,143478	10,00
4	21,9	1005	20,30	1,189222	20,78	0,000389	21,9	25507,80	4,141116	10,00
5	21,9	1005	19,80	1,189165	20,28	0,000384	21,9	25507,80	4,141116	10,00
1	21,9	1005	40,32	1,191540	40,78	0,000544	21,9	25517,99	4,142297	15,00
2	21,9	1005	40,32	1,191540	40,78	0,000544	21,9	25517,99	4,142297	15,00
3	21,9	1005	40,32	1,191540	40,78	0,000544	21,9	25533,29	4,144068	15,00
4	21,9	1005	39,82	1,191482	40,28	0,000541	21,9	25528,19	4,143478	15,00
5	21,9	1005	39,82	1,191482	40,28	0,000541	21,9	25528,19	4,143478	15,00
1	21,9	1005	67,82	1,194726	68,76	0,000707	21,9	25849,40	4,180679	20,00
2	21,9	1005	67,82	1,194726	68,76	0,000707	21,9	25523,09	4,142887	20,00
3	21,9	1005	67,32	1,194668	68,27	0,000704	21,9	25523,09	4,142887	20,00
4	21,9	1005	67,32	1,194668	68,27	0,000704	21,9	25528,19	4,143478	20,00
5	21,9	1005	67,32	1,194668	68,27	0,000704	21,9	25528,19	4,143478	20,00
1	21,9	1005	112,32	1,199880	114,18	0,000911	21,9	25502,70	4,140525	25,00
2	21,9	1005	112,32	1,199880	114,18	0,000911	21,9	25507,80	4,141116	25,00
3	21,9	1005	114,32	1,200112	114,68	0,000913	21,9	25512,89	4,141706	25,00
4	21,9	1005	114,32	1,200112	114,68	0,000913	21,9	25523,09	4,142887	25,00
5	21,9	1005	114,32	1,200112	114,68	0,000913	21,9	25533,29	4,144068	25,00

LAMPIRAN 3. Data hasil kalibrasi rotameter pada tekanan 4,5 barg

No	TEST DATA ORIFICE						DATA TEST ALAT FLOWMETER			
	Downstream Temperature	Atmospheric Pressure	Orifice Static Pressure	Orifice Air Density	Orifice Differential Pressure	Orifice Air Mass Flow	Meter Temperature	Meter Static Pressure	Meter Air Density	Meter Indicator
	deg C	m Bar	mm H2O	kg/m ³	mm H2O	kg/sec	deg C	mm H2O	kg/m ³	grade
1	21,9	1005	10,30	1,188064	10,27	0,000274	21,9	45922,19	6,505457	5,00
2	21,9	1005	10,30	1,188064	10,27	0,000274	21,9	45952,78	6,509000	5,00
3	21,9	1005	10,30	1,188064	10,27	0,000274	21,9	45927,29	6,506047	5,00
4	21,9	1005	10,30	1,188064	10,27	0,000274	21,9	45917,09	6,504866	5,00
5	21,9	1005	10,30	1,188064	10,27	0,000274	21,9	45922,19	6,505457	5,00
1	21,9	1005	33,31	1,190729	33,28	0,000492	21,9	45906,89	6,503685	10,00
2	21,9	1005	33,31	1,190729	33,28	0,000492	21,9	45917,09	6,504866	10,00
3	21,9	1005	33,31	1,190729	33,28	0,000492	21,9	45922,19	6,505457	10,00
4	21,9	1005	33,31	1,190729	33,28	0,000492	21,9	45917,09	6,504866	10,00
5	21,9	1005	33,31	1,190729	33,28	0,000492	21,9	45922,19	6,505457	10,00
1	21,9	1005	64,32	1,194321	65,27	0,000688	21,9	45906,89	6,503685	15,00
2	21,9	1005	64,32	1,194321	65,27	0,000688	21,9	45922,19	6,505457	15,00
3	21,9	1005	64,32	1,194321	65,27	0,000688	21,9	45927,29	6,506047	15,00
4	21,9	1005	64,32	1,194321	65,27	0,000688	21,9	45932,39	6,506638	15,00
5	21,9	1005	64,32	1,194321	65,27	0,000688	21,9	45917,09	6,504866	15,00
1	21,9	1005	104,83	1,199011	106,70	0,000880	21,9	45932,39	6,506638	20,00
2	21,9	1005	104,83	1,199011	106,70	0,000880	21,9	45927,29	6,506047	20,00
3	21,9	1005	106,82	1,199243	108,70	0,000888	21,9	45932,39	6,506638	20,00
4	21,9	1005	107,32	1,199301	108,70	0,000888	21,9	45927,29	6,506047	20,00
5	21,9	1005	106,82	1,199243	108,20	0,000886	21,9	45906,89	6,503685	20,00
1	21,9	1005	177,29	1,207404	179,94	0,001144	21,6	45927,29	6,512674	25,00
2	21,9	1005	178,29	1,207520	180,44	0,001146	21,6	45922,19	6,512083	25,00
3	21,9	1005	178,29	1,207520	180,44	0,001146	21,6	45917,09	6,511492	25,00
4	21,9	1005	178,79	1,207578	180,94	0,001147	21,9	45906,89	6,503685	25,00
5	21,9	1005	178,79	1,207578	181,43	0,001149	21,9	45911,99	6,504276	25,00

LAMPIRAN 4. Data hasil kalibrasi rotameter dengan variasi tekanan dan seting aliran

No	TEST DATA ORIFICE						DATA TEST ALAT FLOWMETER			
	Downstream Temperature	Atmospheric Pressure	Orifice Static Pressure	Orifice Air Density	Orifice Differential Pressure	Orifice Air Mass Flow	Meter Temperature	Meter Static Pressure	Meter Air Density	Meter Indicator
	deg C	m Bar	mm H2O	kg/m ³	mm H2O	kg/sec	deg C	mm H2O	kg/m ³	grade
1	21,9	1006	2,29	1,188317	2,26	0,000130	21,9	96,87	1,199271	5,00
2	21,9	1006	5,29	1,188665	5,27	0,000197	21,9	5146,22	1,784074	7,50
3	21,9	1006	10,80	1,189302	10,77	0,000281	21,9	10278,58	2,378489	10,00
4	21,9	1006	20,80	1,190461	20,78	0,000389	21,9	15339,35	2,964614	12,50
5	21,9	1006	34,31	1,192026	34,28	0,000499	21,9	20427,65	3,553928	15,00

No	TEST DATA ORIFICE						DATA TEST ALAT FLOWMETER			
	Downstream Temperature	Atmospheric Pressure	Orifice Static Pressure	Orifice Air Density	Orifice Differential Pressure	Orifice Air Mass Flow	Meter Temperature	Meter Static Pressure	Meter Air Density	Meter Indicator
	deg C	m Bar	mm H2O	kg/m ³	mm H2O	kg/sec	deg C	mm H2O	kg/m ³	grade
6	21,8	1006	47,32	1,193937	47,28	0,000586	21,8	25558,78	4,149609	17,50
7	21,6	1006	79,33	1,198459	79,85	0,000762	21,6	30632,81	4,740686	20,00
8	21,6	1006	113,82	1,202458	115,38	0,000916	21,6	35739,47	5,332728	22,50
9	21,6	1006	168,30	1,208773	170,29	0,001114	21,6	40840,00	5,924060	25,00
10	21,6	1006	228,73	1,215780	230,16	0,001296	21,6	45937,49	6,515038	27,50

LAMPIRAN 5. Data hasil kalibrasi *turbine flowmeter* pada tekanan atmosfer, 2,5 barg dan 4.5 barg

No	TEST DATA ORIFICE						DATA TEST ALAT FLOWMETER			
	Downstream Temperature	Atmospheric Pressure	Orifice Static Pressure	Orifice Air Density	Orifice Differential Pressure	Orifice Air Mass Flow	Meter Temperature	Meter Static Pressure	Meter Air Density	Meter Indicator
	deg C	m Bar	mm H2O	kg/m ³	mm H2O	kg/sec	deg C	mm H2O	kg/m ³	Hz
1	21,6	1006	1,96	1,189489	2,15	0,000127	21,8	79,84	1,197705	50,05
2	21,6	1006	4,36	1,189767	4,46	0,000181	21,9	141,13	1,204397	100,69
3	21,6	1006	7,46	1,190127	7,56	0,000236	21,7	222,80	1,214680	150,21
4	21,6	1006	11,86	1,190637	11,95	0,000296	21,6	324,26	1,226856	200,49
5	21,6	1006	17,37	1,191275	17,55	0,000358	21,6	454,79	1,241988	250,29
6	21,6	1006	25,16	1,192179	25,33	0,000430	21,6	624,06	1,261612	300,52
7	21,6	1006	34,46	1,193257	34,69	0,000503	21,6	830,65	1,285563	350,50
8	21,6	1006	46,05	1,194600	46,43	0,000581	21,6	1078,43	1,314291	400,21
9	21,6	1006	62,82	1,196545	63,27	0,000678	21,5	1403,01	1,352379	450,22
10	21,6	1006	82,33	1,198806	82,75	0,000776	21,5	1801,30	1,398571	500,21
1	21,6	1006	14,30	1,190920	14,27	0,000323	21,6	25591,82	4,156257	50,04
2	21,6	1006	36,81	1,193530	36,78	0,000518	21,6	25583,36	4,155276	100,21
3	21,6	1006	70,32	1,197415	70,76	0,000717	21,4	25497,19	4,148103	150,01
4	21,6	1006	118,82	1,203038	119,67	0,000933	21,3	25572,04	4,158199	200,55
5	21,6	1006	180,79	1,210221	183,42	0,001156	21,3	25501,58	4,150022	250,50
6	21,6	1006	54,32	1,195560	55,28	0,001375	21,3	25554,60	4,156175	300,37
7	21,6	1006	72,83	1,197705	74,76	0,001599	21,3	25493,62	4,149098	350,44
8	21,6	1006	94,83	1,200256	97,22	0,001823	21,3	25494,64	4,149217	400,46
9	21,6	1006	119,32	1,203096	123,16	0,002052	21,3	25511,57	4,151181	450,54
10	21,6	1006	147,31	1,206340	152,56	0,002284	21,3	25505,65	4,150495	500,31
1	21,6	1007	6,79	1,191232	6,77	0,000485	21,6	45929,63	6,515310	50,44
2	21,6	1007	17,30	1,192450	17,28	0,000772	21,6	45964,30	6,519329	100,24
3	21,6	1007	34,81	1,194480	35,78	0,001108	21,6	45903,73	6,512307	150,51
4	21,6	1007	61,82	1,197612	63,77	0,001478	21,5	45965,53	6,521685	200,44
5	21,6	1007	92,83	1,201206	97,22	0,001824	21,3	45938,71	6,523006	250,91
6	21,6	1007	40,82	1,195176	44,78	0,002224	21,6	45910,46	6,513087	300,60
7	21,6	1007	57,82	1,197148	60,77	0,002589	21,3	45929,84	6,521976	350,12
8	21,6	1007	74,83	1,199119	79,75	0,002964	21,3	45915,56	6,520319	400,11
9	21,6	1007	94,83	1,201438	100,71	0,003330	21,3	45918,62	6,520675	450,16
10	21,6	1007	114,82	1,203756	125,15	0,003711	21,3	45932,49	6,522284	500,49

LAMPIRAN 6. Data hasil kalibrasi *rotameter* dengan media gas Argon tekanan 3,38 barg

No	TEST DATA ORIFICE						DATA TEST ALAT FLOWMETER			
	Downstream Temperature	Atmospheric Pressure	Orifice Static Pressure	Orifice Ar ₂ Density	Orifice Differential Pressure	Orifice Ar ₂ Mass Flow	Meter Temperature	Meter Static Pressure	Meter Ar ₂ Density	Meter Indicator
	deg C	m Bar	mm H2O	kg/m ³	mm H2O	kg/sec	deg C	mm H2O	kg/m ³	grade
1	23,7	1007	8,30	1,632460	8,27	0,000288	23,6	34470,96	7,109394	5,00
2	23,7	1007	8,30	1,632460	8,27	0,000288	23,6	34470,96	7,109394	5,00
3	23,7	1007	8,30	1,632460	8,27	0,000288	23,6	34481,16	7,111014	5,00
4	23,7	1007	8,30	1,632460	8,27	0,000288	23,6	34481,16	7,111014	5,00
5	23,7	1007	8,30	1,632460	8,27	0,000288	23,6	34481,16	7,111014	5,00
1	23,7	1007	26,31	1,635322	26,28	0,000513	23,6	34501,55	7,114255	10,00
2	23,7	1007	26,31	1,635322	26,28	0,000513	23,6	34491,35	7,112635	10,00
3	23,7	1007	26,31	1,635322	26,28	0,000513	23,6	34506,65	7,115065	10,00
4	23,7	1007	26,31	1,635322	26,78	0,000517	23,6	34486,25	7,111825	10,00
5	23,7	1007	26,31	1,635322	26,78	0,000517	23,6	34491,35	7,112635	10,00
1	23,7	1007	52,82	1,639533	53,78	0,000733	23,6	34506,65	7,115065	15,00
2	23,7	1007	52,82	1,639533	53,78	0,000733	23,6	34511,75	7,115876	15,00
3	23,7	1007	52,82	1,639533	53,78	0,000733	23,6	34486,25	7,111825	15,00
4	23,7	1007	51,82	1,639374	53,28	0,000729	23,6	34486,25	7,111825	15,00
5	23,7	1007	51,82	1,639374	53,28	0,000729	23,6	34486,25	7,111825	15,00
1	23,7	1007	90,83	1,645571	91,23	0,000954	23,6	34501,55	7,114255	20,00
2	23,7	1007	90,83	1,645571	91,73	0,000957	23,6	34491,35	7,112635	20,00
3	23,7	1007	90,83	1,645571	91,73	0,000957	23,6	34501,55	7,114255	20,00
4	23,7	1007	91,33	1,645650	91,73	0,000957	23,6	34491,35	7,112635	20,00
5	23,7	1007	91,83	1,645729	92,23	0,000960	23,6	34491,35	7,112635	20,00

LAMPIRAN 7. Data hasil kalibrasi turbine flowmeter dengan media gas Argon tekanan 3,38 barg

No	TEST DATA ORIFICE						DATA TEST ALAT FLOWMETER			
	Downstream Temperature	Atmospheric Pressure	Orifice Static Pressure	Orifice Ar ₂ Density	Orifice Differential Pressure	Orifice Ar ₂ Mass Flow	Meter Temperature	Meter Static Pressure	Meter Ar ₂ Density	Meter Indicator
	deg C	m Bar	mm H ₂ O	kg/m ³	mm H ₂ O	kg/sec	deg C	mm H ₂ O	kg/m ³	Hz
1	24,2	1007	15,30	1,630824	15,27	0,000849	24,1	34479,12	7,098722	100,15
2	24,2	1007	15,30	1,630824	15,27	0,000849	24,1	34476,06	7,098236	100,20
3	24,2	1007	15,30	1,630824	15,27	0,000849	24,1	34476,06	7,098236	100,18
4	24,2	1007	15,30	1,630824	15,27	0,000849	24,1	34473,00	7,097751	100,15
5	24,2	1007	15,80	1,630904	15,77	0,000863	24,1	34470,96	7,097427	100,25
1	24,2	1007	52,82	1,636774	54,78	0,001602	24,1	34470,96	7,097427	200,15
2	24,2	1007	52,82	1,636774	54,78	0,001602	24,1	34475,04	7,098074	200,17
3	24,2	1007	52,82	1,636774	54,78	0,001602	24,1	34469,94	7,097266	200,25
4	24,2	1007	53,32	1,636854	55,28	0,001609	24,1	34473,00	7,097751	200,18
5	24,2	1007	53,32	1,636854	55,28	0,001609	24,1	34470,96	7,097427	200,35
1	24,2	1007	36,31	1,634157	38,78	0,002422	24,2	34470,96	7,095039	300,17
2	24,2	1007	36,31	1,634157	38,78	0,002422	24,2	34470,96	7,095039	300,20
3	24,2	1007	36,31	1,634157	38,78	0,002422	24,2	34468,92	7,094715	300,10
4	24,2	1007	36,81	1,634236	39,28	0,002437	24,2	34467,90	7,094554	300,12
5	24,2	1007	36,81	1,634236	39,28	0,002437	24,2	34470,96	7,095039	300,15
1	24,2	1007	66,32	1,638916	70,76	0,003266	24,2	34473,00	7,095362	400,27
2	24,2	1007	66,32	1,638916	70,76	0,003266	24,2	34475,04	7,095686	400,32
3	24,2	1007	66,32	1,638916	71,26	0,003278	24,2	34470,96	7,095039	400,25
4	24,2	1007	66,32	1,638916	71,26	0,003278	24,2	34470,96	7,095039	400,28
5	24,2	1007	66,32	1,638916	71,26	0,003278	24,2	34473,00	7,095362	400,17

LAMPIRAN 9. Gambar instalasi pengujian / kalibrasi flowmeter gas

