

**HAVA KALİTESİNİN KONTROLUNDA
DEBİ VE NEM ÖLÇÜMÜNÜN YERİ
VE ÖNEMİ**

Müfide ARİ

Yüksek Lisans

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

1991

HAVA KALİTESİNİN KONTROLUNDA

DEBİ VE NEM ÖLÇÜMÜNÜN

YERİ VE ÖNEMİ

Müfide Arı

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Proses ve Reaktör Tasarımı Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Doç.Dr.Serap Kara

Ocak-1991

MÜFİDE ARI'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "HAVA KALİTESİNİN KORUNMASINDA DEBİ VE NEM ÖLÇÜMÜNÜN YERİ VE ÖNEMİ" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

18 / 02 / 1991

Üye : Doç.Dr.Serap KARA

Üye : Doç.Dr.M.Ercengiz YILDIRIM

Üye : Y.Doç.Dr.Ertuğrul YÖRÜKOĞULLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun.....**13 MART 1991**
gün ve**270-4**.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof.Dr.Rüstem Kaya
Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu Yüksek Lisans Tezi'nde, yakma işlemlerinden kaynaklanarak hava kirliliğine yol açan etken ve parametreler (yakıt, yakma şekli, sıcaklık, basınç, nem, kirletici bileşenlerin emisyon derişimleri ve gaz emisyon debileri) literatür taramasına dayanılarak derlenmiş, debi ve nem ölçüm sistemleri prosese uygulanabilirlik, prensip, yapım etkinlikleri açısından karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın deneysel bölümünde, yakma prosesine ilişkin fiziksel, termodinamik, stokiyometrik ve kimyasal etkenler gözönünde bulundurularak, gaz ve partikül biçimindeki yakma ürünleri, Tunçbilek linyit kömürünün yakıldığı bir kovalı sobada ölçülmüş, debi ve nem parametrelerinin bu ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesindeki önemi araştırılmıştır.

Ülkemizde konuya ilişkin mühendislik hizmetlerinin çok yetersiz olduğu ve debi / nem ölçümüne yeterince önem verilmediği kanısına varılmıştır.

Anahtar Kelimeler

Hava Kirliliği

Nem

Sıkıştırılabilen akışkanlar

Emisyon

Yakma sistemleri

Debi

Ölçüm Yöntemleri

Açık Atmosfer Ölçümleri

İşyeri Ortamı

SUMMARY

In this Master Thesis, combustion-related factors and parameters causing air pollution (such as fuel type, way of firing, temperature, pressure, humidity, emission concentrations of polluting compounds and emission flow rates) have been brought together based on a literature survey. The systems for flow and humidity measurements have also been compared with respect to their applicability to any system, their construction and effectiveness.

In the experimental part of the study, gaseous and particulate combustion products from a bucketted-stove in which Lignite from Tunçbilek is burnt, have been measured by taking the physical, thermodynamic, stoichiometric and chemical factors related to combustion processes, into account. The importance of the flow-rate and humidity for the evaluation of these data is also investigated.

Engineering background on the subject have been concluded to be insufficient and flow / humidity measurements are not being taken to be so seriously.

Keywords

Air pollution	Flow rates
Humidity	Methods of measurements for flow rates and humidity
Compressible fluids	Ambient air measurements
Emission	Work atmosphere
Combustion systems	

TEŞEKKÜR

Emisyon, imisyon ve işyeri atmosferinde hava kalitesinin tespiti amacıyla yapılan ölçümlerde debi ve nem parametrelerinin öneminin vurgulandığı bu çalışma, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans tezi olarak yapılmıştır.

Çalışmalarımın başlangıcından beri sürekli ilgisini, hoşgörüsünü, yardımlarını ve manevi desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç.Dr.Serap Kara'ya içten teşekkür borçluyum.

Çalışmamın her aşamasında yanımda olan, ilgisini, desteğini unutamayacağım Kimya Mühendisliği Bölümü Öğretim Görevlisi Tuncay Döğeroğlu'na ve Araş.Gör.İbrahim Kul'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım süresince ilgi ve yardımlarını gördüğüm Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölüm Başkanı Doç.Dr.Mustafa Kara'ya, Y.Doç.Dr.Ö.Mete Koçkar'a, Araş.Gör.A.Savaş Kopardal'a, Kimya Mühendisliği Bölümü elemanlarına ve yüksek lisans arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Şekillerin çiziminde emeği geçen bölümümüz teknik ressamı Ahmet Gün'e ve yaş-kuru hazne sistemini yapan Hasan Koşar'a da teşekkür ederim.

Bugüne değin tüm yaşantımda maddi manevi desteklerini hiç esirgemeyen, bundan sonra da yanımda olacaklarına inandığım aileme sonsuz minnet borçluyum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iii
SUMMARY.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Debi ve Nem Parametrelerinin Önemi.....	7
1.2 Ölçüm Gereksinimleri, Standartlar ve Yasal Kısıtlar.....	13
1.3 Amaç.....	23
2.GENEL BİLGİ.....	29
3.ÖLÇÜM TEKNİKLERİ İLE İLGİLİ KURAMSAL KAVRAMLAR.....	34
3.1 Sıkıştırılabilen Akışkanlarda Debi Ölçümüne İlişkin Kuramsal Kavramlar.....	34
3.1.1 Sıkıştırılabilen akış proseslerinde kütlelerin korunumu..	38
3.1.2 Sıkıştırılabilen akış proseslerinde enerjinin korunumu..	39
3.1.3 Yatay borularda sıkıştırılabilir akışın incelenmesi.....	42
3.1.3.1 İzotermal akımlar.....	43
3.1.3.2 Adyabatik akımlar.....	44
3.2 Debi Ölçüm Yöntemleri ve Prensipleri.....	47
3.2.1 Pitot tüpü ile debi ölçümü.....	47
3.2.1.1 Pitot-statik tüpü.....	56
3.2.1.2 Ortalama alan (averaging)pitot tüpü.....	60
3.2.1.3 S-tipi pitot tüpü.....	60
3.2.2 Orifis ile debi ölçümü.....	62
3.2.3 Venturi ile debi ölçümü.....	68
3.2.4 Nozul ile debi ölçümü.....	71
3.2.5 Rotametre ile debi ölçümü.....	75
3.2.6 Dirsekmetre ile debi ölçümü.....	79
3.2.7 Anemometre ile debi ölçümü.....	83
3.2.7.1 Sıcak-tel (hot wire) / sıcak-film (hot film) anemometresi.....	83
3.2.7.2 Pervaneli anemometre.....	85

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.2.7.3 Laser-Doppler anemometresi.....	87
3.2.8 Torbametre ile debi ölçümü.....	89
3.2.9 Sabun-film büreti (soap-bubble flowmeter) ile debi ölçümü.....	90
3.3 Nem Ölçümüne İlişkin Kuramsal Kavramlar.....	94
3.3.1 Psikrometrik kavramlar.....	94
3.3.1.1 Termodinamik yaş termometre sıcaklığı ile psikrometrik yaş termometre sıcaklığı arasındaki ilişki.....	99
3.3.2 Psikrometrik diyagramların yapısı.....	103
3.4 Nem Ölçüm Yöntemleri ve Prensipleri.....	105
3.4.1 Yaş-kuru termometreler ile nem ölçümü.....	106
3.4.2 Yoğunlaşma yöntemi ile nem ölçümü.....	107
3.4.3 Adsorpsiyon yöntemi ile nem ölçümü.....	109
3.4.4 Elektriksel nem ölçümü.....	109
3.4.5 Dönme psikrometresi ile nem ölçümü.....	110
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	112
4.1 Materyal ve Metod.....	112
4.1.1 Örnek alma koşulları ve ölçüm teknikleri.....	112
4.1.2 Bu çalışmada uygulanan yöntemler.....	117
4.1.2.1 Emisyon ölçüm sistemi.....	117
4.1.2.2 İmisyon ölçüm sistemi.....	124
4.2 Deneysel Bulgular.....	126
5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	142
Ek Açıklamalar-A Kükürt Trioksit Nedeniyle Çiğ Noktasındaki Yükselme.....	144
Ek Açıklamalar-B Nemle İlgili Bazı Tanımlar.....	145
Ek Açıklamalar-C Deneysel Çalışmada Kullanılan Soba Özellikleriyle İlgili Hesaplamalar.....	147
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	154
EK 1. Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği'nde Yer Alan Kirlenici Vasfı Yüksek Tesisler İçin Emisyon Sınır Değer Diyagramları.....	160
EK 2. Psikrometrik Diyagramlar.....	162

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Hava kirliliğinin kaynakları.....	2
1.2 Kuru havanın bileşimi.....	2
1.3 Değişik çalışma koşulları, atmosfer sıcaklığı (kuru termometre), nem(kuru ve ıslak termometre farkı) ve değişik hava esintilerine (m/s)göre rahatlık bölgeleri.....	11
1.4 Değişik hava sıcaklığı ve bağıl nem derecelerine göre bunalım eğrisi (Lancaster-Cantens-Ruge'a göre).....	12
2.1 Manometreler.....	32
2.2 U-manometresi.....	32
2.3 Eğik manometre.....	33
3.1 Sıkıştırılabilir akışın farklı rejimleri.....	36
3.2 Tek giriş ve çıkışlı kontrol hacmi.....	38
3.3 Durgunluk basıncı.....	54
3.4 Üç farklı hipoteze göre hesaplanmış durgunluk basıncı değerleri..	54
3.5 Pitot tüpünün ucundaki basınç değişimleri ve şok dalgası oluşumu	55
3.6 (a)(b) Pitot-statik tüpünün iki değişik gösterimi.....	57
3.7 İki geleneksel pitot-statik tüpü.....	58
3.8 (a)(b) Ortalama alan pitot tüpünün iki değişik gösterimi.....	61
3.9 S-tipi pitot tüpü.....	62
3.10 Orifisle debi ölçümü.....	64
3.11 Orifisteki toplam basınç kaybı.....	64
3.12 Hava akım ölçerleri için genişleme faktörleri.....	66
3.13 Kare uçlu orifis plakası.....	66
3.14 Venturi tüpü.....	69
3.15 Nozulun iki tipi.....	72
3.16 Converging-diverging nozul.....	72
3.17 Sonik-venturi nozul.....	73
3.18 Nozul sıfır ayarı tipi.....	75
3.19 Rotametre nin prensibi.....	77
3.20 Rotametre.....	78
3.21 Dirsek metre.....	81
3.22 Dirsekteki hız dağılımının gösterimi.....	81

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.23 Sabit-direnç akış ölçüm devresi.....	84
3.24 Sabit-akım akış ölçüm devresi.....	85
3.25 Tipik bir sıcak-film probunun ölçeksiz çizimi.....	86
3.26 Pervaneli anemometre.....	86
3.27 Laser-Doppler anemometresinin prensibi.....	88
3.28 Torbametre.....	90
3.29 Bir akım ölçüm deneyinde sabun film büretinin kullanımı.....	92
3.30 Sabun-film büretinin prensibi.....	93
3.31 Sabun-film büreti şekilleri.....	93
3.32 Nemli hava içine suyun buharlaşması.....	95
3.33 Yaş termometre.....	97
3.34 Doymun hava için sıcaklık ile nem oranı arasındaki ilişki.....	101
3.35 14.696 psia barometrik basınçta 0.3 in. çaplı yaş hazne termometresi için psikrometrik yaş termometre sıcaklığının, termodinamik yaş termometre sıcaklığından sapması.....	101
3.36 14.696 psia barometrik basınçta 0.1 in. çaplı yaş hazne termometresi için psikrometrik yaş termometre sıcaklığının, termodinamik yaş termometre sıcaklığından sapması.....	102
3.37 Nem diyagramının kullanılışı.....	104
3.38 Psikrometre ile baca neminin belirlenmesi.....	107
4.1 Genelleştirilmiş örnek alma hattı.....	113
4.2 İzokinetik ve izokinetik olmayan örnek alma durumu.....	115
4.3 Çalışmada kullanılan kovalı tip soba şeması.....	118
4.4 Soba sistemi.....	121
4.5 Örnek alma düzeneği.....	121
4.6 (a)(b) Pirinç / cam yaş-kuru hazne ölçüm aletleri.....	123
A.1 Kükürt trioksit nedeniyle çiğ noktasındaki yükselme(Sıcaklık yükselmesi ve $P_{H_2SO_4} / P_{H_2O}$ kısmi basınç oranı arasındaki korelasyon).....	144
Ek-C.1 Kuru baca gazının (normal koşullarda) ortalama özgül ısısı (kcal / Nm ³ °C).....	151
Ek 1.1Atık gazlarda bulunan toz emisyon sınırları.....	160

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Ek 1.2 Kupol ocakları için toz emisyon sınırları.....	160
Ek 1.3 Hidrojen florür üreten tesisler için atık gaz hacimsel debisi ve HF konsantrasyonu arasındaki ilişki.....	161
Ek 1.4 Sunta ve benzeri ağaç ürünleri üretim tesisleri için atık gaz hacimsel debisi ve toz konsantrasyonu arasındaki ilişki.....	161
Ek 2.1 Hava ve yanma gazları için yüksek sıcaklıklardaki psikrometrik diyagram.....	162
Ek 2.2 Ortalama sıcaklıklarda psikrometrik diyagram (SI birim sisteminde).....	163
Ek 2.3 Ortalama sıcaklıklarda psikrometrik diyagram (İngiliz birim sisteminde).....	164
Ek 2.4 İki ayrı birim sisteminde psikrometrik diyagram.....	165

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Partikül şeklindeki kirleticilerin tanımlanması.....	4
1.2 Dünya enerji rezervi.....	6
1.3 Sektörlere göre tahmini enerji tüketimi.....	6
1.4 Sakin ve hafif işlerde, uygun bir iklim hissi verebilecek hava akımı hızı ve bağıl nem değerleri.....	13
1.5 (a) HKKY'de izne tabi tesisler için debiye bağlı emisyon sınır değerleri.....	15
(b) HKKY'de debiyle ilgili diğer hükümler.....	17
(c) Hava kirlenmesi seviyelerinin tespitinde kirletici bileşen ve debi arasındaki ilişki.....	18
(d) HKKY'de yer alan kirletici vasfı yüksek tesisler için özel emisyon sınırları.....	19
(e) HKKY'ne göre gaz biçimindeki emisyonların sürekli ölçümü.....	21
(f) HKKY'nde nemle ilgili emisyon sınır değerleri.....	22
1.6 (a) BPM 1 (Best Practicable Means)standartlarına göre çeşitli proseslere (scheduled processes)uygulanan sayısal emisyon sınırları.....	24
(b) Debi ve nemle ilgili BPM standartları.....	25
1.7 İşyeri ortamı ve işçi sağlığı ile ilgili bazı yasal kısıtlar.....	28
3.1 Adyabatik koşullarda bazı özelliklerin değişimi.....	45
3.2 (a)Bazı akım ölçerlerin özellikleri.....	48
(b)Akım ölçerlerin seçilme kriterleri.....	50
(c)Bazı akım ölçer tiplerinin avantajları / dezavantajları.....	51
3.3 Nem ölçüm yöntemleri.....	105
4.1 Çeşitli standartlara göre debi ve nem ölçüm metodları.....	116
4.2 Deneysel çalışmada kullanılan sobanın özellikleri ve uygulanan yakma koşulları.....	119
4.3 Kullanılan yakıtın özellikleri.....	120
4.4 (a)Kütahya bölgesine ait bazı kömür örneklerinin analiz sonuçları.....	122
(b)Bazı kömür örneklerinin analiz sonuçları.....	122
4.5 Ringelman indeksinde % okumaya karşılık $\mu\text{g} / \text{cm}^2$ değerleri..	125

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.6 Soba deneyi örnek alma düzeneği ölçüm verileri.....	127
4.7 Orsat analizi ölçüm verileri.....	131
4.8 Yaş-kuru termometre düzenekleri ile alınan ölçüm verileri.....	132
4.9 Soba deneyi Bluma GACO-SN cihazı ile alınan ölçüm verileri..	133
4.10 Adsorpsiyon yöntemiyle alınan ölçüm verileri.....	133
4.11 Soba deneyinin yapıldığı günlerde meteorolojik veriler.....	134
4.12 Partikül, SO ₂ ve NO ₂ için emisyon derişimleri.....	135
4.13 Yaş-kuru hazne sistemi ile ölçülen nem değerleri.....	136
4.14 Adsorpsiyon yöntemi ile belirlenen nem değerleri.....	139
4.15 Hesaplama yoluyla bulunan baca gazı debileri.....	140
4.16 Hesaplama yoluyla bulunan ısı verim değerleri.....	141
Ek-C.1Suyun buhar basıncı değerleri.....	153

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	boru giriş ve çıkışındaki alan (m ²) D 3.8
A	orifis alanı (m ²)
A _s	çapraz hız bölgesindeki baca alanı (m ²)
A _o	vena kontrakta kesit alanı (m ²)
A _y	yüzücü ve tüp arasındaki halkasal alan (m ²)
a	gittikçe daralan rotametre tüpünü belirleyen sabit
a, b	rotametrenin kalibrasyonundan kaynaklanan sabitler
b	ağırlık cinsinden kül ve diğer artıklardaki karbon oranı D.Ek-C.6
a, b, c	sabit D.3.152
a _∞	ses hızı (m / s)
C	boyutsuz pitot-statik tüpü katsayısı D 3.72
C	ağırlık cinsinden deney yakıtının karbon oranı (%)D Ek-C.5
C _d	venturi katsayısı
C _d	sürtünme katsayısı D 3.114
C _k	dirsekmetre düzeltme katsayısı
C _o	orifis katsayısı
C _p	su buharı özgül ısısı (kcal / kg °C)
C _{pm}	kuru baca gazları özgül ısısı (kcal / Nm ³ °C) Şekil Ek C.1
C _p test	S-tipi pitot tüpü katsayısı
C _p std	standart pitot tüpü katsayısı
C _r	ağırlık cinsinden deney sonundaki kül ve diğer artıklardaki karbon miktarının yüklenen yakıt miktarına oranı D Ek-C.6
C _s	kuru standart koşullarda ölçülmüş kirletici derişimi (gr / m ³) D 3.77
CO ₂	hacim cinsinden baca gazındaki CO ₂ oranı D Ek-C.5
CO	hacim cinsinden baca gazındaki CO oranı (birlikte tespit edildiğinde CO+H ₂ oranı alınabilir) (%)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
(CO+H ₂)	hacim cinsinden baca gazındaki yanmamış gazların oranı (%)
D	su buharı yayıncılığı (ft ² / hr)
D	boru çapı D 3.32
D	rotametre tüpünün girişteki çapı (m)
D'	orifis çapı D 3.142
d	rotametre yüzücüsünün en geniş kısmının çapı
D _o	orifis çapı
D _p	prob iç çapı
e _m	ölçer sıcaklığında ve doyumluk koşulları için su buharı basıncı
e _v	viskoz dağılımla ilgili boyutsuz sürtünme kaybı faktörü
f	sürtünme faktörü
f _{dg}	toplanan örnek gazındaki hacim kesri
F _d	sürtünme kuvveti
f _w	gaz içindeki nemin hacimsel kesri
G	borunun birim kesit alanı için kütleli akım hızı D 3.33
G _y	sobaya yüklenen yakıt ağırlığı (kg)
g	yerçekimi ivmesi
g _c	çevirme faktörü
H	entalpi
H	ağırlık cinsinden deney yakıtındaki su oranı (%) D Ek-C.5
H	nem Ek Açıklamalar-A
H	ağırlık cinsinden deney yakıtındaki hidrojen oranı (%)
H (H _B +H ₆)	bacanın tabandan itibaren yüksekliği (ft)
H	spesifik entalpi
H _u	deney yakıtı alt ısı değeri (kcal / kg)
H _R	bağıl nem Ek Açıklamalar-A

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
H_2O	ağırlık cinsinden deney yakıtındaki su oranı (%)
h	spesifik entalpi
h	dirsekmetrenin iç ve dış yüzeyleri arasındaki basınç farkı
h_c	konveksiyonla ısı aktarım katsayısı (Btu / ft ² ·hr·°F)
h_D	konveksiyonla ısı aktarım katsayısı
h_{fg}^*	suyun buharlaşma gizli ısı (Btu / lb)
h_R	radyasyonla ısı aktarım katsayısı
i	elektrik akımı
K	yaş termometre katsayısı
K'	torbametre akış katsayısı
K_p	4.08 m / s (kg / kgmol K) ^{1/2}
K^*	$C_{p,a} / h_{fg}^*$
k	nemli havanın ısıl iletkenliği (Btu / ft ² ·hr·°F)
k_f, ρ_f, μ_f	film sıcaklığındaki özellikler
L	boru boyu D 3.29
M	akışkanın molekül ağırlığı D 3.40
M_D	orsat analiziyle hesaplanmış kuru baca gazı molekül ağırlığı
M_{dg}	kuru baca gazının molekül ağırlığı D 3.173
M_s	yaş temelde baca gazının molekül ağırlığı (kg / kgmol)
M_w	suyun molekül ağırlığı D 3.173
M_∞	Mach sayısı
m	kütleli akış hızı (kg / s)
m_w	su buharının kütleli akışı (lb / ft ² ·hr)
P_A, P_B, P_1, P_2	basınç, atm, mbar
P_m	ölçerdeki mutlak basınç
P_o	"o" noktasındaki basınç Şekil 3.3
P_p	eğik sondadaki gaz statik basıncı
P_s	durgunluk (stagnation) basıncı Şekil 3.3
P_s	mutlak baca gazı basıncı (bar) D 3.73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
ΔP_{kin}	kinetik basınç farkı (in.H ₂ O)
ΔP_{top}	toplam basınç farkı (in.H ₂ O)
P_w^o	t _w sıcaklığındaki suyun buhar basıncı
Q	ısı
Q _A	baca gazları duyulur ısı kaybı (kcal / kg)
Q _B	baca gazlarındaki eksik yanma kaybı (kcal / kg)
Q _{Fr}	yanma sonunda kalan kül ve diğer artıklardaki yanmamış karbondan ileri gelen eksik yanma kaybı (kcal / kg)
Q _h	anma ısı gücü (kcal / kg)
ΣQ_K	toplam ısı kaybı (kcal / kg)
Q _K	ısı kaybı (kcal / deney süresi)
Q _o	orifis içinden geçen hacimsel gaz akış hızı D 3.87
Q _p	eğik probun içinden geçen hacimsel gaz akış hızı D 3.87
Q _s	yaş baca koşullarında hacimsel emisyon hızı , m ³ / hr
Q _{std}	standart koşullardaki hacimsel emisyon hızı
Q _y	deney süresince sobaya verilen ısı (kcal / deney süresi)
q	ısı aktarım hızı
R	ağırlık cinsinden kül ve diğer artık miktarının yüklenen yakıt miktarına oranı (%)
R	ideal gaz sabiti
Re	Reynolds sayısı
RH	bağıl nem Ek Açıklamalar-A
R _m	3 ve 4 noktaları arasındaki uzaklık D 2.3
R _o	T _o referans sıcaklığındaki telin direnci
R _w	telin direnci
S _o	orifis kesit alanı
T	baca ağız civarındaki ortalama sıcaklık (°R) D Ek-C.1
T ₁	ortalama baca sıcaklığı (°R) D Ek-C.1

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
T_o	"o" noktasındaki sıcaklık Şekil 3.3
T_o	orifisteki gaz sıcaklığı
T_o	orifisteki gaz sıcaklığı
T_p	eğik probtaki (bacadaki gaz sıcaklığı)
T_s	"s" noktasındaki sıcaklık
T_{sp}	durgunluk "stagnation" sıcaklığı
$(T_s)_{ort}$	ortalama baca gazı sıcaklığı (°K)
T_w	telin sıcaklığı
T_{∞}	akışkanın serbest akım sıcaklığı
t_a	baca gazı sıcaklığı (°C)
t_{db}	kuru hazne termometresiyle ölçülen sıcaklık
t_d	kuru termometre sıcaklığı
t_f	film sıcaklığı
t_o	hava sıcaklığı
t_s	psikrometreyi çevreleyen ortamın sıcaklığı
t_w	yaş termometre sıcaklığı
t_{wb}	yaş hazne termometresiyle ölçülen sıcaklık
t^*	termodinamik yaş termometre sıcaklığı
t_l	deney odası sıcaklığı (°C)
U	iç enerji
u	ortalama akışkan hızı
u_m	yüzücü ve tüp arasındaki halkasal alandaki akım hızı
u_o	orifisle ölçülen akım hızı
V_{∞}, V	serbest gaz akım hızı
V_m	ölçerin içinden geçen gazın toplam hacmi
V_o	uç noktadaki hız m / s, ft / s D 3.72
V_p, V	prob içindeki hız (izokinetik koşul söz konusu olduğundan kanal içindeki hıza eşittir)
$(V_s)_{ort}$	ortalama gaz hızı (m / s)
V_{wc}	gaz ölçer koşullarında kondenserde yoğunlaşmış suyun hacmi D 3.174
V_{wm}	gaz ölçerin içinden geçen suyun hacmi D 3.174

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler

Açıklama

V_{wo}	gaz ölçer koşullarında kaynaktan çekilen suyun hacmi D 3.174
V_y	yüzücünün toplam hacmi
v	hacim
$\langle v_1 \rangle, \langle v_2 \rangle$	ortalama gaz hızı
W	iş
W_a	yüzde nem
W_o	hava akımı içindeki kabarcık için nem değeri Şekil 3.32
$W_{s,wb}$	doygun nemli havanın nem oranı
W_s	şaft işi
W_s	doygun nemli havanın nem oranı, lb_w / lb_a
$W_{s,w}$	ıslak yüzeydeki (t_w) nem değeri
W_s^*	termodinamik yaş hazne sıcaklığındaki doygun havanın nemi
Y_A	nem Ek Açıklamalar-A
Y	boyutsuz genişleme faktörü
y	girişten itibaren uzaklık D 3.114
Z_m	4 ve 5 noktaları arasındaki uzaklık D 2.3

Yunan Harfleri

α_1, α_2	venturiye giriş ve çıkıştaki kinetik enerji düzeltme faktörü
α	direncin sıcaklık katsayısı
α	ısı yayınlılık (k / g_c), ft^2 / hr
β	orifis katsayısı
γ	C_p / C_v
ϵ_{wb}	yaş haznenin yüzey emissivity
η_t	ısı verim (%)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

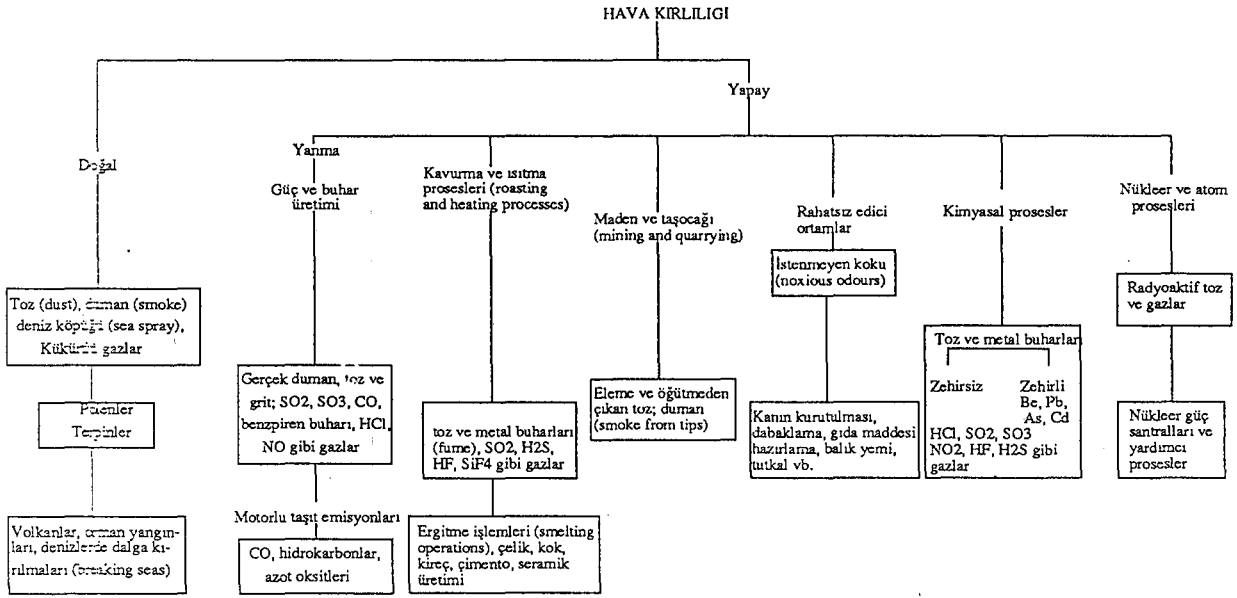
<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
θ	iki ışın arasındaki açı
λ	ışığın dalga boyu
λ_w	yaş hazne sıcaklığındaki suyun gizli ısısı
μ	viskozite
ρ_A, ρ_B	yoğunluk
ρ_o	yerel sıcaklık ve P_o basıncında ölçülen akışkan yoğunluğu
ρ_F	akışkan yoğunluğu
ρ_y	yüzücünün yoğunluğu
ρ_a	nemli havanın yoğunluğu, lb kuru hava / ft ³
τ	sıkıştırılabilirlik
τ_T	izotermal sıkıştırılabilirlik
τ_S	izentropik sıkıştırılabilirlik

1. GİRİŞ

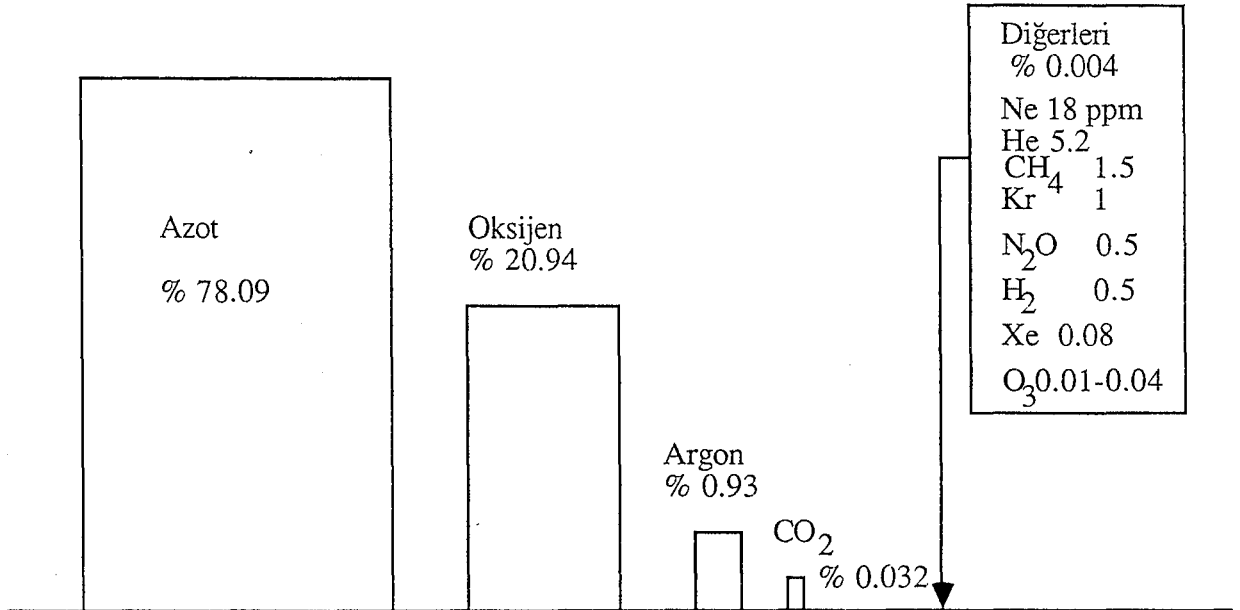
Yirminci yüzyılın ortalarından itibaren oldukça büyük bir patlama gösteren nüfus artışı, sanayileşme hızı ve buna bağlı olarak ortaya çıkan büyük yerleşim birimleri, doğal veya yapay hava kirliliği sorununu gündeme getirmiştir.

Deniz ve okyanus çalkantıları, yıldırımlar, şimşekler (gaz kökenli), depremler, volkanik patlamalar (hem gaz kökenli hem de katı parçacık kökenli), biokütlelerin bozunması (gaz kökenli) şeklinde doğal olarak; durgun ve hareketli çeşitli noktasal, çizgisel ve yaygın kaynaklardan endüstriyel faaliyetler, taşıt egzozları, yakma işlemleri, soğutucu, sprey, aerosol kullanımı şeklinde de yapay olarak ortaya çıkan hava kirliliğinin kaynakları Şekil 1.1'de şematik olarak gösterilmektedir (Strauss, 1975; Var, 1990; Kaytakoğlu, 1991).

Doğal hava bileşimini (Şekil 1.2) bozan bütün maddelerin kirletici olarak tanımlanmasına karşın, yanma olayında gaz, petrol veya kömürün yakılmasıyla oluşan CO₂, bu yakıtlarda bol bulunan H₂'nin yanmasıyla açığa çıkan subuharı ve yanmada kullanılan O₂ ile fazla O₂, gerçekte kirletici bileşen olarak sayılmaz. Ancak, sürekli sanayileşme sonucunda hızla artan CO₂ miktarı, yeryüzünde sera etkisine (greenhouse effect) yol açar. Sera etkisi, güneşin kısa dalgalı enerji yayılımı sonucunda, bu enerjinin (yerin üst yüzeyinde meydana gelen yansıma sırasında) daha uzun dalga boyuna sahip ısının yayılma alanı içine itilmesi ile gerçekleşir. Bu dalga boyları CO₂, CH₄, subuharı ve CFC bileşikleri gibi gazlar tarafından, yerden atmosfere dönüş sırasında kısmen tutulur ve yer için ısıtıcı bir görev yaparlar. Bu tür enerji tutan gazlara sahip bir atmosferin çok ince olması halinde durum Mars gezegenindeki gibi olur ve burada gezegen atmosferi % 95 oranında CO₂'den oluştuğu halde -30 ila -90 °C'lik ortalama sıcaklıklar hüküm sürer. Hava tabakasında yeryüzeyinden 300000 kat daha fazla CO₂ bulunan Venüs gezegeni ise güneşin sıcaklığını sünger gibi emmekte ve 200-500 °C arası alt bulut tabakası sıcaklığına sahip olmaktadır. Dünyada, Venüs gezegenindeki duruma benzer bir durum beklenmemekle birlikte, yeryüzü insanoğlunun sebep olduğu etkilerle gittikçe ısınmaktadır. Zira geçen yüzyıl içinde atmosferdeki CO₂ miktarı 1/5 oranında artarak 285 ppm'den 348 ppm'e yükselmiştir. Atmosferik radyasyon modelleri temeline göre CO₂ derişimindeki 10 ppm'lik bir artış dünyanın ortalama sıcaklığının 0.1 °C



Şekil 1.1 Hava kirliliğinin kaynakları (Strauss, 1975)



Şekil 1.2 Kuru havanın bileşimi (Stern, 1976)

yükselmesine yol açacaktır. Sanayileşmeyle birlikte gittikçe yükselen CO₂ derişimindeki artışın bu hızla devam etmesi halinde ise yeryüzü sıcaklığı 1.5-3 °C arasında değişecektir. Bazı bilim adamları için 3 °C'lık bir artış normal kabul edilmesine rağmen, dünyanın dönüşü ve ekvator da ısınan havanın kutuplara sirkülasyonu nedeniyle, ısınma kuzey ve güney bölgelerinde ekvator dan daha fazla olacağından pek çok sorunu da beraberinde getirmektedir (Stern, 1976; Çakallı, 1988).

Karbondioksitin yanısıra kirletici bileşen olarak sayılmayan nem de, asit yağışları gibi ikincil kirleticilerin (güneş ışınları ile atmosferde bulunan bazı bileşenlerin önemli miktarda katalitik etkisi sözkonusudur) oluşumuna yol açabilmektedir. Bunun dışında yakıtta bulunan safsızlıklarla, oksijenin veril iş oranı ve şekline, yanma sıcaklığının gereğinden az veya çok oluşuna bağılı olarak, tam yanmanın meydana gelmemesi durumunda oluşan diğ er gaz ve buharlar (CO, SO_x, NO_x, uçucu kül ve yanmamış HC'lar gibi) kirletici nitelik taşıır. Hava kirliliğinde önemli yer tutan partikül aerosol biçimindeki maddelerin tanımları Çizelge 1.1'de verilmiştir (Müezzinoğ lu, 1987; Strauss, 1975; Döğ eroğ lu, 1988; Var, 1990; Arı ve Kul, 1988; Türkoğ lu, 1989).

İstatistikler, dünya nüfusunun 1900 yılında 1.7 milyar, 1974'te 3.9 milyar olduğunu, 2000 yılında ise 7 milyarı bulacağını belirtmektedir. Artan nüfusla beraber enerji tüketiminde de bir artış olacaktır. Zira sanayi kuruluşlarından, üretim artığı pek çok türde gaz, toz ve buhar gerek açıkta bırakılan hammadde, yarı ürün veya üründen dolayı yaygın olarak, gerekse bacalardan yükselti lerek atmosfere bırakılmakta ve insan sağlığı için oldu ğ u kadar ekonomi ve yakıt giderleri açısından da önemli bir enerji kaybı doğ maktadır. Gerçekte, hava kirliliğ i de bir atık, yani madde ve enerji kaybı meselesidir. Bu nedenle madde ve enerji kayıplarını en aza indirmek ve gerekli tüm önlemleri almak gerekir. Çizelge 1.2 ve 1.3'te görüldü ğ ü gibi dünya enerji rezervi hızla tükenmekte ve en fazla enerji tüketimine sanayi kesimi neden olmaktadır (Hannes, 1989; Müezzinoğ lu, 1987).

Ayrılmaz bir bütün olan çevre-enerji konusunda, bilinçsizce yapılan rezerv sarfı ile ortaya çıkan enerji kayıplarını önlemek tüm insanlığın ortak amacı olmalıdır. Zira, meteorolojik ve topoğ rafik koşullar, herhangi bir yolla oluşan kirletici bileşenlerin kolaylıkla taşınmasını sağlayabilmektedir. Böylece bölgeler, ülkeler, hatta kıtalararası bir sorun haline gelen hava kirliliğ inin önlenmesi çalışmaları uluslararası işbirliğini zorunlu kılmaktadır.

Çizelge 1.1 Partikül şeklindeki kirleticilerin tanımlanması (Var, 1990; Strauss, 1975; Müezzinoğlu, 1987; Karpuzcu, 1988; Seinfeld, 1986; Kul, 1991)

Kirletici adı	Açıklama
Parçacık (partikül)	Genellikle 0.001-500 μ boyut aralığında değişen katı ve sıvı kütlelerdir (aerosol, smog, smoke, fly ash, soot vb.)
Aerosol, aerokolloid, aerodisperse sistemler	Gaz ortamı içinde genellikle kolloidal büyüklük aralığında (0.001-1 μ) dağılmış olan pozitif veya negatif yüklü veya yüksüz, katı veya sıvı parçacıklar olup, son yıllarda tüm duman, sis vb. partiküllere toplu olarak verilen isimdir.
Yağmur (rain)	600-10000 μ boyut aralığında atmosferde dağılmış olan, çökebilen sıvı zerrecikleridir.
Sprey (spray)	Gaz içinde dağılmış olan ve boyutları 0.001-1.5 μ arasında değişebilen sıvı zerrecikleridir.
Uçucu kül (fly ash)	1-200 μ boyut aralığında bulunan ve bünyesinde yakıtın da yer aldığı yanma gazlarındaki küllerdir.
Sis (fog)	1.5-100 μ boyut aralığında değişebilen, havada dağılmış ve görüş mesafesi yeterince azaldığında nemin aldığı durum sonucunda görünür aerosol parçacıklarıdır.
Pus (mist)	0.001-10 μ boyut aralığında, herhangi bir buharın kimyasal olarak yoğunlaşması sonucunda meydana gelen sıvı zerrecikleri olup yeryüzeyine yakın veya atmosferde süspansiyon olmuş parçacıklar şeklindeki sudur. Yağmura benzer ve daha şeffaf olması ve aşağı doğru hareket etmesi nedeniyle sisten ayrırt edilebilir.

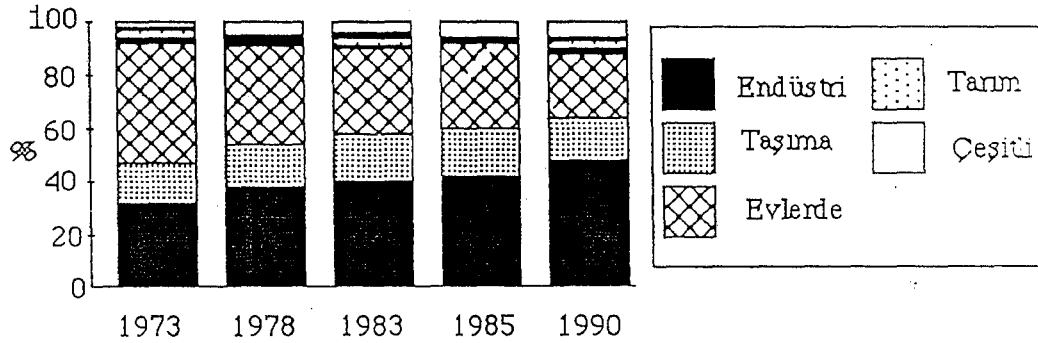
Çizelge1.1 (devam)

Kirletici adı	Açıklama
Grit	200 mesh açıklığındaki elekten geçebilecek boyutta olan, 76 μm 'den daha büyük iri parçacıklardır.
Smog	Atmosferde insan faaliyetleri sonucu oluşan ve yerleşim alanlarının üzerine çöken çeşitli renklerdeki kirletici bulutları ifade eden yapay sistir ve 0.001-0.5 μ boyut aralığında olup "smoke" ve "fog" sözcüklerinin bileşimidir. Los Angeles (fotokimyasal ve taşıt egzozlarından kaynaklanan) ve Londra (yakıtların tam yanmamasından oluşan ve nispeten yüksek SO_2 derişimi ve partikül içeriği ile karakterize edilen) örneklerinde olduğu gibi hava kirlenmesini kabaca tarif eden durumdur.
Fume	Yoğunlaşma, süblimleşme veya kimyasal tepkimeler sonucunda oluşan ve gaz içinde dağılmış durumda olan 0.001-1 μ boyut aralığındaki katı ve sıvı parçacıklardır (Hg, Sn gibi katı maddelerin süblimleşmesi ve tekrar yoğunlaşmasında olduğu gibi).
Smoke	0.001-1 μ boyut aralığında değişen, eksik yanma sonucu açığa çıkan, çoğunlukla karbon ve diğer yanabilen maddeleri içeren parçacıklardır.
Soot (islilik)	0.01-5 μ boyut aralığında, yanma sonucunda yanmamış karbon parçacıklarının toplanmasıyla (aglomere) oluşan durumdur.
Toz	1-10 μ arasında değişebilen, gaz ortamında geçici olarak asılı halde bulunabilen katı parçacıklardır ve kırma, öğütme, patlama gibi mekanik olaylarla üretilmektedir.

Çizelge 1.2 Dünya enerji rezervi (Hannes, 1989)

DÜNYA ENERJİ REZERVİ		(Milyon t SKE)		
World Energy Resources (1987)		" 1 t SKE=29.3 GJ"		
	PETROL (Oil)	DOĞAL GAZ (Natural Gas)	TAŞKÖMÜRÜ + LİNYİT (Coal+Lignit)	TOPLAM (Total)
Rezerv %	156000 14.72	122000 11.51	782000 73.77	1060000 100
Yıllık Tüketim	3606	2056	3040	8702
Kaç Yıl Yeteceği	43	59	257	122

Çizelge 1.3 Sektörlere göre tahmini enerji tüketimi (Hannes, 1989)



Doğanın dengesini bozmamak, dolayısıyla madde ve enerji kaybını minimumda tutabilmek için alınacak her önlemin uzun vadeli olması ve disiplinlerarası işbirliğiyle gerçekleştirilmesi gereklidir. Bunun için de,

- hızla gelişen ve değişen teknolojiye, hızlı ve plansız endüstrileşme, yapılaşma ve nüfus artışına paralel olarak, yöresel / bölgesel / uluslararası durum değerlendirme, çevresel etki değerlendirme ve çözüm işlemleriyle, konunun teknik ve ekonomik ayrıntılarının, periyodik (sık) aralıklarla düzenlenmesi / gözden geçirilmesi,

- sorunların (şikayetler, huzursuzluk, hastalık vb.) net bir şekilde tanımlanması, aydınlatılması, ayrıntılı bir şekilde sınıflandırılarak istatistiksel olarak belgelendirilmesi,
- sorunlara neden olan kaynak / olay / faaliyetlerin görünüm, sosyal, teknik, teknolojik, ekonomik ve hukuksal yönlerden tanımlanması, aydınlatılması, sınıflandırılması ve belgelendirilmesi,
- sabit ve hareketli kaynaklardan doğrudan oluşarak emisyon / imisyon ve işyeri ortamlarında sorun yaratan yanma ve yanma dışı kökenli birincil / ikincil bileşenlerin / parametrelerin etkilerinin araştırılması,
- spesifik olarak belirlenen, sorunlu bölge / kaynak / proses / kirletici bileşenlerin titizlikle ve sürekli olarak izlenmesi / ölçümü / analizi

gereklidir. Ancak yapılacak tüm işlemlerin uygun ve hassas ölçüm aygıtlarının kullanımını gerektirdiği unutulmamalıdır. Nitekim konvansiyonel aygıtlarla kontrol edilen ısı üretilen yakma sistemlerinde, yanmanın modern aygıt ve sistemlerle ölçülüp kontrol edilmeye başlanmasıyla % 15'e varan bir yakıt tasarrufu sağlanabileceği gözlenmiştir. Sadece yakma sistemlerinde değil kırma, öğütme, dövme gibi mekanik işlemlerin yapıldığı proseslerde de kirlilik söz konusu olduğundan, bu tür proseslerdeki kayıpları minimuma indirmek için gerekli parametrelerin (sıcaklık, basınç, nem, debi vb.) de hassas bir şekilde ölçümü gerekmektedir (Kara, 1988).

1.1 Debi ve Nem Parametrelerinin Önemi

Mühendislik uygulamalarının pek çoğunda, gerek genel kapsamlı gerekse hava kalitesini kontrol amaçlı olarak, bir tesisin tasarımından işleyişine kadar tüm basamaklarda gözönüne alınması gereken çeşitli faktörler vardır. Bu faktörleri esas olarak çevresel, mühendislik ve ekonomik faktörler şeklinde üç kategoride ele almak mümkündür;

Çevresel faktörler,

- donanım bölgesi
- mevcut alan
- çevre koşulları

- uygun utilitelerin (güç, su vb.) mevcudiyeti
- maksimum müsaade edilebilir emisyon (hava kirliliği tanımlarına göre)
- estetik koşullar (görünür buhar veya subuharı baca dumanı karışımı gibi)
- hava kirliliği kontrol sisteminin atık su ve toprak kirliliğine katkısı
- hava kirliliği kontrol sisteminin tesisin gürültü seviyesine katkısı.

Mühendislik faktörleri,

- kirlenici karakteristikleri (fiziksel ve kimyasal özellikler, derişim, partikül şekli ve boyut dağılımı)
- gaz akım karakteristikleri (hacimsel akış hızı, sıcaklık, basınç, nem, bileşim, viskozite, yoğunluk, reaktivite, yanabilirlik, korozyonluk, toksisite vb.)
- özel kontrol sisteminin tasarım ve performans karakteristikleri.

Ekonomik faktörler,

- sermaye (donanım, düzen, mühendislik vb.)
- işlem giderleri (utiliteler, bakım vb.)
- donanımını ömrü ve kurtarılma değeri.

Genelde gaz karakteristiklerinin göz önüne alındığı hava kirliliği kontrolünde, önem sırasına göre başlıca gaz özellikleri gazın akış hızı, sıcaklığı ve bileşimidir. Herhangi bir analizde mutlaka doğruluk, tekrarlanabilirlik ve ölçüm için uygun aralık olması istenmekle beraber, kontrol amacıyla yapılan ölçümlerde esas olan doğruluktur. Gaz akımının geçtiği kanal / bacanın boyutları, sıcaklığı, basınç farkı, gaz bileşimi ve özellikle çığlenme noktası ile sıcaklığı, sonuçları direkt olarak etkileyen ve özellikle göz önüne alınması gereken parametrelerdir. Çığ noktasının altında korozyon maddeleri (SO_3 gibi) su damlacıkları üzerinde birikerek bağlantı elemanlarında, gaz temizleme tesisinin kendisinde veya proseste (kazan dairesindeki ekonomizerler gibi) korozyona yol açar.

Yanma gazlarında nem, kullanılan havadan ve yakıttaki H_2O 'den gelir. Atmosferik nemin yüksek olduğu günlerde atık gazlar atmosfer sıcaklığına soğutulduktan sonra hemen tümüyle aşırı doymun hale gelip çığlenme noktasının altındaki sıcaklıklarda bulunan toplama sisteminde nem birikimine yol açar. Yakıtın kükürt içermesi halinde atık gazda SO_2 ve SO_3 bulunacaktır. Oldukça düşük miktarlardaki SO_3 (% 0.005), % 10 subuharı ile birlikte atık gazların çığ noktasının $150\text{ }^\circ\text{C}$ yükselmesine neden olur. Gazların içerdiği SO_3 miktarının bilinmesi çığ noktasının bulunmasını sağlar. Ancak SO_3 miktarının belirlenmesi oldukça zordur (işlemin 10-100 kere tekrarlanması gereklidir) ve SO_2 yavaş

okside olur. Bu durum, % 6'lık saf benzil alkol (inhibitör olarak N/5'lik alkali absorplayıcı çözelti de kullanılabilir) ilavesiyle giderilebilir. Benzaldehit, manitol veya p-amino fenol hidroklorür kullanımı da mümkündür. Burada SO₃ sülfat şeklinde belirlenir. Çiğ noktası yükselmesi H₂SO₄'ün (SO₃ olarak da almak mümkündür) kısmi basıncının subuharının kısmi basıncına oranı şeklinde Şekil Ek-A.1'de verilen grafikten basitçe bulunabilir (Strauss, 1975; Theodore and Buonicore, 1982; Harrison and Perry, 1986).

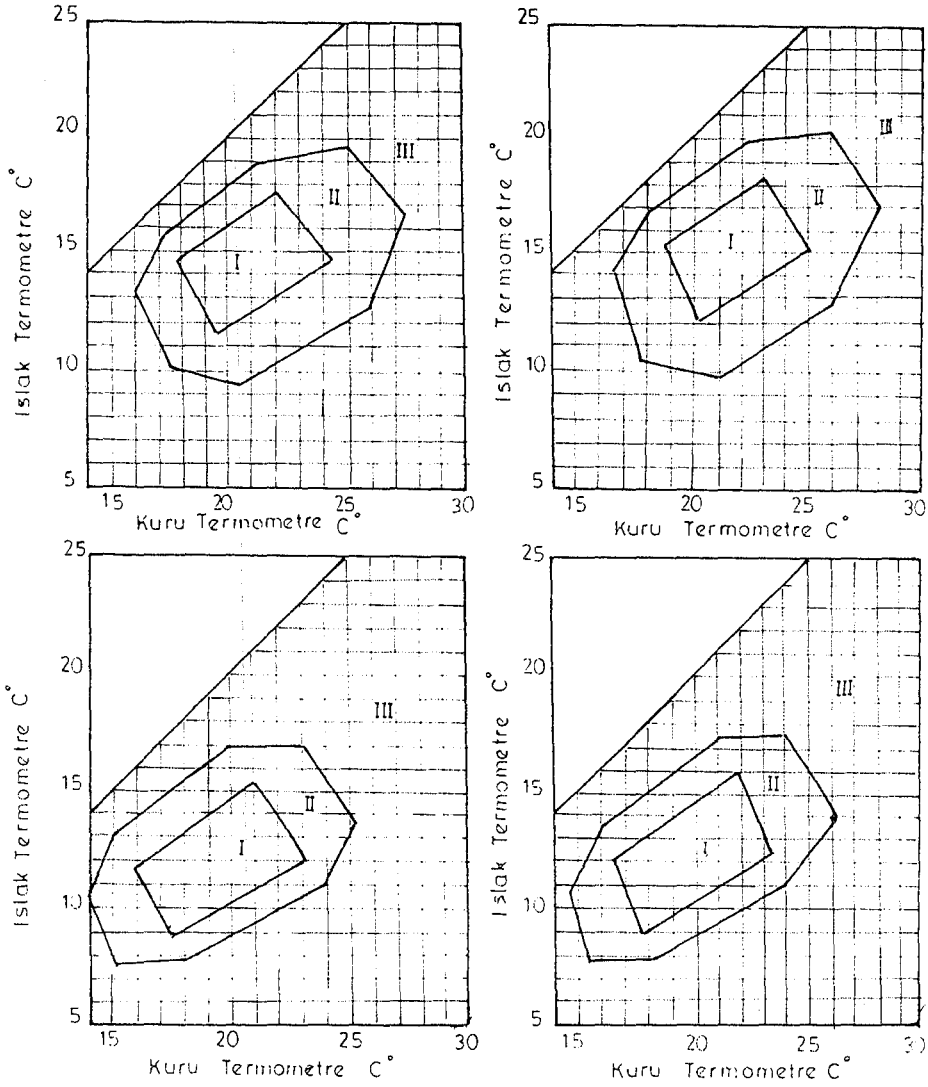
Baca gazındaki ve havadaki subuharı miktarının bilinmesi, kütle ve enerji denkliklerinin kurulabilmesi ve stokiyometrik olarak derişimlerin nemsiz baza göre tespiti için gereklidir. Bu durum sadece proste (fırın hesaplamaları gibi) değil, atmosferdeki nemin (hava sıcaklığının azalmasıyla yoğunlaşarak sis oluşumuna yol açtığından) belirlenmesinde de önemlidir. Hava içinde bulunan aerosoller bu yoğunlaşmada çekirdek görevi görürler. Dolayısıyla sis oluşumu daha çok meskun bölge atmosferi gibi kirlenmiş havada meydana gelir ve yeryüzeyinin güneşten ısınmasını engelleyerek inversiyon tabakasının ömrünü uzatır. Düşük nem suda süspanse olmuş partikül derişimlerinin artışına da yol açar. Nitekim, düşük sıcaklık ve sis birleştiğinde, ürkütücü ve öldürücü hava kirliliği olaylarının arttığı görülmüştür. Havada bulunan su zerreciklerinin sebep olduğu en önemli dört olayı şu şekilde özetlemek mümkündür (Karpuzcu, 1988; Griswold, 1946; Seinfeld, 1986):

- Sisler havadaki SO₃'ü ve diğer asidik karakterli gazları H₂SO₄ ve benzeri asitler haline çevirirler.
- Sisle birlikte sülfat, nitrat, klorür, amonyum, kalsiyum ve hidrojen iyonu gibi başlıca kimyasal bileşenlerin derişimleri de artar; su damlacıklarında çözünerek asidik zerrecikler oluştururlar. Daha sonra havanın ısınmasıyla buharlaşma meydana gelir ve bağıl nemle birlikte pH tekrar düşer.
- Vadilere çöken sisler, güneş ışınlarının yeryüzüne etkisini azalttığından, vadinin ısınması gecikerek meydana gelen inversiyon tabakası uzun süre vadi üzerinde kalır ve kirleticiler ortamdaki ayrılmaz.
- Havadaki nem, sıcaklığın yükseklikle değişme hızına, dolayısıyla atmosferdeki olayların kararlılığına da etki eder.

Aşırı nem, malzemelerde iletkenlik değişimi, çürüme ve paslanmaların yanısıra değişik zararlı virüs ve bakterilerin faaliyete geçmesi, çoğalması, bazı yararlı mikroorganizmaların tahribi, toprağın veriminin düşmesi gibi ekonomik kayıplara yol açar; insan sağlığı için de yıpratıcı ve hastalık yapıcıdır.

Amaç, çevre sağlığı ve dolayısıyla insan sağlığının korunması olduğuna göre, sanayileşme ve teknolojik gelişmelere paralel olarak işyerlerinde üretken faktör olan çalışan kişilerin sağlığı da, üzerinde önemle durulması gereken bir konudur. İş ortamının aydınlatılması, ortam sıcaklığı, nem, gürültü, titreşim, toz, iyonizan ışınım, zehirli madde, gaz ve buharlar, yüksek ve alçak atmosferik basınç gibi etkenlerin sağlıklı standartlarının saptanması ve çevresel etkenlerin zararlı etkilerinden korunma, iş verimliliğini etkiler. İşyeri ortamında ısı dengenin kurulması çok önemlidir. Bu denge, ortam sıcaklığı, nem oranı, hava akımı ve çevrede ısı yayan veya emen maddelerin bulunması ile sağlanır. Nem, normal sıcaklıklarda fazla etkili olmadığı halde sıcaklığın yükseldiği veya düştüğü durumlarda giderek artan ölçüde zararlı etkiler gösterir. Çok sıcak ve nemli bir hava vücuttan ısı atılmasını güçleştirir ve ısınmış bir vücut soğutucu etkilere karşı oldukça duyarlıdır. Bazı endüstriyel tesislerde, özel koşullar veya teknolojik nedenlerle yüksek bir bağıl nem düzeyinde çalışılması zorunludur. Örneğin maden işletmelerinde bağıl nem oldukça yüksektir ve her 35 m'de sıcaklık 1 °C artar. Çamaşırhaneler, boyahaneler, şeker fabrikaları, haddeleme tezgahları ve tekstil fabrikalarında da nem açısından oldukça elverişsiz koşullar mevcuttur. Şekil 1.3'de değişik çalışma koşulları, atmosfer sıcaklığı, nem ve değişik hava esintilerine göre rahatlık bölgeleri, Şekil 1.4'de ise değişik hava sıcaklığı ve bağıl nem derecelerine göre bunalım eğrisi verilmektedir (Velicangil, 1987; Erkan, 1979).

Yüksek bağıl neme sahip tropikal bölgelerde (Bangkok % 90-94, Kalküta % 79-88, Şanghai % 87-94, Osaka % 81-89, Singapur % 76-82) bulunan tekstil fabrikalarındaki sorunlar oldukça karmaşıktır. Bağıl nemi düşük bölgelerde suni nemlendirme sağlanarak proseslerin uygun işlenmesi ve çalışanların sağlığı kontrol altında tutulabilirken, yüksek bağıl nemli bölgelerde bu mümkün değildir. Özellikle eğirme ve dokuma proseslerinin bulunduğu yerlerdeki sıcaklık, makinalardan üretilen ısı nedeniyle dışarıdaki sıcaklıktan daha yüksektir (ILO, 1983; Erkan, 1979).



Yukarı sol: Oturarak çalışma, rüzgar süratli < 0.20 m/s

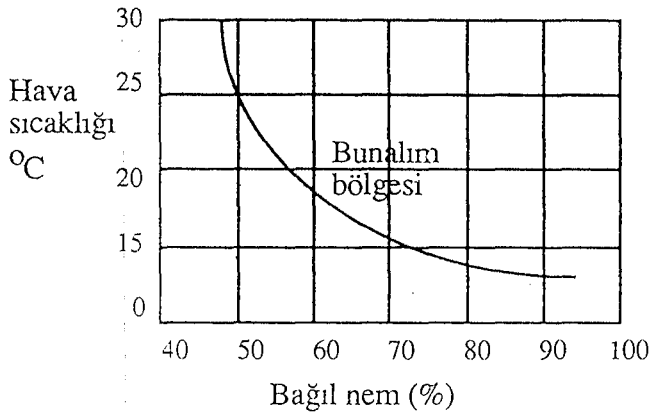
Yukarı sağ: Oturarak çalışma, rüzgar 0.20-0.30 m/s

Alt sol : Ağır bedeni çalışma, rüzgar < 0.20 m/s

Alt sağ : Ağır bedeni çalışma, rüzgar 0.20-0.30 m/s

I.Rahat çalışılan bölge, II.Dayanılabilir bölge, III.Dayanılmayan bölge

Şekil 1.3 Değişik çalışma koşulları, atmosfer sıcaklığı (kuru termometre), nem (kuru ve ıslak termometre farkı) ve değişik hava esintilerine (m/s) göre rahatlık bölgeleri (Velicangil, 1987).



Şekil 1.4 Değişik hava sıcaklığı ve bağıl nem derecelerine göre bunalım eğrisi (Lancaster-Cantens-Ruge'a göre) (Velicangil, 1987).

İşyerindeki hava akımı düzeyi, ortamın sıcaklığına ve nem oranına bağlı olarak ısı dengesi etkiler. Çevredeki elemanlar (duvar, taban, tavan, değişik sıcaklıktaki metal parçaları, açık ocak, ergimiş metal vb.) ısı ısıyarak veya soğurarak ortamın ısı dengesini bozabilir. İngiltere'de yapılan araştırmalarda, hafif fiziksel iş yaparken oda sıcaklığının en uygun değerinin 18.3 °C, ağır fiziksel işlerde ise 12.3-15.6 °C olduğu belirlenmiştir. Normal ortam sıcaklığında nem düzeyinin % 70'ten yukarı çıkmaması gerekir. Sıcak bir iş ortamında ise nemsiz hava nefes alma yolları dokusunun kurummasına neden olur. Sakin ve hafif işlerde, uygun bir iklim hissi verebilecek akım hızı ve bağıl nem değerleri Çizelge 1.4'te verilmiştir (Erkan, 1979; Velicangil, 1987).

Baca veya kanaldan geçen gaz miktarının belirlenmesi, proses akışının kontrolü ve verimlilik kadar çalışma koşullarının optimizasyonu açısından da önemlidir. İncelenen sistemlerde momentum denkliklerinin kurulabilmesi ve bunların çevre sağlığı ve sosyal yaşama etkilerinin belirlenebilmesi için uygun akım ölçüm yönteminin seçilmesi gereklidir. Ancak normal sıcaklık ve basınçlarda pek çok ölçüm tekniği mevcutken, yüksek sıcaklık ve basınçlarda ölçüm tekniklerinin sayısı oldukça kısıtlıdır (Kirk-Othmer, 1978)

Çizelge 1.4 Sakin ve hafif işlerde, uygun bir iklim hissi verebilecek hava akımı hızı ve bağıl nem değerleri (Velicangil, 1987)

Sıcaklık (°C)	Hava akımı (m/s)	Bağıl nem (%)
19.0-21.0	0.1	
19.5-21.5	0.2	
21.5-23.5	0.5	30-60
23.5-25.0	1.0	
Daha yüksek sıcaklık	Daha hızlı hava akımı	

Hava akımı hızının 1-2 m/s olduğu hallerde aşağıda bildirilen sınırların üzerine çıkılmamalıdır:

25.5	1-2	60
26.0	1-2	70
27.0	1-2	80

Rahat bir iklim hissini elde edilmesinde şu esaslar daima akılda tutulmalıdır:

1. Normal çalışma koşulları için uygun olan sıcaklıklar, 22 °C'nin altındadır (işin ağırlığına göre 12-22 °C arasında oynar).
2. Sıcaklık, bu bölgenin üst sınırından itibaren yükseldikçe, psişik ve fizyolojik bozukluklar beklenir (kısa bir sürede dayanılabilecek en yüksek sınır 35-44 °C'dir).
3. Çalışma çevresinin soğuması halinde de bazı rahatsızlıklar (harekette zorlanma, huzursuzluk, konsantrasyon kabiliyetinin ve becerinin önemli derecede zarar görmesi) beklenir.

1.2 Ölçüm Gereksinimleri, Standartlar ve Yasal Kısıtlar

Yıllardan beri bütün atıklarını direkt olarak atmosfere vermeye alışmış olan ve bunların rüzgarlar yardımıyla kaybolup gittiğine inanan insanoğlunu, havaya bıraktığı emisyonları sınırlandırması veya kontrol cihazları için para ödemesi gerektiğine inandırmak oldukça zordur. Özellikle sanayicilerin, bir gün emisyonlarını önlemek zorunda kalacaklarını idrak etmeleri pek kolay olmayacaktır. Ancak insanoğlu, neden olduğu kirliliğin oranını bilmek ve gerekli ölçümleri yaparak bunları standartlara,

yönetmeliklere göre yorumlamak ve gidermek durumundadır. Bir bölgedeki hava kalitesini istenilen seviyede tutmak için belirlenen kirletici derişimleri, hava kalitesi standartlarını oluşturur. Dünya'da ve Türkiye'de hava kalitesinin korunması konusunda yapılan bazı yasal çalışmalar ve ABD'nde bazı bileşenlere ait birincil ve ikincil standartlarla dayandıkları ölçüm yöntemleri Döğeroğlu (1988), Var (1990) ve Karpuzcu (1988) tarafından yapılan çalışmalarda geniş bir şekilde derlenmiş ve incelenmiştir.

Ülkemizde 1930'lu yıllarda Umumi Hıfzısıhha Kanunu ve buna bağlı Tüzükle başlayan yasal kısıtlar, 1983 yılında 2872 sayılı Çevre Kanunu ile devam etmiş ve nihayet yıllardan beri ihtiyaç duyulan ve pek çok tanımsızlık / belirsizliğin ortadan kalkmasını sağlayan bir gelişme olarak nitelenebilecek 2 Kasım 1986 tarih, 19269 sayılı Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği çıkarılmıştır. Böylece kirli havanın tanımı sayısal olarak yapılabilmiş, yeni yatırımlarda modern ihtiyaçlara uygun ölçüler getirilmesinin yasal yolları sağlanabilmiştir. Ancak bu yönetmeliğin, sanayimiz için çok yabancı sayılan ve ekonomik anlamda dışsal kabul edilen bir sorun olan hava kirliliği kontrolü konusunda oldukça kısa geçiş süreleri tanıdığı bir gerçektir. Aynı yönetmelikte, hava kirleticilerinin atmosferde dağılmasında büyük önemi olan bacanın konumu, sistem yapısı, boyutları, bakım ve işletme gibi özellikleri ile ilgili bazı zorlayıcı hükümler de getirilmiştir. Bacanın tasarımı ve boyutlandırılmasında, sistemin ısıl kapasitesi, sistemden yayılan hava kirleticilerinin kütledebileri ve baca gazı sıcaklığı oldukça önemli olduğundan çekiş kayıpları azalmalı, asidik korozyon sebebiyle iç yüzeylerin tahribatı gibi oluşumlar önlenmeli ve bacadaki gaz çekiş hızları yönetmeliklerde öngörülen sınır değerlerin üstünde olmalıdır (Müezzinoğlu, 1987). Bu durumun göz önüne alındığı HKKY'de izne tabi tesisler için belirtilen debiye bağlı emisyon sınır değerleri Çizelge 1.5 (a)'da, debiye ilgili diğer hükümler Çizelge 1.5 (b)'de, hava kirlenmesi seviyelerinin tespitinde kirletici bileşen ve debi arasındaki ilişki Çizelge 1.5 (c)'de, kirletici vasfı yüksek tesisler için özel emisyon sınırlarıyla ilgili hükümler Çizelge 1.5 (d)'de, gaz biçimindeki emisyonların sürekli ölçümü Çizelge 1.5 (e)'de ve izne tabi tesisler için nemle ilgili emisyon sınır değerleri Çizelge 1.5 (f)'de derlenmiştir.

Çizelge 1.5 (a) Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği'nde izne tabi tesisler için debiye bağlı emisyon sınır değerleri

Emisyon Tipi	Kütleli Debi (kg/hr)	Emisyon Miktarı (mg/m ³)
Doldurma, ayırma, eleme, taşıma, kırma ve öğütme tesislerinden çıkan gazlarla atılan toz emisyonu	<3.0 >3.0	300 150
Atık Gazlardaki Özel Toz Emisyonları		
(I.sınıfa girenler);		
Bakır dumanı, civa ve bileşikleri, çözünen flor bileşikleri, fosfor pentoksit, kadmiyum ve bileşikleri, kurşun ve çözünen bileşikleri, krom VI ve bileşikleri, nikel ve bileşikleri, selen ve çözünen bileşikleri, tellur ve çözünen bileşikleri, talyum ve bileşikleri, uranyum ve bileşikleri, vanadyum ve bileşikleri,	> 0.1	20
(II.sınıfa girenler);		
Antimon ve çözünen bileşikleri, baryum bileşikleri, bortriflorür, çinko ve bileşikleri, florit minerali, gümüş ve bileşikleri, iyodür ve bileşikleri, kalsiyum florür, kobalt bileşikleri, kristobalit, kieselguhr kuvars, katran, koyu katran, kuvars minerali, kurum, stronsiyum ve bileşikleri, tozlarda organik bileşikler, (antrasen, aminler, 1-4 benzokinon, naftalin)	> 1.0	50
(III.sınıfa girenler);		
Alüminyum karbür, alüminyum nitrür, amonyum bileşikleri, bakır ve çözünen bileşikleri, baryum sülfat, bitümler, bizmut, bor bileşikleri, ferrosilisyum, fosfatlar, kalsiyum siyanamid, kalsiyum hidroksit, kalsiyum oksit, magnezyum hidroksit, magnezyum oksit, molibden ve çözünen bileşikleri, silisyum karbür, volfram ve bileşikleri.	> 3.0	75

Çizelge 1.5(a) (devam)

Emisyon Tipi	Kütleli Debi (kg/hr)	Emisyon Miktarı (mg/m ³)
I. ve II. sınıfa giren özel toz emisyonlarının birarada bulunması durumu		50
I. ve III. veya II. ve III. sınıflara giren toz emisyonlarının birarada bulunması durumu		75
Gaz biçimindeki anorganik (Cl ⁻) emisyonları	> 3.0	30
Gaz biçimindeki anorganik (F ⁻) emisyonları	> 150.0	5
Organik buhar ve gaz emisyonları		
I.sınıfa girenler, HKKY (Ek-4)	> 0.1	20
II.sınıfa girenler, HKKY (Ek-4)	> 3.0	150
III.sınıfa girenler, HKKY (Ek-4)	> 6.0	300
Birden fazla sınıfa ait organik bileşiklerin birlikte atılması durumunda, yukarıda verilen değerlerin aşılması kaydıyla,		300
Kanser yapıcı madde emisyonları		
I.sınıfa girenler, HKKY (Ek-5)	> 0.5 (g/hr)	0.1
II.sınıfa girenler, HKKY (Ek-5)	> 5.0 (g/hr)	1.0
III.sınıfa girenler, HKKY (Ek-5)	> 25.0 (g/hr)	5.0
Kanser yapıcı maddelerden I. ve II. sınıftaki maddelerin birarada atılması durumu		1.0
Kanser yapıcı maddelerden I. ve III. veya II. ve III. sınıftaki maddelerin birarada atılması durumu		5.0

Çizelge 1.5 (b) Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği'nde debiyle ilgili diğer hükümler

Madde 7, bent 2	Atık gazlarda bulunan toz şeklindeki emisyon Çizelge 1.5 (a)'daki değerlerle sınırlandırılmamışsa, bent 3'teki sınırlar ile Şekil Ek 1.1'deki sınırları aşamaz.
Madde 8, bent 1	Atık gazlar serbest hava akımı tarafından, engellenmeden taşınabilecek biçimde atmosfere verilmelidir. Genelde bu amaçla baca kullanılmalı ve gazların bacadan çıkış hızları tesis anma gücünde çalıştırılırken en az 6 m/s olmalıdır. Ancak, anma ısıl gücü 300 KW'ın altında olan tesislerde gaz çıkış hızı 6 m/s'nin altında olabilir.
Ek-11, bent 4.2	Isıl kapasitesi 100 Gj/hr (27778 KW) ve üstünde olan katı ve (5 ve 6 nolu) fuel oil ile çalışan yakma sistemleri ile 15 kg/hr ve üstünde toz emisyonu yayan (bu emisyona yanıcı partiküller de dahildir) tesisler toz emisyonu konsantrasyonunu ölçen yazıcı bir ölçü cihazı ile donatılacaktır.
Ek-3	Toz emisyonunda bulunan tesisler; I. sınıfa dahil olup da 2 kg/hr'in üzerinde II. sınıfa dahil olup da 5 kg/hr'in üzerinde emisyon yayan tesislerde bu maddelerin günlük emisyonları tespit edilecektir

Çizelge 1.5 (c) Hava kirlenmesi seviyelerinin tespitinde kirletici bileşen ve debi arasındaki ilişki (Resmi Gazete, 1986)*

Yayılan zararlı madde	Normal işletme koşullarında ve haftalık işgünlerindeki işletme saatleri için kütleli debiler (kg/hr)**
Toz	15.0
Kurşun	0.5
Kadmiyum	0.01
Talyum	0.01
Klor	20.0
Klorlu hidrojen ve gaz halde anorganik klor bileşikleri	20.0
Florlu hidrojen ve gaz halde anorganik flor bileşikleri	1.0
Karbon monoksit	1000.0
Kükürt dioksit	60.0
Azot dioksit	40.0

* a) Bacadan verilen emisyonlar çizelgedeki değerleri aşmıyorsa,

b) Baca dışındaki yerlerden yayılan emisyonlar çizelgedeki değerlerin 1/10'undan küçükse hava kirlenmesini temsil eden değerlerin belirlenmesine gerek yoktur.

** Çizelgedeki emisyonlar, tesisin tamamından yayılan saatlik kütleli debilerdir.

Çizelge 1.5 (d) Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği'nde yer alan kirletici vasfı yüksek tesisler için özel emisyon sınırları

Tesis adı	Açıklama
Ev çöpleri ve benzerlerinin yakma suretiyle tamamen veya kısmen yok edildiği tesisler (Ek-7, II.Grup Tesisler)	<p>g) Atık gazlardaki toz emisyon 100 mg/m^3 değerini aşmamalıdır. Emisyon sınır değerleri aşağıdaki esaslar için verilmiştir:</p> <p>*kütleli debisi 0.75 ton/hr'e kadar olan tesislerde baca gazı hacimsel oksijen miktarı % 17</p> <p>*kütleli debisi 0.75 ton/hr ve üzerinde olan tesislerde baca gazı hacimsel oksijen miktarı % 11 esas alınacaktır.</p> <p>k) Çöp kütleli debisi 0.75 ton/hr'e kadar olan tesislerde inorganik gaz emisyon değerleri aşağıdaki sınır emisyon değerlerini geçmemelidir:</p> <p>*klor bileşikleri (Cl^-) 6.0 kg/hr</p> <p>*flor bileşikleri (F^-) 0.2 kg/hr</p> <p>l) Çöp kütleli debisi 0.75 ton/hr ve üzerinde olan tesislerde atık gazdaki gaz biçimindeki emisyon, aşağıdaki sınır değerlerini geçmemelidir:</p> <p>*klor bileşikleri (Cl^-) 100.0 kg/hr</p> <p>*flor bileşikleri (F^-) 5.0 kg/hr (emisyon sınır değerlerinde % 11 hacimsel oksijen esas alınmıştır)</p> <p>m) Kütleli çöp debileri 0.75 ton/hr'in üzerinde olan tesisler, toz ve gaz biçimindeki klor ve flor bileşikleri emisyonlarını sürekli kaydeden bir ölçme aygıtı ile donatılmalıdır.</p>
Kupol ocakları (Ek-7, VI.Grup Tesisler)	<p>b) Ergitme kapasitesi 14 ton/hr ve üzerinde olan kupol ocaklarında, ergitme süresince meydana gelen atık gazlar toplanarak bir toz arıtma tesisine gönderilmelidir. Ergitme kapasitesi 14 ton/hr 'e kadar olan kupol ocaklarında da aynı yöntem uygulanmaya çalışılmalıdır.</p>

Çizelge 1.5 (d) (devam)

Tesis adı	Açıklama
HF üreten tesisler	<p>Ergitme kapasitesi 20 ton/hr 'in üzerindeki kupol ocaklarında ocak gazları tamamen toplanmalı ve arıtılmalıdır.</p> <p>c) Toz emisyon sınırları: Ergitme kapasitesi 14 ton/hr 'e kadar olan tesislerde toz emisyonlar Şekil Ek 1.2'den elde edilen sınır değerlerini aşmamalıdır. Ergitme kapasitesi 14 ton/hr 'in üzerinde olan kupol ocaklarında ton demir başına bacadan yayılan toz miktarı 0.250 kg 'ı geçmemelidir.</p> <p>a) HF debisinin 150 kg/hr ve üzerinde olduğu asit üretim, doldurma ve artık hazırlama tesislerinde, atık gazlardaki HF emisyonu Şekil Ek 1.3'den elde edilen sınır değerleri aşmamalıdır.</p> <p>d) Son yanma uygulanması durumunda SO₂ emisyonu 1 ton/hr ve üzerinde bekleniyorsa, son yanmaya girmeden önce H₂S, elementel kükürt veya H₂SO₄ 'e dönüştürme gibi ek yöntemlerle azaltılmalı veya son yanmadan çıkan atık gazdan kükürt ayrıştırılmalıdır.</p>
Sunta ve benzeri ağaç ürünleri üretim tesisleri (Ek-7, XI.Grup Tesisleri)	<p>c) Diğer tüm ağaç işleme tesisleri atık gazlarında toz biçimindeki emisyon değerleri Şekil Ek 1.4'den elde edilen sınır değerlerini aşmamalıdır.</p>

Çizelge 1.5 (e) Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği'ne göre gaz biçimindeki emisyonların sürekli ölçümü *

Yayılan zararlı madde	kütlesel debi (kg/hr)
Kükürt dioksit	100.0
Klor	1.0
Organik bileşikler (karbon olarak verilmiştir)	10.0
Azot oksit (NO olarak verilmiştir)	20.0
Organik gaz biçimindeki klor bileşikleri (Cl ⁻ olarak verilmiştir)	1.0
Hidrojen sülfür	1.0
İnorganik gaz biçimindeki flor bileşikleri (F ⁻ olarak verilmiştir)	2.0
Karbon monoksit	5.0

* Bir tesisten, yukarıda verilen maddelerin herhangi birisi belirtilen miktarın üzerinde emisyon olarak yayılıyorsa, bu sınırları aşan maddeler, yazıcı ölçü aletleri ile sürekli olarak ölçülmelidir (ölçüm kayıtları tesisi işleten tarafından en az 5 yıl muhafaza edilmelidir).

Çizelge 1.5 (f) Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği'nde nemle ilgili emisyon sınır değerleri

Madde	Açıklama
Madde 7 bent 4 (3.prg)	Tozlu maddelerin üretim / parçalama / tasnif / doldurma ve diğer işlemlerinin yapıldığı makinalarda, şayet üst yüzeydeki nem oranı en az % 10 değilse, çapı 2 mm'den küçük, öğütülmüş tozlu maddelerin taşınması kapalı sistemlerle ve kapalı alanlarda yapılır.
Madde 7 bent 5 (2.prg)	Açıkta depolanan yığma malzemenin üst tabakalarında nem % 10'da muhafaza edilir.
Madde 7 bent 6	Toz yapan yanma ve üretim artıklarının taşınmasında, taşınan malzemenin tozumayı önleyecek derecede nemli olmaması halinde kapalı taşıma sistemleri kullanılır.
Madde 7 bent 7	Toz biçimindeki emisyonu tutan filtrelerin boşaltılmasında toz emisyonunu önlemek için toz, kapalı sistemle boşaltılır veya boşaltma sırasında nemlendirilir.
Madde 8 bent 4 (3.prg)	Bağıl nem miktarının % 90'ın üzerine çıkması halinde uyarı kademelerindeki kirlilik derecelerinin % 10 eksiğinde bile ilgili kademenin tedbirleri uygulanır.

Endüstriyel tesislerden atmosfere verilen kirlenici bileşenlerin debiye bağlı emisyon değerleri diğer ülkelerde üzerinde önemle durulan bir konu olmuş ve bu amaçla pek çok standart oluşturulmuştur. BPM (Best Practicable Means) (İngiltere) standartlarına göre, çeşitli proseslere uygulanan sayısal emisyon sınırları Çizelge 1.6 (a)'da, debi ve nemle ilgili hükümler ise Çizelge 1.6 (b)'de verilmiştir.

11 Ocak 1971 tarih, 14765 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Tüzüğü'nde yer alan işyeri ortamı ve işçi sağlığı ile ilgili bazı maddeler ise Çizelge 1.7'de verilmiştir.

1.3 Amaç

Bu çalışmanın amacı, emisyon, imisyon (açık hava) ve işyeri atmosferinde hava kirliliği ölçümlerinde ve kontrol işlemlerinde debi ve nem tayinlerinin yerini ve önemini vurgulamaktır. Özellikle yüksek sıcaklık ve basınçlarda önem arzeden bu durum için henüz belli bir ölçüm yönteminin olmaması böyle bir çalışmayı gerekli kılmıştır. Yakma kaynaklı bir birimde (soba) kömür yakarak gerçekleştirilen çalışmada emisyon ölçümlerinin yanısıra Eskişehir dahilinde Tepebaşı mahallinde Üniversitemizin Yunussemre Kampüsünde asılı partikül, kükürt oksit ve azot oksit için imisyon ölçümleri de yapılmıştır.

Çizelge 1.6 (a)BPM 1 (Best Practicable Means) standartlarına göre çeşitli proseslere (scheduled processes) uygulanan sayısal emisyon sınırları

Proses	Prosesin tanımı	Kontrol edilen madde	Uygun sınır	
Arsenik	Arsenik içeren prosesler			
	Toplam hacimsel akış < 140 m ³ /dk > 140 m ³ /dk	As ₂ O ₃	0.115 g/m ³ 0.046 g/m ³	
Bakır	Bakır alaşımının üretimi veya geri kazanımını tanımlayan prosesler			
	Toplam hacimsel akış < 700 m ³ /dk 700-1400 m ³ /dk > 1400 m ³ /dk	Partikül	0.46 g/m ³ 0.46-0.23 g/m ³ 0.23 g/m ³	
		Metal buharı (fume)	0.115 g/m ³	
		Bakır	0.115 g/m ³	
	Emisyonlar içinde olabilecek diğer elementler			
		Zn	0.115 g/m ³	
	Toplam hacimsel akış < 200 m ³ /dk 200-4000 m ³ /dk > 4000 m ³ /dk	Cd	0.070 ve 150 g/m ³ 0.012 g/m ³ 0.012 g/m ³ ve 700 g/hr	
	Toplam hacimsel akış < 200 m ³ /dk 200-4000 m ³ /dk > 4000 m ³ /dk	Pb	0.115 g/m ³ ve 300 g/hr 0.023 g/m ³ ve 2700 g/hr 0.012 g/m ³ ve 5400 g/hr	
	Kurşun	Tanımlanmış proseslerde toz (dust) veya metal buharı(fume) kurşun emisyonları, toplam emisyon hacmiyle sınıflandırılmış		
		Toplam hacimsel akış < 200 m ³ /dk 200-4000 m ³ /dk > 4000 m ³ /dk	Pb	0.115 g/m ³ ve 270 g/hr 0.023 g/m ³ ve 2700 g/hr 0.115 g/m ³ ve 5400 g/hr
Toplam hacimsel akış < 700 m ³ /dk 700-1400 m ³ /dk > 1400 m ³ /dk		Partikül	0.46 g/m ³ 0.46-0.23 g/m ³ 0.23 g/m ³	
Mincral		Yol taşlarını kaplama (roadstone coating plant) tesisleri		
		Toplam hacimsel akış < 700 m ³ /dk 700-1400 m ³ /dk > 1400 m ³ /dk	Partikül	0.46 g/m ³ 0.46-0.23 g/m ³ 0.23 g/m ³
		Hareketli tesisler (all mobile plant)	Partikül	0.23 g/m ³

Çizelge 1.6 (b) Debi ve nemle ilgili BPM standartları

Proses Türü	Açıklama*
Mineral işleri (kum kurutucular ve soğutucular) BPM 2 / 79	a,b, j, k
Petrol işleri (PVC polimer tesisleri) BPM 3 / 79	a, b, f, k, l
Hidroflorik asit işleri (HF üretimi) BPM 4 / Ekim 1988	e, j, k, m
Hidroklorik asit işleri BPM 5 / Şubat 1981	a, b, e, g, h, j, k, m
Mineral işleri (toplanmış agregatlar) BPM 6 / Şubat 1981	a, b, j, k
Metal geri kazanım işleri BPM 7 / Nisan 1981	a, b, c, j, k, m
Mineral işleri (plaster) BPM 8 / Temmuz 1981	a, b, e, j, k, l
Alüminyum (ikincil) işleri BPM 9 / Temmuz 1981	a, b, e, j, k, m
Amin işleri BPM 10 / Ekim 1981	a, e, j, k
Kimyasal atık giderici yakma (incineration) işleri BPM 11 / Ekim 1981	a, b, e, h, j, k, m
Demir ve çelik işleri (elektrik güç fırınları ve yardımcı prosesler) BPM 12 / Mart 1982	a, b, c, j, k
Mineral işleri (yol taşları) (roadstone tesisleri) BPM 13 / Nisan 1982	a, b, c, i, j, k
Çimento işleri BPM 14 / Nisan 1989	b,n
Mineral işleri (perlitin patlatılması) BPM 15 / Eylül 1984	b, j, k
Kurşun işleri BPM 16 / 85 Kurşunun kontrolü: hava örnekleme teknikleri ve stratejileri (revised 1986)	b, c, k, m, u, ü
Sülfürik asit (II.sınıf) işleri BPM 17 / 85	b, h, o, p
Klorür işleri BPM 18 / 85	b, e, j, m, p
Amonyak işleri (amonyak üretimi) BPM 19 / Temmuz 1986	e, h, j, m, p

Çizelge 1.6 (b) (devam)

Proses Türü	Açıklama*
Demir ve çelik işleri (temel oksijen çeliği tesisleri) BPM 20 / 87	b, e, j, k
Demir ve çelik işleri (yüksek fırınlar) BPM 21 / 87	e, i, j, k
Demir ve çelik işleri (machine scarfing) BPM 22 / 87	b, e, j, p
Demir ve çelik işleri (maden cevheri hazırlama) BPM 23 / 87	j, k
Nitrik asit işleri (nitrik asit üretimi) BPM 24 / Mayıs 1987	e, j, r
Kimyasal gübre işleri BPM 25 / Nisan 1987	b, e, i, j, m, p
Amonyak işleri (amonyum nitrat ve amonyum fosfat üretimi) BPM 26 / Nisan 1987	b, e, i, j, m, p

* Açıklama :

- Burada pratik olarak verilen emisyon sınırları, emisyonların örnekleme ve analizlerindeki zorlukları dikkate alarak ve endüstriyel koşullar altında bacalar ve kanallardaki akım hızları ölçülerek belirlenmiştir. Duman (smoke), toz (dust), grit ve metal buharı (fume) içeren partikül emisyonlarına göre referanslar alınmıştır.
- Tüm gaz hacimleri, subuharı (veya CO₂) içeriği için düzeltme yapmaksızın 15° C ve 1 bar. basınçta ölçülerek tanımlanmıştır.
- Orifis tipi (kapalı yüzey) bir örnekleme başlığı ile orifise emiş hızı 1.25 + % 10 m/s ve 4mm. çapındaki orifise giriş hızı 1 l/dk ± % 5 olmalıdır. Pompa, uygun akım hızında en az 8 hr. sürekli çalıştırılmalıdır.
- Yanma gazları için bahsedilen tüm sınır değerleri 15° C ve 1 bar. referans koşullarda, kuru ve oksijen içeriğine göre düzeltilmiş olup örnekleme noktasında kuru olarak ölçülmüş ve yağ yanması için % 3, kömür yanması için % 6 alınmıştır. Yanmanın olmadığı gazlarda sınır değerler 15° C ve 1 bar. da su içeriği için düzeltme yapmaksızın tanımlanmıştır.
- Emisyonların tutulmasında yağ yöntem kullanılmışsa, baca veya herhangi bir çıkıştan verilen emisyonlar su damlacıklarından bağımsız olmalıdır.
- Monomer davranışı gösteren çeşitli birimlerde havaya verilen emisyon aşağıdaki ortalama temeli içermelidir:
 - yeni tesiste, 0.1 kg VCM /ton PVC'den fazla olmamalıdır.
 - mevcut tesiste, 0.4 kg VCM /ton PVC'den fazla olmamalıdır.

Yine belirlenen ortalama temelde, buhar ekstraksiyon sisteminde normal işlem sırasında vinil klorür monomerinin emisyonu 0.2 kg VCM / ton PVC'yi aşmamalıdır. 1 Ocak 1981'de yapılmış mevcut tesislerde, amaçlanan azaltılmış emisyonlar 0.5 kg VCM /ton PVC'den az olmalıdır.

Reaktör vakum pompalarından havaya verilen emisyonlar (kuru proses) belirlenmiş ortalama temelde 1.5kg VCM / ton PVC olmalıdır.

Tüm havalandırmalardan, havaya olan vinil klorür monomerinin toplam emisyonu aşağıdaki gibi olmalıdır.

- homopolimer dereceli reçineler için, toplam olarak,
 - * yeni tesiste, 0.25 kg / ton PVC'den fazla olmamalıdır.
 - * mevcut tesiste, 0.5 kg VCM / ton PVC'den fazla olmamalıdır.

* Açıklama (devam)

- ii) dispersiyon dereceli reçineler (lateks veya beyaz tutkallar) ve süspansiyon kopolimer reçineleri için,
 * yeni tesiste, 2.0 kg VCM / ton PVC'den fazla olmamalıdır.
 * mevcut tesiste, 3.0 kg VCM / ton PVC'den fazla olmamalıdır.
- g) Yasal olarak her ft³ hava içinde, atmosfere verilen smoke veya baca gazlarındaki hidroklorik asit 0.2 grain'den fazla olamaz (bunun eşdeğeri 0.46 g/m³ 'tür).
- h) Tüm emisyonlar kalıcı sis (mist) 'ten bağımsız olmalıdır.
- i) Normal işlemler sırasında emisyonlar görünür smoke'dan ve özellikle sürekli mist (subuharı hariç) veya metal buharı (fume) 'dan bağımsız olmalıdır.
- j) Acil durumlarda uzun süreli ventilasyon için CO 'in müsaade edilebilir maksimum emisyon hızını belirlemek üzere denetleyicilerle (inspector) iş gruplarının idari personeli arasında anlaşmaya varılmış (asgari emniyetli fırın üfleme hızını dikkate alan) bir yöntem mevcuttur.
- k) Baca yükseklikleri, iş gruplarının idari personeli ve denetleyici arasındaki görüşmeden sonra belirlenmeli ve ilk olarak, hesaplanmış emisyon sınır değerlerine göre tüm ilgili kirleticilerin maksimum kütlese emisyon hızları tespit edilmelidir.
- l) Bacalar veya ventil, tam yüklemdeki işlemlerde çıkış hızının 15 m/s 'den az olmayacağı şekilde tasarlanırlar. Baca duvarları geçirimsiz veya kaplamalı olmadıkça bacada pozitif basınç bölgelerinin oluşmasını önlemek için özel dikkat gerekir. Tutma sistemi olarak ıslak metodun kullanıldığı hallerde baca yüzeyinden gaz akımına damlacıkların transferini (entrainment) önlemek üzere bacadaki lineer hızın 9 m/s 'yi aşmaması gerekir.
- m) Boşaltım işleminde H'in yüksekliğini metre olarak tayin için, ilk belirlenecek konu aşağıdaki gibidir:

$$H = \sqrt{45 M}$$
 M: ilgili bileşenin (vinil klorür) kg/ hr olarak kütlese emisyon hızı. (M, ilgili emisyon sınırlarıyla birlikte maksimum hız kapasitesine göre hesaplanmalıdır)
- n) Tüm yeni bacalarda atık gazların soğutulması ve iç yüzeylerin yoğunlaşması minimize edilmiş şekilde dizayn edilmelidir (bu durum özellikle asidik gazlar için önemlidir).
- o) Bacalar maksimum sürekli hızda, dışarı verilmiş hızı 15 m/s 'den az olmayacak şekilde dizayn edilmelidir.
- p) Sülfürik asit tesisleri için baca yükseklikleri yöneticiler ve denetleyiciler arasındaki görüşmeden sonra belirlenmeli ve hem normal hem de çalışma koşulları altında beklenen maksimum SO₂ emisyonunun hızı temel alınmalıdır.
- q) Bacalar, tam kapasitedeki işlemlerde, dışarı verilmiş hızı 15 m/s 'den az olmayacak şekilde dizayn edilmeli fakat baca içindeki lineer hız 9 m/s 'yi aşmamalıdır (gaz akımının içine doğru su damlacıklarının sürüklenmesinden kaçınılmalıdır).
- r) Bacalar genellikle çıkış hızı 18 m/s 'den az olmayacak şekilde tasarlanırlar. Islak metoda dayanan tutucu sistemlerinin kullanılması halinde basınçlı absorplayiciler haricinde baca yüzeyinden gaz akımına damlacıkların transferini önlemek üzere bacadaki lineer hızın 9 m/s 'yi aşmaması gerekir.
- s) Dışarı verilen gazların hızı, maksimum hızda 18 m/s 'den az olmamalıdır.
- ş) Bacaya girişte, dışarı verilen gazların sıcaklığı normal olarak 80° C 'dan az olmamalıdır.
- t) Uygun bir yalıtımla baca iç yüzeyinde sıvı yoğunlaşması önlenmelidir.
- u) Havaya verilen her kurşun emisyonu 0.01 g/m³ değerini aşmamalıdır. Herhangi bir yeni işteki tüm kaynaklardan kurşun emisyonunun kütlese hızı da 4000 g/hr 'i aşmamalıdır.
- ü) Baca yükseklikleri yöneticiler ve denetleyiciler arasındaki görüşmeden sonra belirlenmelidir Denetleyicilerin ilk önercekleri formül:

$$H_e = 2\sqrt{M}$$
 H_e: Etkin baca yüksekliği (m)
 M: Emisyon sınır değerlerinde verilmiş olan tahminlere göre hesaplanmış toplam kurşun emisyonu (g/hr)

Çizelge 1.7 İşyeri ortamı ve işçi sağlığı ile ilgili bazı yasal kısıtlar (İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Tüzüğü, 11 Ocak 1971)

Madde 20	Kapalı işyerlerindeki sıcaklık ve nem derecesinin, yapılan işin niteliğine uygun olmakla beraber ılımlı olması gerekir. Fazla buğunun meydana geldiği işyerlerinde sıcaklık 15° C'den az ve 30° C 'den yüksek olmayacaktır.
Madde 21	Kapalı işyerleri günde en az bir defa, bir saatten aşağı olmamak üzere havalandırılacaktır. Ayrıca işçilerin çalışma saatlerinde işin özelliğine göre, havanın sağlığa zararlı bir hal almaması için sık sık değiştirilmesi gereklidir. İşyerinde yapılan bu havalandırmalarda, işçileri etkileyecek hava akımları önlenecek veya kış mevsiminde sıcaklık birdenbire çok aşağı düşürülmeyecektir. Toz, buğu, duman ve fena koku çıkaran işlerin yapıldığı yerlere, bunları çekecek yeterlikte bacalar ve menfezler yapılacak ve yapılan işin niteliğine göre bu tedbirlerin yetmediği durumlarda diğer teknik tedbirler alınacaktır.
Madde 59	Zehirli toz, duman, gaz, buhar, sis veyâ sıvılarıyla çalışmalar, teknik imkanlara göre kapalı sistemle yapılacak, bu tür işyerlerinde, etkili ve yeterli havalandırma sağlanacak, atıklar, zararsız hale getirilmeden atmosfere ve dış çevreye verilmeyecektir.

2.GENEL BİLGİ

Hava kalitesini etkileyen kirletici bileşen miktarlarını belirlemek amacıyla ölçüm yapmadan önce mevcut prosesin çok iyi tanınması gerekir. İleri bir planlamanın çok dikkatli yapılması ve ölçüm yerinin en verimli şekilde tespiti buna bağlıdır. Proses koşullarının doğası, çevrenin sıcaklığı ve nemi, sistemdeki şok ve vibrasyon seviyeleri, elektrik gücünün varlığı ve ölçüm aletlerinin yerleştirildiği yerin olası etkileri (korozif ve patlayıcı) göz önüne alınması gereken faktörlerden birkaçıdır. Ölçüm yapılacak sistemler, yatışkın (zamanla değişimin olmaması) ve uniform (konumla değişimin olmaması) koşullarda dört olası kombinasyon göz önüne alınarak sınıflandırılabilir (Harrison and Perry, 1986):

- 1) Bu sınıfa (yatışkın ve uniform) giren kaynaklarda belirli bir zamanda kanalın / bacanın kesit alanını temsilen, teorik olarak sadece bir ölçüm yapmak yeterlidir.
- 2) Uniform olmayan yatışkın kaynaklar için kanalın / bacanın çeşitli bölgelerinde işlem yapılır; sonuçlar yatışkın işlem periyodunda kanalın / bacanın tamamı için geçerli sayılır.
- 3) Yatışkın olmayan uniform kaynaklarda ise sadece bir ölçüm yeterlidir. Fakat bu ölçüm, tüm alanı temsil edebilmelidir.
- 4) Bu sınıfa (ne yatışkın ne de uniform) giren kaynağın özelliği sürekli değişim gösterdiğinden, yapılan ölçümlerdeki değerler birbiriyle uyumlu / uyumsuz ve tekrarlanabilir / tekrarlanmayabilir niteliktedir. Tüm parametreler zamanla orantılı şekilde değişiyorsa, tek ölçümden ziyade birkaç noktada ölçüm yapılması gerekir.

Sabit bir kaynakta yapılacak ölçümlerde özellikle iki koşulun sağlanması gerekir: ölçüm yapılacak yerdeki kirletici emisyon miktarının ve en uygun zamanın mükemmel bir şekilde düşünülmesi ve yeterli sayıda ölçüm yaparak, sonuçların kaynak emisyonunu tamamiyle temsil edecek durumda olması. Analitik sonuçlar, yöntemin kesinliğine ve doğruluğuna bakmadan önce örneğin kalitesine yani homojenliğine göre değerlendirilir.

Ölçüm prensipleri ve örnek alma yöntemleri deneysel çalışma kısmında ayrıntılı olarak verilmiş olup, burada bazı temel etkilerden ve parametrelerden (adsorpsiyon etkileri, örnek alma sisteminin mekanik eksiklikleri, toplanan kirletici bileşenlerin girişim yapmaları, sıcaklık, basınç vb.) bahsedilecektir.

Özellikle statik sistemlerde, örneklerin toplanması ve kalibrasyon karışımlarının hazırlanmasında adsorpsiyonun önemli hatalara yol açabilecek ölçüde etkisi söz konusudur. Analizde meydana gelen kayıplar, sıcaklık veya basınç değişimlerine karşı gösterilen tepki azaltılarak veya kimyasal tepkime ve benzeri yollarla tutularak önlenbilir. Geniş yüzeyli adsorbanlar (aktif silika, alümina jeller, kömür ve karbonlar, cam küreleri vb.) gaz fazındaki kirletici bileşenleri oldukça iyi tutar. Kromatografi prensibine göre, yüksek polariteli bileşenler daha düşük polariteli bileşenlerin yerini aldığından, benzen gibi nonpolar bileşenlerin toplanmasında fenol, asetik asit, amonyum klorür gibi yardımcı polar bileşenlerin varlığı örnek toplama için katı adsorbanların kullanımında bir girişim kaynağı olarak kabul edilebilir. Yüksek nem koşullarında silika ve alümina jel adsorbanların subuharıyla doymunlaşma sonucunda bozunabildiği, bu koşullarda aktif kömürün pek fazla bozunmaya uğramadığı bilinmektedir (İntersociety Committee, 1972).

Örnek alma donanımında önemli bir yeri olan hız ve toplam hacim ölçerlerin partikül maddelerden veya korozyon ürünlerinden dolayı kirlenmesi pek söz konusu değildir. Ancak yine de bu kirlenmeyi en aza indirebilecek tedbirlerin alınması gerekir. Özellikle orifis tipi ve pozitif yer değiştiren ölçerler ile rotametreler, orifis açıklığının küçülmesini, hareketli kısımların erozyonunu veya tıkanmaları önlemek üzere yüksek verimli filtrelerle korunmalıdır. Rotametre kalibrasyonu, toz birikimi sonucunda önemli ölçüde değişebilir ve plastikten yapılmış rotametre tüplerinde, rotametre borusunun iç yüzeyini yumuşatan veya tutucu hale getiren çözücülerin kullanımından kaçınılmalıdır. Metal yüzücüler korozyon gazlardan etkilenirler ve iyot gibi bazı kimyasal maddeler rotametre tüp gövdesini mat (opak) hale getirirler. Nemin yüksek olduğu koşullarda havada bulunan elektrolitlerin galvanik korozyon yaratması sistemin metal parçaları açısından problem oluşturabilir. Isıl iletkenlik prensibine göre ölçüm yapan akım ölçerler ise toz ve reaktif gazlardan farklı bir tarzda etkilenirler. Korozyon, elemanın elektriksel iletkenliğini değiştirir ve hataya neden olur; inert bir materyalle kaplandığında ise ısı aktarımı azalır ve aletin vereceği sonucu etkiler. Klorürler ve kurşun özellikle yapı bozucudur. Bir hava örnekleme sisteminin alt birimleri olan hacim ölçer, pompa ve aspiratör uygun tuzaklarla korunmalı, bu tuzaklar sık sık yenilenmelidir. İmpinger tipi örnek alma aletlerindeki orifis ve poröz cam difüzörler içindeki çatlaklar da partikül maddelerle kısmen veya tamamen kapanarak zedelenebileceğinden absorplanan gazların filtre ile korunmaları gerekir. Tüm hız ve hacim ölçerler, konum ve hacim düzeltmesi yaparak (gerçek yükseklik, sıcaklık ve basınca bağlı olarak) normal veya standart şartlarda kalibre edilmelidir (sabun köpüklü akım ölçerde buna gerek yoktur).

Analitik yöntemlerle yapılan analizlerde ise toplanan kirlenici bileşenlerin girişimi sözkonusudur. Girişim yapan maddenin uzaklaştırılması amacıyla örneğin distilasyonu, iyon değişim reçineleriyle girişimin engellenmesi, kompleks oluşturan bileşenlerin eklenmesi, organik çözücülerle özütleme (ekstraksiyon) ve külleştirme gerekebilir. Ayrıca özellik farklarına dayanarak ayırmayı gerçekleştirebilen birtakım yöntemler de mevcuttur.

Gazların kütle akışının hesaplanması bir kütle denkliği sorunu iken, gaz sıcaklığının bilinmesi ihtiyacı, enerji denkliği konusunu gündeme getirir. İşlemlerde mantıklı bir doğruluk derecesi için gerçek gaz sıcaklığının bilinmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla kullanılan normal sıvı cam termometreler 0 °C 'nin biraz altından 350 °C 'ye kadar ölçüm yapabilirken, alkollü cam termometrelerde bu aralık -80 °C 'ye kadar inebilir. Bu termometreler yüksek sıcaklıklarda yeterli olmadığından ısı çiftler, pirometre, termistor vb. aletlerin kullanımı söz konusudur. Ancak gaz sıcaklığı, çevresindeki kanal / baca / boru sıcaklığından daha düşük olduğu zaman ölçüm elemanına ısı aktarımı söz konusu olduğu için ısı çift kullanımında çeşitli hatalar meydana gelebilir. Isıl çiftteki yerel ekzotermik tepkimeler yüksek okumalara neden olabilir ve çevredeki üçüncü bir metalin absorpsiyonu ile ısı çift kirlenebilir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda, ısı çift yüzeyinden radyasyonla ısı kaybı nedeniyle (mutlak sıcaklığın dördüncü kuvvetiyle orantılı olduğundan) ölçülen sıcaklık 1500 °C 'de 200-300 °C 'lik bir fark kadar düşük olabilir. Bu sorun, koruyuculu ısı çiftlerin kullanılmasıyla bir dereceye kadar azaltılabilir. Metal koruyucular 1000 °C 'den düşük sıcaklıklarda yeterliyken, 1850 °C civarında (rekristalize) alümina koruyucular tercih edilir.

Sıcaklık kadar önemli olan ve debi ölçümünün dayandığı basınç ölçümünde genellikle manometreler kullanılır (U-tipi, diferansiyel, eğik, açık uç, kapalı uç vb.). Şekil 2.1'de gösterilen manometrelerde P_1 basıncı P_2 'den büyüktür. Şekil 2.1(a) 'daki açık uçlu manometrenin bir ucunda akışkanın basıncı ölçülürken aletin diğer ucu atmosfere açıktır. Şekil 2.1 (b) 'de gösterilen diferansiyel manometre ile proses hattının iki noktası arasındaki basınç farkı ölçülür. Şekil 2.1 (c) 'de ise bir ucu vakumla kapatılmış (barometre fonksiyonuna sahip) bir basınç ölçer görülmektedir (McCabe and Smith, 1976; Rousseau and Felder, 1986).

Manometreler 3 atm'den daha düşük basınç farklarının doğru olarak ölçülmesinde kullanılan aletlerdir ve prensipleri bir sıvı kolonunun basınca karşı dengesine dayanır. Şekil 2.2 'de görülen U-manometresinde yoğunluğu ρ_A olan A akışkanı ve yoğunluğu

$$P_A + \frac{g}{g_c} [Z_m + R_m] P_B - Z_m P_B = P_B \quad (2.1)$$

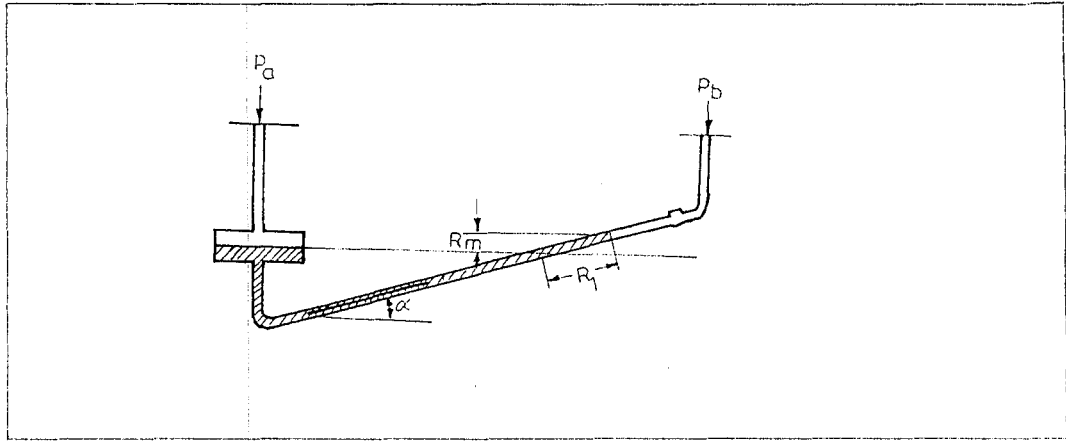
$$P_A - P_B = \frac{g}{g_c} [R_m (P_A - P_B)] \quad (2.2)$$

bağıntıları elde edilir.

Düşük basınç farklarının ölçümünde Şekil 2.3 'de gösterilen eğik manometreler kullanılır. Burada basınç farkları aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir.

$$P_A - P_B = \frac{g}{g_c} R_1 (P_A - P_B) \sin \alpha \quad (2.3)$$

Bu tip basınç ölçerlerde düşey kol yükseltilebilir ve menisküsün hareketi aletin işlem aralığında bu yükselme yanında ihmal edilebilir. Bağlantıların uygun olmaması halinde işlem sırasında akışkanın tamamen veya kısmen üflenme sorunu vardır. Basınç farkı sabitse 0.005 in 'e kadar okuma yapılabilirken, değişmelerin düzensiz olması halinde bu mümkün değildir (McCabe and Smith, 1976).



Şekil 2.3 Eğik manometre (McCabe and Smith, 1976).

Kritik ölçüm elemanları olan sıcaklık ve basınç ölçerlerle ilgili ayrıntılı bilgi Brenchley, Turley and Yarmac (1973), Considine (1985), Doebelin (1983), Hayward (1979), Holman (1978), Madill (1983), Massey (1987), Mehmetoğlu (1983), Miller (1983), Perry and Green (1984), Rousseau and Felder (1986) tarafından verilmiştir.

3. ÖLÇÜM TEKNİKLERİ VE İLGİLİ KURAMSAL KAVRAMLAR

3.1 Sıkıştırılabilen Akışkanlarda Debi Ölçümüne İlişkin Kuramsal Kavramlar

Kimya mühendisliğinin görev alanları içerisinde en önemli yeri kuşkusuz, proses donanımları ve bu donanımların dizaynında göz önünde bulundurulmuş akışkan hareketleri alır. Akış proseslerinde özellikle kütle korunumu kanunu, termodinamiğin I. ve II. yasaları ve Newton'un ikinci kanunu (lineer momentum prensibi) geniş çapta uygulanır. Bu kanunların uygulanabilmesi için akışkanın sisteme giriş ve çıkışındaki termodinamik özellikleriyle akış prosesinin mekanizması ve akışın ayrıntıları iyi bilinmelidir. Burada en önemli kriter akışın sıkıştırılabilirliği. Bir sıvının veya sistem içindeki yoğunluk değişiminin % 10'dan fazla olmadığı bir gazın akışı sıkıştırılmayan akış olarak adlandırılır. Bu çalışma kapsamında sıkıştırılabilir akış durumu ele alınmıştır. Ancak sabit yoğunluklu (sıkıştırılmayan) akış sadece ideal bir durumdur. Gerçekte, hemen her akışkanın akışı az veya çok sıkıştırılabilir. Sıkıştırılabilir akış genelde, yoğunluk değişiminin olduğu akış olarak tanımlanır.

Akışkanların sıkıştırılabilirliği (τ) (basıncıdaki birim değişim başına akışkan elemanının hacmindeki değişim kesri) aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\tau = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} \quad (3.1)$$

Bir gaz sıkıştırıldığı zaman sıcaklığında bir artış gözlenir. Bu artış sistem sınırlarından aktarılan ısıya göre değişebildiği için, sıkıştırılabilirlik genellikle izotermal koşullarda tanımlanır.

$$\tau_T = -\frac{1}{v} \left[\frac{\partial v}{\partial p} \right]_T \quad (3.2)$$

Adyabatik ve tersinir (viskozite ve difüzyon gibi dissipative aktarım mekanizmaları yoksa) sıkıştırma durumunda akışkan elemanının sıkıştırılması izentropiktir.

$$\tau_s = -\frac{1}{v} \left[\frac{\partial v}{\partial p} \right]_s \quad (3.3)$$

Sıvıların sıkıştırılabilirliği oldukça düşük değerlerdeyken (su için 1 atm.de, $\tau_T=5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$) gazlarda yüksek sıkıştırılabilirlik değerleri (hava için 1 atm.de, $\tau_T=10^{-5} \text{ m}^2/\text{N}$) sözkonusudur. Denk.3.1 yoğunluk terimleri cinsinden de ifade edilebilir;

$$\tau = - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (3.4)$$

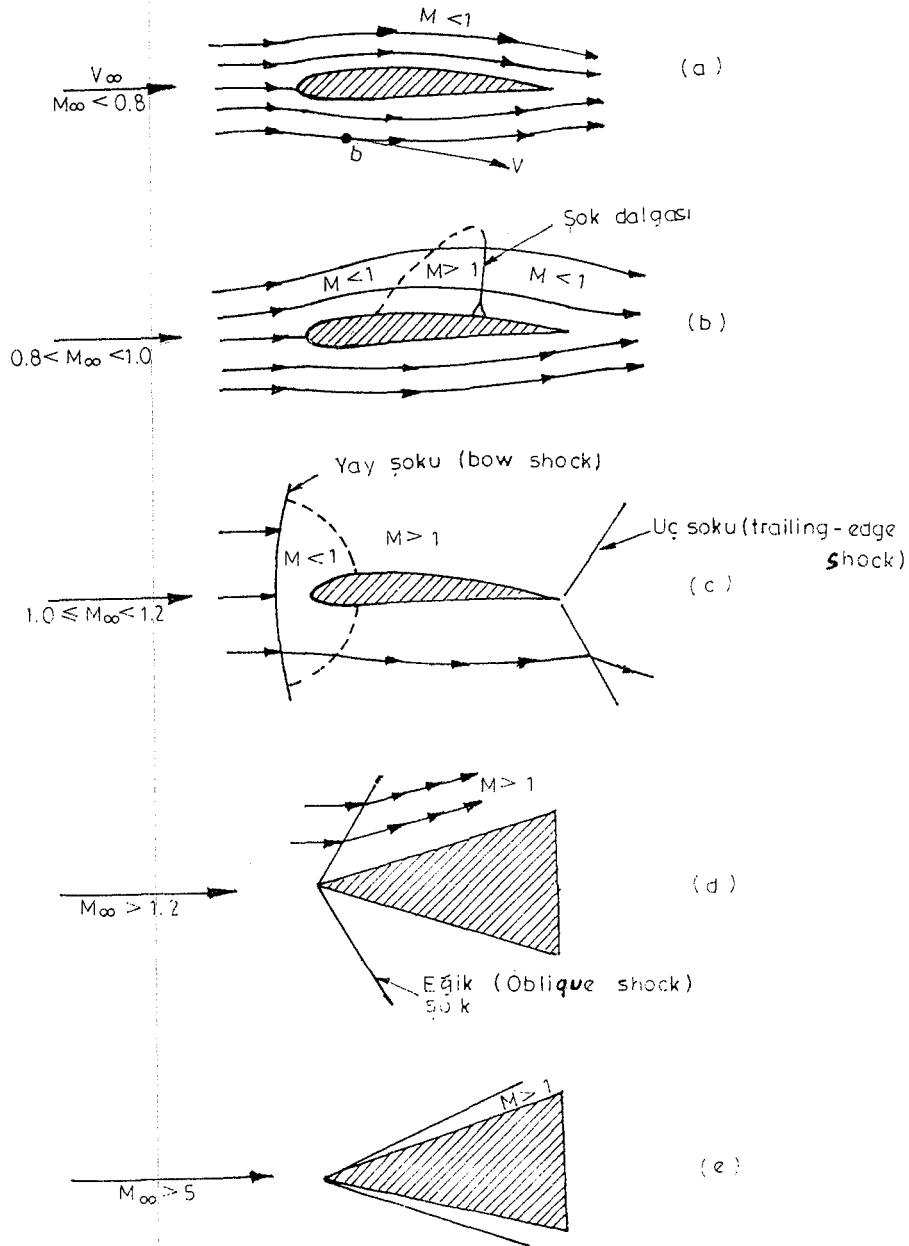
$$d\rho = \rho \tau dp \quad (3.5)$$

Yüksek hızlı akışlarda basınç değişimleri de fazladır. Akış esnasında basınçtaki dp değişiminin gaz yoğunluklarındaki değişime etkisi sıvılara kıyasla daha fazladır. Ses hızının 0.3 katından daha yüksek akış hızları nispeten büyük basınç değişimleri oluşturur ve böylece yoğunluk değişimleri de daha yüksek olur.

Akmakta olan bir gaz için, sıkıştırılabilir akımın farklı rejimleri söz konusudur (Şekil 3.1). Burada aerodinamik yüzeyden uzaktaki serbest akım hızı V_∞ 'dur. Akım alanındaki akım çizgileri, eğri boyunca her bir noktadaki yerel hız vektörü (V)'nin tanjantıdır. Akım alanındaki bir noktada P , T , ρ ve V değerleri yerel basınç, sıcaklık, yoğunluk ve hız vektörüdür. Bu nokta özellikleri akım hattında bir noktadan diğerine değişir. Gazın bir diğer termodinamik özelliği olan ses hızı (a) da noktadan noktaya değişir ve uniform serbest akımda ses hızının a_∞ olması halinde V_∞ / a_∞ oranı serbest akımın Mach sayısı M_∞ olarak tanımlanır.

Yerel Mach sayısı ($M=V / a$) da akım alanında bir noktadan diğerine değişir. Mach sayısı arttıkça genel enerji denkliğinde kinetik enerjinin, iç enerji veya entalpiye oranları önemi artar. Atmosferik koşullarda havadaki ses hızı yaklaşık olarak 335 m/s 'dir. Bu koşullarda akan bir akışkanın lineer hızı 33.5 m/s ise, Mach sayısı ($33.5 / 335$) 0.1 olacaktır (Gürüz, 1986; Smith and Van Ness, 1987).

Şekil 3.1 (a) 'da bir hava engelinden geçen hava akışı görülmekte olup Mach sayısı her yerde 1.0'den küçüktür. Bu akışta akım hızı daima ses hızından düşüktür (subsonik akım). Bu akış düz akım hatlarıyla karakterize edilebilir ve sürekli değişen özellikleri vardır. Serbest akımda, başlangıçta düz ve paralel olan akım hatları yüzeye yaklaştıkça sapma gösterirler. M_∞ 1.0'den yeterince küçükse, yerel Mach sayısı her yerde subsonik olarak kalacaktır. Uçak aerodinamikçileri serbest akımda $M_\infty \leq 0.8$ olan durumları subsonik olarak tanımlamaktadırlar.



Şekil 3.1 Sıkıştırılabilir akışın farklı rejimleri (Anderson, 1982).

M_∞ değeri subsonik bölgede fakat 1.0'e yeterince yakın değilse, hava engelini üzerindeki akım süpersonik bölgeye yakındır (Şekil 1.3(b)). Bu tür karışık akışa transonik akım adı verilir. Burada M_∞ 1.0'den az olduğu halde süpersonik akış bölgesi oluşturmaya yeterlidir. Bu bölgenin (kesikli) akım özelliklerinde bazen daha sert değişim olmaktadır ve şok dalgaları sonlanmıştır.

Eğer M_∞ 1.0'in biraz üzerinde ise bu şok, hava engelini kenarı boyunca devam edecek ve arkasından ikinci bir şok dalgası (yay şoku) gelecektir (Şekil 1.3(c)). Yay şokunun önündeki akım hatları düz ve paralel olup süpersonik serbest akımda Mach sayısı uniformdur. Yay şokunun bir kısmının içinden geçen ve normal bir şekilde serbest akıma doğru ilerleyen akış, subsonik hale gelecektir. Bununla birlikte, hava engeli yüzeyinde olduğu gibi akım, tekrar geniş süpersonik bölgedeki formuna girecek ve uç şoku (trailing-edge shock) olarak sona erecektir. Subsonik ve süpersonik akımın yapısı Şekil 1.3(b) ve (c) 'de karakterize edilmiştir. Transonik karışık akım bölgesinde $0.8 < M_\infty \leq 1.2$ 'dir.

$M > 1.0$ koşulu süpersonik akım bölgesini tanımlar (Şekil 1.3(d)). Düz, eğimli düzlemsel şok dalgasının (oblique shock) karşısında, akım hattının yönü kesikli olarak değişir. Şoktan önce akım çizgisi düz, paralel ve yatay iken şoktan sonra yine düz ve paralel, ancak yön olarak kama (wedge) yüzeyi boyuncadır. Şekil 1.3(a)'daki subsonik akıştan farklı olarak uniform süpersonik serbest akımda şok dalgasının yüzeye karşılaşması önemli değildir. Süpersonik akışta alt ve üst akım genellikle eğik şok dalgası halindedir. Subsonik ve süpersonik akımlar arasında oldukça çarpıcı fiziksel ve matematiksel farklılıklar vardır.

Akımın sıcaklık, basınç ve yoğunluğu arttığında Şekil 1.3(d)'deki gibi bir patlama söz konusudur. M_∞ değeri de, daha yüksek bir süpersonik hızla artar ve bu artışlar daha keskindir. $M_\infty > 5.0$ olduğu zaman şok dalgası yüzeye çok yakındır ve şok ile ana şok tabakası arasında kalan akım alanının sıcaklığı çok yükselir. Bu yüksek sıcaklık, gazın disosiyeye olmasına ve hatta iyonlaşmasına yol açar. Bu tür yüksek sıcaklıklı kimyasal tepkime içeren akımların özellikleri karakteristiktir (Anderson, 1982). Bu etkiler yani ince şok tabakası ve sıcak kimyasal olarak reaktif gazların durumu bu tür akışların analizini karmaşıklarlaştırır. Bu nedenle $M_\infty > 5.0$ için hüküm süren akış rejimi özel olarak hipersonik akış adıyla anılır.

Mühendislikte gaz akışı problemlerinin çoğu borulardan akışla ilgilidir. Akış proseslerinde termodinamik prensiplerinin uygulanabilmesi için birtakım varsayımlar

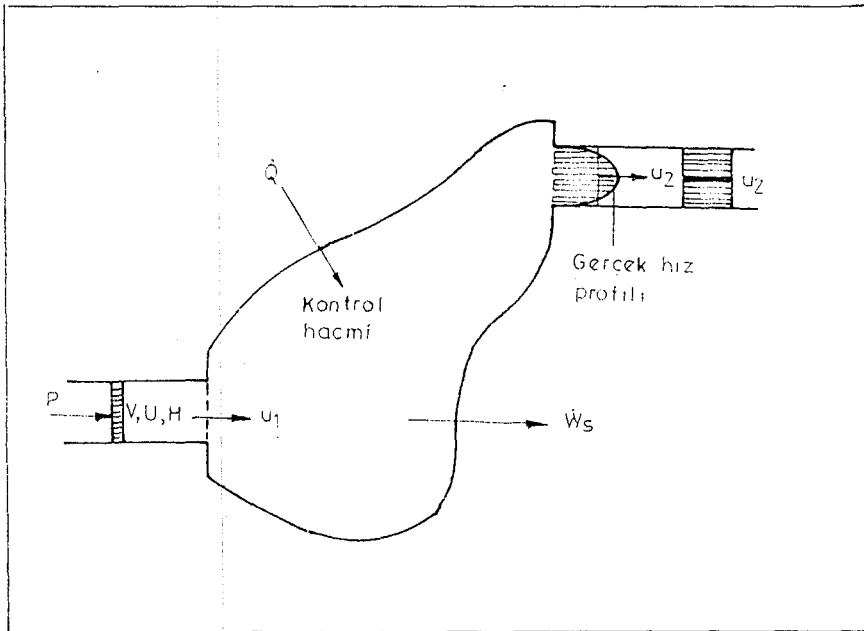
yapılır:

1. İletimde tek yönlü akış olduğu varsayılarak, herhangi bir karışma etkisi olmadan ve donanımına giriş ve çıkıştan etkilenmeyecek bir kısım esas alınmak kaydıyla akışın termodinamik, kinetik ve dinamik özellikleri seçilebilir.
2. Kesit alanında akışa dik yöndeki özelliklerde değişme olmadığı ve dolayısıyla hız, sıcaklık, yoğunluk gibi özelliklerin sabit olduğu da varsayılabilir.

Bir akış prosesinin termodinamik, kinetik ve dinamik yönden incelenebilmesi için Bernoulli denklemi ile kütle ve enerjinin korunumu prensiplerini ayrıntılı olarak ele almak gerekir (Anderson, 1982; Smith and Van Ness, 1987; Balzsiher, 1972; Gürüz, 1986; Miller, 1983; Perry and Green, 1984; Ower and Dankhurst, 1977).

3.1.1. Sıkıştırılabilen akış proseslerinde kütle korunumu

Akış proseslerinde akış için kütle korunumu kanunları kontrol hacminde uygulanabilir. Kontrol hacmi, kontrol yüzeyi ile kuşatılmış herhangi bir hacimdir ve fiziksel sınırlarla tanımlanmış olması gerekmez. Şekil 3.2 'de görülen kontrol hacminde çıkıştaki gerçek hız profili, daha önce bahsedilen ikinci varsayım uyarınca düzgündür.



Şekil 3.2 Tek giriş ve çıkışlı kontrol hacmi (Smith and Van Ness, 1987).

Kontrol hacminde akış prosesi için kütle denkliği şu şekillerde yazılabilir;

$$\left[\begin{array}{c} \text{kontrol hacminde} \\ \text{kütle birikim hızı} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{giren kütle} \\ \text{hızı} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{çıkan kütle} \\ \text{hızı} \end{array} \right] \quad (3.6)$$

$$\left[\begin{array}{c} \text{kontrol hacminde} \\ \text{kütle birikim hızı} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{net kütle} \\ \text{akış hızı} \end{array} \right] = 0 \quad (3.7)$$

Denk.3.7 'nin sol tarafındaki ilk terim, kütlelerin zamanla değişimi (dm/dt) olup, ikinci terim için kütleli giriş ve çıkış hızları süreklilik denklemi ile ifade edilebilir:

$$m = \text{kütleli akış hızı} = \rho \cdot u \cdot A \quad (3.8)$$

Yatışkın durumda kontrol hacmindeki akışkan kütlesi sabit (giren ve çıkan akışkan miktarları eşittir) olduğu için kütleli korunumu matematiksel olarak,

$$\frac{dm}{dt} = \Delta (\rho \cdot u \cdot A) = 0 \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilebilir: Seçilen kontrol hacminde tek giriş ve tek çıkış olması durumunda

$$\rho_2 \cdot u_2 \cdot A_2 = \rho_1 \cdot u_1 \cdot A_1 = \dot{m} = sb. \quad (3.10)$$

yoğunluk yerine spesifik hacmin kullanılması halinde ise

$$\dot{m} = \frac{u_1 \cdot A_1}{V_1} = \frac{u_2 \cdot A_2}{V_2} = \frac{u \cdot A}{V} \quad (3.11)$$

yazılabilir.

3.1.2. Sıkıştırılabilen akış proseslerinde enerjinin korunumu

Şekil 3.2'deki kontrol hacmi için (açık sistem) genel enerji denkliği

$$\left[\begin{array}{c} \text{kontrol} \\ \text{hacminde} \\ \text{enerjinin} \\ \text{birikim} \\ \text{hızı} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{girişte} \\ \text{taşınan} \\ \text{enerji} \\ \text{hızı} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{çıkan} \\ \text{enerji} \\ \text{hızı} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{kontrol} \\ \text{yüzeyinden} \\ \text{akan} \\ \text{ısı} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{kontrol} \\ \text{yüzeyinden} \\ \text{çıkan} \\ \text{netiş} \end{array} \right] \quad (3.12)$$

veya

$$\left[\begin{array}{c} \text{kontrol hacminde} \\ \text{enerji birikim} \\ \text{hızı} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{net enerji} \\ \text{katılma} \\ \text{hızı} \end{array} \right] = Q - \dot{W} \quad (3.13)$$

şeklinde verilebilir. Burada, Denk.3.12'nin sol tarafındaki ilk terim kontrol hacminde toplam enerjinin zamanla değişim hızı $(d(mU) / dt)$ 'dir.

Akışkan akımlarında enerji terimi, iç enerji, kinetik enerji ve potansiyel enerjinin tamamını içermektedir. Buna göre, akımın birim kütesinin toplam enerjisi $U + 1/2u^2 + zg$, enerjinin toplam taşınım hızı ise $(U + 1/2u^2 + zg)\dot{m}$ 'dir. Böylece kontrol hacminde enerjinin korunumu denkliği matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\frac{d(mU)}{dt} + \Delta[(U + \frac{1}{2}u^2 + zg)\dot{m}] = \dot{Q} - \dot{W} \quad (3.14)$$

Akışkan giriş ve çıkışta ortalama P, V, U, H değerlerine sahip olup bu özellikler akışkanın birim kütesi ile iletilmektedir. Birim kütenin hareketiyle yapılan iş PV'dir ve iş hızı $(PV)\dot{m}$ şeklinde gösterildiğinde toplam net iş $\Delta((PV)\dot{m})$ 'dir.

$$\dot{W} = \dot{W}_s + \Delta((PV)\dot{m}) \quad (3.15)$$

Bu eşitlik Denk.3.14'de yerine konulursa,

$$\frac{d(mU)}{dt} + \Delta[(U + PV + \frac{1}{2}u^2 + zg)\dot{m}] = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (3.16)$$

ve

$$\frac{d(mU)}{dt} + \Delta[(H + \frac{1}{2}u^2 + zg)\dot{m}] = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (3.17)$$

bağıntıları bulunur. Bu genel enerji denkliği, akışkanın kontrol hacminde kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilerek daha da basitleştirilebilir.

$$\frac{d(mU)}{dt} + \Delta(H\dot{m}) = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (3.18)$$

Ayrıca kütle, ısı ve iş akış hızları

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt}, \quad \dot{Q} = \frac{\delta Q}{\delta t}, \quad \dot{W}_s = \frac{\delta W_s}{\delta t} \quad (3.19)$$

şeklinde tanımlandığından

$$d(mU) + \Delta(Hdm) = dQ - dW_s \quad (3.20)$$

bağıntısı yazılabilir.

Akış proseslerinde genellikle yatışkın durum söz konusudur. Akış prosesleri için kontrol hacmindeki toplam iç enerji sabittir ($d(mU)/dt=0$). Kontrol hacmine giriş ve çıkışta \dot{m} sabit ise,

$$\Delta\left(H + \frac{1}{2}u^2 + zg\right) \dot{m} = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (3.21)$$

eşitliğinin her iki tarafı \dot{m} ile bölünerek,

$$\Delta H + \Delta u^2/2 + g\Delta z = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (3.22)$$

bulunur (\dot{Q} ve \dot{W}_s , birim kütle başına ifade edilmiştir).

Ölçüm sistemleri, meme (nozzle), rüzgar tünelleri ve hidroelektrik güç santralleri haricinde kinetik ve potansiyel enerji terimleri diğer enerji terimleri yanında genellikle ihmal edilebilir. Tersinir bir proses için ($TdS=dQ$) $dH=TdS+VdP$ eşitliğinden yararlanarak aşağıdaki ifadeler yazılabilir:

$$dH=dQ+VdP \quad (3.23)$$

$$\Delta H=Q+\int_{P_1}^{P_2} VdP \quad (3.24)$$

Son ifade Denk.3.22'de yerine konulduğunda,

$$-W_s = \int_{P_1}^{P_2} VdP + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z \quad (3.25)$$

denklemini elde edilir. Bu temel denkleme gerçek akışta görülen viskoz kuvvetler nedeniyle sürtünme terimi de ilave edilebilir.

$$-W_s = \int_{P_1}^{P_2} VdP + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z + f \quad (3.26)$$

Bu eşitlik, viskoz olmayan ve sıkıştırılmayan akışkanlara ($V=1/\rho=\text{sabit}$) uygulandığında (şaft işi yoksa),

$$\int_{P_1}^{P_2} VdP = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (3.27)$$

bulunur. Böylece borularda akış için en genel haliyle Bernoulli eşitliği tanımlanmış olur.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} + gz = \text{sabit} \quad (3.28)$$

Sıkıştırılabilen akışkanlarda $\int \underline{V} dP$ değerinin hesaplanabilmesi için \underline{V} ve P arasındaki ilişkinin bilinmesi gereklidir. Akışkan için basınç, hacim, sıcaklık ilişkisi bulunabildiği takdirde integralin değeri hesaplanabilir. Böylece sıkıştırılabilen akışkanlar için mekanik enerji denkliği (Bernoulli denklemi);

$$\frac{u du}{g_c} + \frac{dP}{\rho} + \delta LW = 0 \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilebilir (Balzhiser, 1972). Burada δLW kayıp iş terimi olup

$$\delta LW = \frac{2f}{D} \frac{u^2}{g_c} dL \quad (3.30)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Sıkıştırılabilir akışkanlarda kayıp iş teriminin hesaplanması oldukça zordur; zira süreklilik denkleminde göre bir boru içinden akan akışkanın kütleli akım hızı sabitken, yoğunluk boru boyunca değiştiğinde, Denk.3.30 diferansiyel olarak yazılmak zorundadır (Gürüz, 1986; Balzhiser, 1972).

3.1.3 Yatay borularda sıkıştırılabilir akışın incelenmesi

Sıkıştırılmayan akışkanlarda, özgül hacim sabit olduğundan, mekanik enerji denkliğindeki VdP terimi kolaylıkla integre edilebilirken, sıkıştırılabilir akışkanlarda bu integralin alınabilmesi özgül hacimle basınç arasındaki bağıntının bilinmesine bağlıdır.

Uygulamada karşılaşılan akışlar genellikle türbülent rejimdedir. Reynolds sayısının 50000'den yüksek olduğu durumlarda Fanning sürtünme faktörü sabittir.

Üzerinde kompresör, boru ekleri ve vanalar gibi cihazlar bulunmayan dL uzunluğunda ve A kesit alanına sahip yatay bir boru içinden akan sıkıştırılabilir akışkan için mekanik enerji denkliğinin diferansiyel ifadesi,

$$\frac{u du}{g_c} + \frac{dP}{\rho} + \frac{2f}{Dg_c} u^2 dL = 0 \quad (3.31)$$

şeklinde dir. Boru boyunca akışkan hızı uzunlukla değiştiği için son denklem u^2 ile bölünerek,

$$\frac{du}{ug_c} + \frac{dP}{\rho u^2} + \frac{2f}{Dg_c} dL = 0 \quad (3.32)$$

bulunur. Sürtünme faktörü sabit kabul edildiğinde üçüncü terim direkt olarak integre edilebilirken, ikinci terimin integre edilebilmesi için u ile ρ arasındaki bağıntının bilinmesi gereklidir. Bu nedenle süreklilik denklemi aşağıdaki şekliyle kullanılabilir;

$$\rho \cdot u = \frac{\dot{m}}{A} = G = \text{sabit} \quad (3.33)$$

Buna göre akışkan hızı için

$$u = G/\rho \quad (3.34)$$

veya

$$du = d(G/\rho) = Gd(1/\rho) = -G/\rho^2 d\rho \quad (3.35)$$

ifadeleri yazılabilir. Son iki denklem 3.33 nolu denkleğe yerleştirilip her iki taraf G^2 ile çarpıldığında,

$$\frac{G^2}{g_c} \frac{d\rho}{\rho} + \rho dP + \frac{2fG^2}{DG_c} dL = 0 \quad (3.36)$$

bağıntısı bulunur. Bu ifade integre edildiğinde ($L_1=0$, $P=P_1$ ve $\rho_1=\rho_2$ 'den $L=L_2$, $P=P_2$ ve $\rho=\rho_2$ ye kadar),

$$\frac{G^2}{g_c} \ln \frac{\rho_1}{\rho_2} + \int_{P_1}^{P_2} \rho dP + \frac{2fG^2}{Dg_c} L = 0 \quad (3.37)$$

denklemini bulunur. Bu genel ifadedeki ikinci terimin integre edilebilmesi için ρ ile P arasındaki bağıntının bilinmesi gereklidir.

Sıkıştırılabilir akışlarda en çok karşılaşılan akım türleri adyabatik ve izotermal akışlardır. Akışkan özellikleri boru duvarından içeri doğru olan ısı aktarımında oldukça etkilidir ve boru iyice yalıtılmışsa ısı aktarımı ihmal edilebilirken (adyabatik durum olabildiği gibi izentropik de olabilir), izole edilmemiş borularda boru duvarından aktarılan ısının hesaplanması gerekir (Gürüz, 1986; Massey, 1987).

3.1.3.1 İzotermal akımlar

Akışkan ideal gaz kabul edildiği takdirde,

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (3.38)$$

ifadesi yazılabilir. İzotermik koşullar için Denk.3.38 direkt olarak integre edilebilir.

$$\int_{P_1}^{P_2} \rho dP = \frac{M}{RT} \int_{P_1}^{P_2} P dP = \frac{M}{2RT} (P_2^2 - P_1^2) \quad (3.39)$$

Ayrıca izotermal akımlarda,

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{P_1}{P_2} \quad (3.40)$$

bağıntısının da geçerli olduğu dikkate alındığında,

$$\ln \frac{P_1}{P_2} + \frac{g_c M}{2G^2 RT} (P_2^2 - P_1^2) + \frac{2fL}{D} = 0 \quad (3.41)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem belirli bir P_1 değeri için

$$G^2 = \frac{P_1^2 g_c M}{2RT} \left[\frac{1 - (P_2/P_1)^2}{(2fL/D) - \ln(P_2/P_1)} \right] \quad (3.42)$$

şeklinde düzenlenebilir. Burada $2fL/D$ terimi, G^2 ile P_2 'nin değişimine bağlıdır.

3.1.3.2 Adyabatik akımlar

Adyabatik koşullarda sıcaklık boru boyunca değiştiği için basınçla yoğunluk arasında önceden bir bağıntı kurmak mümkün değildir. Bu nedenle, mekanik enerji denkliği ve akışkanın hal denklemi, genel enerji denkliği ile birlikte ele alınmalıdır. Bunun yanısıra tersinir adyabatik koşullarda entropi de artmadığı halde, sürtünme etkileri subsonik akışta artış, süpersonik akışta azalma gösterir. Adyabatik koşullardaki diğer özelliklerin değişimi Çizelge 3.1 'de verilmiştir.

Kompresör içermeyen, adyabatik ve yatay bir boru hattı için genel enerji denkliğinin diferansiyel hali

$$dH = - \frac{u du}{g_c} \quad (3.43)$$

olarak yazılabilir. Özgül entalpi P , V , T ve C_p cinsinden ifade edildiği takdirde genel enerji denkliği

$$\frac{C_p}{M} dT + \frac{1}{M} [V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P] dP = - \frac{u du}{g_c} \quad (3.44)$$

Çizelge 3.1 Adyabatik koşullarda bazı özelliklerin değişimi (Massey, 1987)

Özellik		Subsonik akış	Süpersonik akış
Mach sayısı	M	Artar	Azalır
Spesifik entalpi	h	Azalır	Artar
Hız	u	Artar*	Azalır
Yoğunluk	ρ	Azalır	Artar
Sıcaklık	T	Azalır	Artar
Basınç	p	Azalır	Artar*
Reynolds sayısı (μ sıcaklıkla artar)	Re	Artar	Azalır
Durgunluk (Stagnation) sıcaklığı	T_0	Sabit	Sabit

* Bu değerler genellikle artmakla beraber azalmanın olduğu haller de mevcuttur.

$$dH = C_p dT + \left[V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \right] dp \quad (3.45)$$

şeklinde düzenlenebilir. Buradaki hız terimi süreklilik denklemi kullanılarak yok edildiğinde,

$$-udu = \frac{G^2}{\rho^3} d\rho \quad (3.46)$$

$$\frac{C_p}{M} dT + \frac{1}{M} \left[V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \right] dp = - \frac{G^2}{\rho^3 g_c} d\rho \quad (3.47)$$

bağıntısı elde edilir. İdeal bir gaz için bu bağıntı,

$$\frac{C_p}{M} dT = - \frac{G^2}{\rho^3 g_c} d\rho \quad (3.48)$$

halini alır. Bu ifade integre edildiğinde ($L=L_1$, $T=T_1$, $\rho=\rho_1$),

$$\frac{C_p}{M} (T - T_1) = - \frac{G^2}{2g_c} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_1} \right) \quad (3.49)$$

ve sıcaklıklar ideal gaz kanunu kullanılarak yok edildiğinde,

$$\frac{C_p}{R} \left[\frac{P}{\rho} - \frac{P_1}{\rho_1} \right] = - \frac{G^2}{2g_c} \left[\frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{\rho_1^2} \right] \quad (3.50)$$

elde edilir. Son bağıntı P için çözüldüğünde,

$$P = \frac{P_1 \rho}{\rho_1} - \lambda \left[\frac{1}{\rho} - \frac{\rho}{\rho_1} \right] \quad (3.51)$$

ilişkisi (Denk 3.38'de yer alan ρdP integralinin alınabilmesi için gerekli olan yoğunluk-basınç bağıntısı) türetilmiş olur. Sabit terimler

$$\lambda = \frac{G^2 R}{2C_p g_c} = \text{sabit} \quad (3.52)$$

ile gösterilerek integral alındığında,

$$dP = \left[\frac{P_1}{\rho_1} + \lambda \left[\frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{\rho_1} \right] \right] d\rho \quad (3.53)$$

$$\int_{P_1}^{P_2} \rho dP = \left[\frac{\rho^2 - \rho_1^2}{2\rho_1} \right] (\lambda + P_1 \rho_1) + \lambda \ln(\rho/\rho_1) \quad (3.54)$$

yazılabilir. Son ifade Denk.3.39 'da yerine konulup gerekli sadeleştirmeler yapıldığında,

$$G^2 = \frac{0.5 \left[1 - (\rho/\rho_1)^2 \right]}{\frac{0.25 R}{C_p g_c} \left[(\rho/\rho_1)^2 - 1 \right] + \frac{R - 2C_p}{2C_p g_c} \ln(\rho/\rho_1) + \frac{2f l}{D g_c}} \quad (3.55)$$

ifadesi elde edilir. Belirli bir kütleli akım hızı için, Denk 3.55 kullanılarak, yoğunluk ile boru uzunluğu arasındaki bağıntı bulunduğundan sonra, boru hattı boyunca herhangi bir noktadaki basınç, sıcaklık ve hız aşağıdaki bağıntılardan hesaplanabilir (Gürüz, 1986; Massey, 1987; Balzhiser, 1972).

$$P = \frac{P_1 \rho}{\rho_1} - \frac{G^2 R}{2C_p g_c} \left[\frac{1}{\rho} - \frac{\rho}{\rho_1} \right] \quad (3.56)$$

$$T=T_1 - \frac{G^2}{2C_p g_c} \left[\frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{\rho_1^2} \right] \quad (3.57)$$

$$u = \frac{G}{\rho} \quad (3.58)$$

3.2 Debi Ölçüm Yöntemleri ve Prensipleri

Gaz karışımlarındaki bir bileşenin derişiminin doğru ölçümü, öncelikle örneğin analiz koşulları ile orijinal hava hacmi arasındaki ilişkinin doğru olarak bilinmesine bağlıdır. Ancak, çok karmaşık gaz akışı konusunda karşılaşılan debi ölçüm problemlerinin çözümü genellikle basit ve kesin değildir. Normal sıcaklık ve basınçlarda, tek fazlı akım ve düşük viskozitenin söz konusu olduğu durumlarda doğru ölçüm yapmak için çok çeşitli donanımlar mevcutken, yüksek çalışma sıcaklığı gibi ekstrem durumlarda bu donanımların sayısı sınırlıdır (Holman, 1978; Kirk-Othmer, 1978; Harrison and Perry, 1986).

Akım ölçümü için kullanılan cihazlar hacim ölçerler ve hız ölçerler olmak üzere genellikle iki sınıfta incelenir. Hacim ölçerler (yaş gaz ölçer, kuru gaz ölçer ve sikloid gaz ölçerler gibi) belli bir zamanda geçen toplam hacmi ölçerek, örneklenen hava hacminin direkt olarak kaydedilmesini sağlar. Hız ölçerler (venturimetreler, orifisetreler, akış nozulları, rotametreler, pitot tüpleri, türbin ve anemometreler) ise örnek alma sisteminden geçen anlık hacimsel akış hızını ölçerler. Bazı akış ölçüm aletlerinin özellikleri, seçilme kriterleri, avantajları ve dezavantajları Çizelge 3.2 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir (Harrison and Perry, 1986).

Bu bölümde basınç farkı oluşturuçular (orifis, venturi, nozul, dirsek, pitot vb.) ve lineer akım ölçerler (türbin, vortex, manyetik, ultrasonik, positive-displacement, rotametre vb.) olarak kendi arasında ikiye ayrılan hız ölçerlerin ölçüm yöntemleri ile çalışma prensiplerinden bahsedilecektir.

3.2.1 Pitot tüpü ile debi ölçümü

En eski ve en basit akım ölçer tipi olan pitot tüpü, kanal ve bacalardaki yerel hız ölçümü için uzun ve durgun bir hat gerektirmemesi, kanalın içine küçük bir delikten girebilmesi, gaz akımı içinde önemli bir basınç düşüşüne neden olmaması, oldukça düşük basınç kayıplarını ölçmesi ve basit bir düzenek olması açılarından avantajlıdır. Baca gazı hızının 10 ft/s'den düşük olduğu durumlarda pervaneli anemometrelerin, gaz hızlarının daha yüksek olduğu durumlarda ise pitot tüplerinin kullanımı tercih edilir. Prensipleri durgunluk (stagnation) basıncının ölçülmesine dayanan ve 1093 °C (2000 °F) 'a kadar

Çizelge 3.2 (a) Bazı akım ölçerlerin özellikleri (Miller, 1983; Cheremisinoff and Morresi, 1983; Holman, 1978)

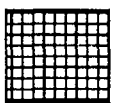
Akımölçer tipi	Boru çapı in.(mm)	Boru boyu cm	Yapı maddesi	Sıcaklık aralığı °F (°C)	Basınç psig (kPa)	Doğruluk aralığı URV*	Reynolds sayısı	Gerekli güç
Orifis		4-30	tüm metaller	1000 (540) proses sıcaklığına kadar	6000 psig (41000 kPa)'a kadar			yok
*kare uçlu	>1.5(40)					±1-2%	> 2000	
*integral	<0.5(12)					±2-5%	> 100	
*quadrant / konik uç	>1.5(40)					±2%	> 200	
*eksantrik	>2.0(50)					±2%	>10000	
*segmental	>4.0(100)					±2%	>10000	
*annular	>4.0(100)					±2%	>10000	
Target	>0.5-4.0 (12-100)			1000 (540) proses sıcaklığına kadar	6000 psig (41000 kPa)'a kadar	±1.5-5 %	> 100	
Venturi	>2(50)	2-60	bronz,çelik demir, pas. çelik, plastik	1000 (540) proses sıcaklığına kadar	6000 psig (41000 kPa)'a kadar	±1-2% (41000)	>75000	
Akış nozulu	>2(50)	2-60	bronz,çelik demir, pas. çelik, plastik	1000 (540) proses sıcaklığına kadar	6000 psig (41000 kPa)'a kadar	±1-2%	>10000	
Pitot tüpü	>3.0(75)		paslanmaz çelik	1000 (540) proses sıcaklığına kadar	6000 psig (41000 kPa)'a kadar	±5 %	sınırsız	
Dirsek	>2.0(50)			1000 (540) proses sıcaklığına kadar	6000 psig (41000 kPa)'a kadar	±4.25 %	> 10000	
Manyetik	0.1-72 (25-1800)	0.2-100	plastik, paslanmaz çelik	360 (180)	<1500 (10500)	±1.0%	sınırsız	115 V, 60 Hz., 200 W

Çizelge 3.2 (a) (devam)

Akımölçer tipi	Boru çapı in.(mm)	Boru boyu cm	Yapı maddesi	Sıcaklık aralığı °F (°C)	Basınç psig (kPa)	Doğruluk aralığı URV*	Reynolds sayısı	Gerekli güç
Pozitif yer değiştirme	>12(300)	1.2-15	bronz, demir, çelik, paslanmaz çelik	gazlarda 250(120) sıvılarda 600(315)	<1400 (10000)	gazlarda ±1% sıvılarda ±0.5% of rate	<8000cS	yok
Türbin	0.25-24 (6-600)	0.3-90	alüminyum, paslanmaz çelik	(-268-260)	-450-500 21000	<3000 ±0.5% of rate ±1 % of rate	gazlarda	<12-15cS 115 V, 60 Hz., 50 W
Ultrasonik				-450-500 (-268-260)				
Doppler	>0.5(12)			-300-250 (-180-120)	pipe rating	±5 %	sınırsız	
Rotametre	<3(75)					±1.0 %	çok yüksek viskoz akışkanlar	
*cam-tüp *metal-tüp	0.6-10	cam 0.3-70	<400(200) metal	350(2400) <1000(540)	720(5000)	yok		yok
Vortex	1.5-16 (40-100)			<400(200)	<1500(10500)	±0.75-1.5 % of rate	>10000	

* Upper Range Value

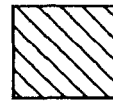
Gereklilikler	Venturi	Orifis	Cam Rotametre	Metal Rotametre	Türbin	Elektro Manyetik	Pozitif Yer Değiştirme	Ultrasonik	Vortex	Islal (tracer tipi)	Nozul
Atmosferik basınçlardaki gazların ölçümü	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid
Yüksek basınçtaki gazların ölçümü	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid
Geniş hava kanallarında ölçüm	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid
Düşük gaz akışları	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid
Geniş aralıkta değişebilen durumlar	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid
Buhar içeren sıcak gazlar	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid
Gaz akış hızlarının ve miktarlarının yüksek doğrulukta ölçümü	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid
Düşük statik basınç kaybı	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid
Bakım veya yeniden kalibrasyon gerektirmeden kullanılabilirlik ömrü	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid
Düşük ilk maliyet	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid
Vuruntulu (pulsating) akış	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid



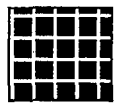
Kullanımı uygundur



Uygun değildir



Sıvılar için dizayn edilmiş olana göre daha iyidir



Bazen kullanılabilir



Sadece elektrik ileten sıvılarda kullanılabilir



Burada ısı enerjisinin önemli miktarı tüketilir

Çizelge 3.2 (c) Bazı akım ölçer tiplerinin avantajları / dezavantajları

Ölçüm aleti tipi	Avantajları	Dezavantajları
Pitot tüpü	<ul style="list-style-type: none"> * düşük basınç kayıplarını ölçer * basit bir düzeneğe sahiptir. * ucuz ve dayanıklıdır. * iyi kullanıldığı takdirde oldukça doğru sonuçlar verir. * bir seri pitot tüpünün kullanılmasıyla, bir basınç farkı ölçüm sistemi kurulabilir. 	<ul style="list-style-type: none"> * sadece nokta hızını ölçer. * düşük akım hızlarında basınç farkı değerlerinin doğruluğu için duyarlı mikromanometrelerin kullanılması gerekir. * akımda girdap olması halinde doğru sonuç vermez. * gazlar için doğruluk derecesi düşük olduğundan, düşük basınçlı gazlar için eğik manometre kullanılmalıdır.
S-tipi pitot tüpü	<ul style="list-style-type: none"> * standart pitot tüpünden daha yüksek basınç farklarını ölçebilir. * yüksek partikül ve nem içeren akımlarda tıkanmaya karşı daha dayanıklıdır. * standart pitot tüpünde olduğu gibi bağlantı problemi yoktur. * iki yönlü olduğundan, akım tersine çevrilebilir. 	<ul style="list-style-type: none"> * yüksek sapma duyarlılığı gösterir.
Venturimetre	<ul style="list-style-type: none"> * yüksek bir doğruluğa sahiptir. * içinde katıların birikimi sözkonusu değildir. * diğer akım engelleyici aletlerden daha fazla basınç geri kazanılır. * sürekli akım ölçümleri için uygundur. * tamamen akışkan ile dolduğundan, borunun herhangi bir yerine konulabilir. * abrazyona karşı dirençlidir. 	<ul style="list-style-type: none"> * oldukça pahalıdır. * diğer akım engelleyici aletlerden daha fazla yere gerek vardır.
Akış nozulları	<ul style="list-style-type: none"> * sürekli akım ölçümleri için uygundur. * tamamen akışkan ile dolduğundan, borunun herhangi bir yerine konulabilir * abrazyona karşı dirençlidir. * venturimetreden daha az yere ihtiyaç vardır. * ucuzdur. 	<ul style="list-style-type: none"> * basıncın geri kazanımı daha azdır. * uygun şekilde yerleştirilmesi zordur.
Orifisimetre	<ul style="list-style-type: none"> * sürekli akım ölçümleri için uygundur. * tamamen akışkan ile dolduğundan, borunun herhangi bir yerine konulabilir * abrazyona karşı dirençlidir. * tüm akım engelleyici aletler içinde en ucuz olanıdır. * tüm akım engelleyici aletler içinde en az yere gerek duyanıdır. * diğer akım engelleyici aletlerden daha basit bir düzene ihtiyaç vardır. 	<ul style="list-style-type: none"> * tüm akım engelleyici aletler içinde basıncın geri kazanımının en az olduğu alettir. * diğer akım engelleyici aletlerden daha az doğruluğa sahiptir.

Çizelge 3.2 (c) (devam)

Ölçüm aleti tipi	Avantajları	Dezavantajları
Rotametre	<ul style="list-style-type: none"> * akım hızı ile doğrusal bir değişim gösterir. * basınç kayıpları tüm akış hızlarında durağandır. * akış durumu hazır olarak görülür. * bazı korozif akışkanlarda herhangi bir komplikasyon yapmaksızın kullanılır. * yüzücü ve / veya tüp değişimiyle kapasitesi değiştirilebilir. 	<ul style="list-style-type: none"> * pahalı bir alettir. * mutlaka dikey pozisyonda yerleştirilmelidir. * opak akışkanlar için kullanıldığında yüzücü görülmez.
Sıcak-tel anemometresi	<ul style="list-style-type: none"> * akışkan akımı içindeki türbülent değişimleri ve ortalama hızı ölçer. * hız değişimlerine çok hızlı cevap verir * oldukça küçüktür. * bir noktadaki türbülent değişimlerin ölçümü için en pratik yöntemdir. 	<ul style="list-style-type: none"> * kalibrasyonu zordur. * çok nazik bir alettir.
Sıcak-film anemometresi	<ul style="list-style-type: none"> * sıcak-tel anemometresinden daha dayanıklıdır 	<ul style="list-style-type: none"> * kalibrasyonu zordur.
Elektro manyetik akım ölçerler	<ul style="list-style-type: none"> * hemen hemen tüm boru çaplarında (2mm-3 m) yüksek bir doğruluğa sahiptir. * engelsiz, sabit aletlerdir. * dayanıklı bir yapıya sahiptirler. * viskozite, yoğunluk ve sıcaklıktan bağımsızdırlar. 	
Laser-Doppler anemometresi	<ul style="list-style-type: none"> * ölçüm ortamına girmeden, hız bileşenlerinin ayrı ayrı ölçülmesini sağlar. * sıcaklık, yoğunluk ve bileşim değişimlerinden etkilenmez. * kalibrasyon gerekliliği yoktur. * türbülent değişimlerde rahatlıkla kullanılabilir. 	<ul style="list-style-type: none"> * içinde ışığı saçacak tanecik bulunmayan ortamda ölçüm yapamaz. * ışığın ortamın bozulmasına neden olacağı durumlarda kullanılamaz.
Torbametre	<ul style="list-style-type: none"> * sistem geometrisinin zorluk çıkardığı durumlarda kullanılabilir 	<ul style="list-style-type: none"> * yüksek sıcaklıklarda ve yüksek hızlarda, ince torbalarla yapılan deneyler, hatalı sonuçlar verir.
Sabun-film büreti	<ul style="list-style-type: none"> * düşük gaz akımlarında kullanılır. * sıkıştırılabilen akışkanlar için kalibrasyon aracı olarak kullanılabilir. 	

olan sıcaklıklarda kullanılabilen paslanmaz çelik probalar (sonda) da vardır. Geniş çaplı (6 in ve üzeri) boru ve kanallarda geçici tesisat olarak kullanılan pitot tüpü, kurutma ve benzeri proses uygulamalarında ve havalandırma sistemlerinde hava akış miktarının ölçülmesinde geniş kullanım imkanına sahiptir. Ancak, onsekizinci yüzyılın ürünü olan bu pitot tüpleri kirliliğe karşı hassas olup, akışa engel oluşturan ve 16.7 ft/s'nin altında fonksiyonu olmayan aletlerdir. Ayrıca, sıcaklık ve basınç düzeltmesi yapmak için gerekli olan elektriksel donanıma da sahip değildirler. Yüksek oranda partikül ve nem içeren gaz akımlarında pitot tüpüyle yapılan kısa süreli ölçümlerde tıkanma söz konusu olmayabilir (Kurz, 1983; EİE, 1988; Cheremisinoff and Morresi, 1981).

Pitot tüpü vuruş (impact) ve durgunluk (stagnation) basıncı arasındaki farkı ölçerek, yerel nokta hızının belirlenmesini sağlar. Uygulamada hava akış hızı, kanal veya boru kesitinin her yerinde aynı değildir ve sürtünme duvarlara yakın yerlerde havanın hareketini yavaşlatır, merkezde hız en büyük değerine ulaşır. Hız profilini belirlemek amacıyla kanal kesiti üzerindeki çeşitli noktalarda (traverse) bir grup sistematik okuma yapılmalıdır.

Şekil 3.3'de görülen tip bir kanalda akışkanın akım hattı merkez hatla simetriktir ve S noktasında (durgunluk noktası) akışkan hızı sıfırdır ($P_s > P_0$). Burada gaz akış hızına bağlı olarak üç farklı durum söz konusudur (Şekil 3.4) ;

$$1) 0 < M < 0.2$$

$$2) 0.2 < M < 1.0$$

$$3) M > 1.0$$

Birinci durumda sıkıştırılmayan akışkan akışı için Bernoulli denkleminde,

$$P_s = P_0 + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (3.59)$$

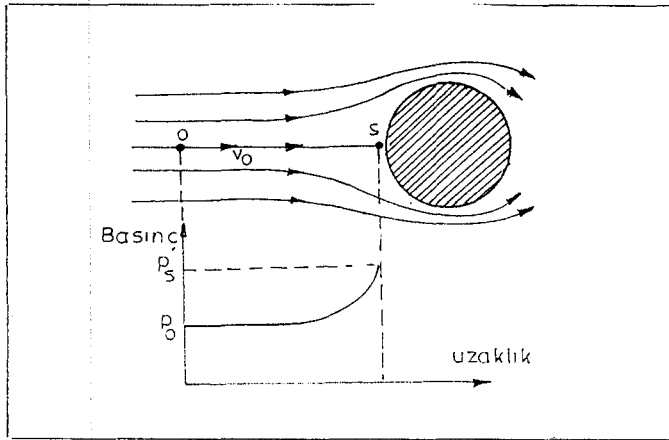
$$\frac{P_s}{P_0} = 1 + \frac{1}{2} \gamma M^2 \quad (3.60)$$

elde edilebilir.

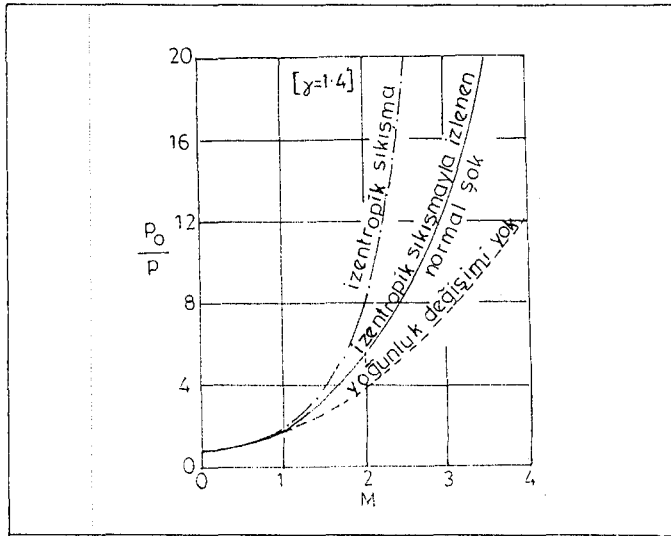
İkinci durumda ise Bernoulli denklemi yerine enerji denkliği kullanılarak

$$C_p T_s = \frac{u^2}{2} + C_p T_0 \quad (3.61)$$

$$\frac{T_s}{T_0} = 1 + \left(\frac{u^2}{2C_p} \right) T_0 \quad (3.62)$$



Şekil 3.3 Durgunluk basıncı (Madill, 1983).



Şekil 3.4 Üç farklı hipoteze göre hesaplanmış durgunluk basıncı değerleri (Francis, 1975).

bağıntıları ile mükemmel gaz ve izentropik sıkıştırma için sırasıyla,

$$\left[\frac{P_s}{P_0} \right] \left[\frac{\rho_0}{\rho_s} \right] = 1 + \left[\frac{u^2}{2C_p} \right] \left[\frac{\rho R}{P} \right] \quad (3.63)$$

$$\left[\frac{P_s}{P_0} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1 + \left[\frac{\gamma-1}{2} \right] M^2 \quad (3.64)$$

bağıntıları yazılabilir. Burada subsonik akım sözkonusudur ve şok dalgası yoktur; akış izentropik olarak düşünülebilir. Buna göre,

$$\frac{P_s}{P_0} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3.65)$$

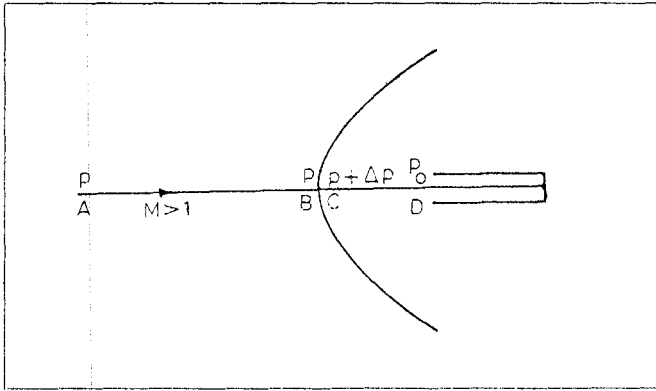
eşitliği, Mach sayısının küçük değerleri için şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{P_s}{P_0} = 1 + \frac{1}{2} \gamma M^2 \left[1 + \frac{1}{4} M^2 + \dots \right] \quad (3.66)$$

$M > 0.2$ olması durumunda Denk.3.61 ve 3.67 uyarınca P_s 'nin değerleri arasındaki fark $1/2 \rho u^2$ 'nin %1'ini geçer.

Pitot tüpünün süpersonik bir akımda bulunduğu durumda ise (Şekil 3.5), ABCD hattı boyunca A'dan B'ye kadar basınç değişimi yoktur; C'de ani bir artış olur ve sonra basınç C'den D'ye sürekli bir artış gösterir ve sıfırlanır. C'de basınç ve Mach sayısı için

$$\frac{P_c}{P_0} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M^2-1) \quad (3.67)$$



Şekil 3.5 Pitot tüpünün ucundaki basınç değişimleri ve şok dalgası oluşumu (Francis, 1975).

$$M = \sqrt{\frac{(\gamma M^2 + 1) - (M^2 - 1)}{2(\gamma M^2 + 1) - (\gamma + 1)}} \quad (3.68)$$

D'deki basınç için ise Denk.3.65 yardımıyla

$$\frac{P_s}{P_c} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (3.69)$$

ilişkileri yazılabileceğinden,

$$\frac{P_s}{P_0} = \left[\frac{(\gamma+1) \left[(\gamma+1) M^2 / 2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}{2(\gamma M^2 + 1) - (\gamma+1)} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (3.70)$$

bağıntısı bulunur.

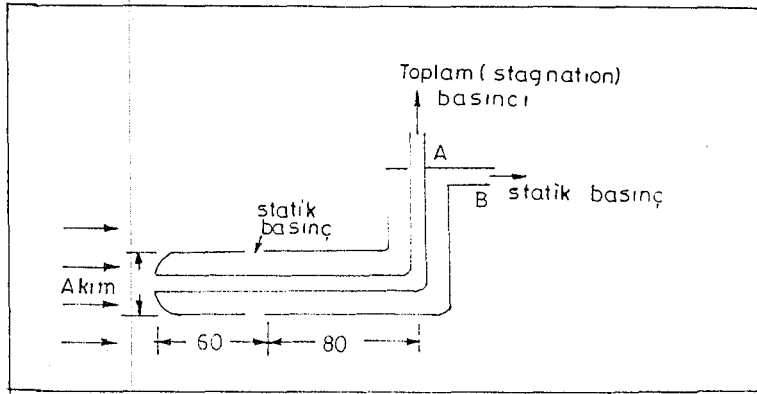
İyi dizayn edilmiş bir pitot tüpünün ölçtüğü hız, bu denklemlere uymalı ve teorik hata %1'den fazla olmamalıdır. Kesin ölçümler yapılırken pitot tüpü mutlaka kalibre edilmeli ve uygun düzeltme faktörü (genellikle 0.98-1.00) ve kalibrasyon için, hızı bilinen bir rüzgar tüneli kullanılmalıdır.

Pitot tüpünün değişik amaçlara yönelik çeşitli konfigürasyonları mevcuttur (pitot-statik tüpü, averaging-pitot tüpü ve S-tipi pitot tüpü) (McCabe and Smith, 1976; Francis, 1975; EİE, 1988; Madill, 1983; Kirk-Othmer, 1978; McGraw-Hill, 1982; Hayward, 1979; Ower and Dankhurst, 1977; Cheremisinoff and Morresi, 1983; Perry and Green, 1984; Harrison and Perry, 1986; Strauss, 1975; Brenchley, Turley and Yarmac, 1973).

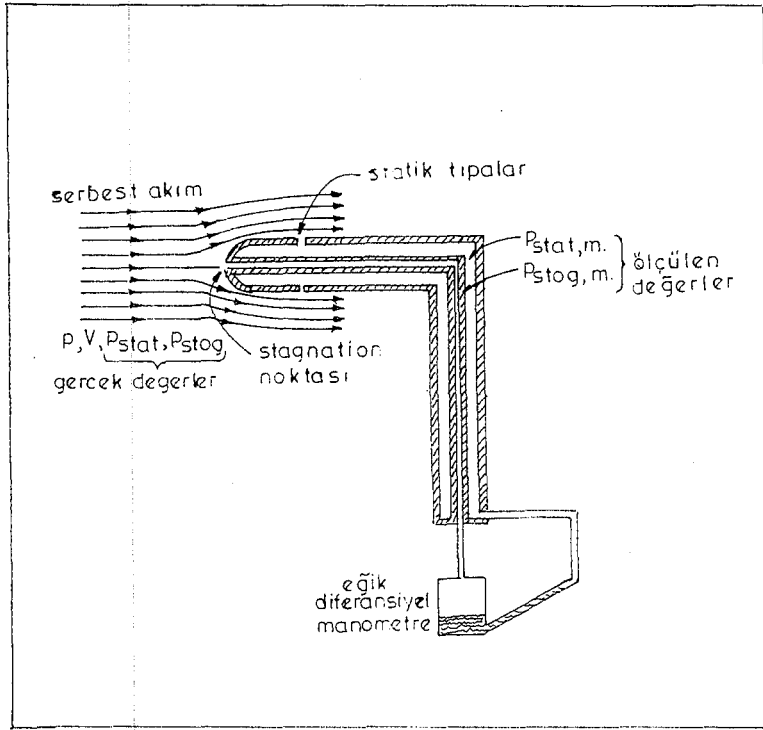
3.2.1.1 Pitot-statik tüpü

Standart pitot tüpü, toplam ve durgunluk basınç farklarını ölçerek dinamik basınç ve akış hızını belirler. Vuruş (impact) ve durgunluk basınçlarını ölçen pitot tüpü ise pitot-statik tüpü veya Prandtl tüpü olarak adlandırılır (Şekil 3.6 (a) ve (b)). Farklı tipleri de mevcut olan (Şekil 3.7) pitot-statik tüpünde yapılan ölçümlerin doğruluğu, doğrudan vuruş ve durgunluk basınçlarının ölçüm performansına bağlıdır. Şekil 3.7'de gösterilen bu iki tip BS 1042'de tanımlanmakta, düşük akım hızları için Şekil 3.6 (b)'deki elipsoidal kafa tavsiye edilmektedir.

ASTM D 3154-72'ye göre hız okumalarındaki doğruluk manometre tipine bağlı olduğundan, beklenen en yüksek okuma değerlerinde % 1 hata payı olan eğik manometrelerin (Şekil 3.6) kullanılması, manometre okumalarındaki ani sapmaların (fluctuations) ve bu sapmaların sürekliliğinin en aza indirilmesi gerekir (aksi takdirde sadece ortalama bir okuma değerinin tahmini mümkün olur).



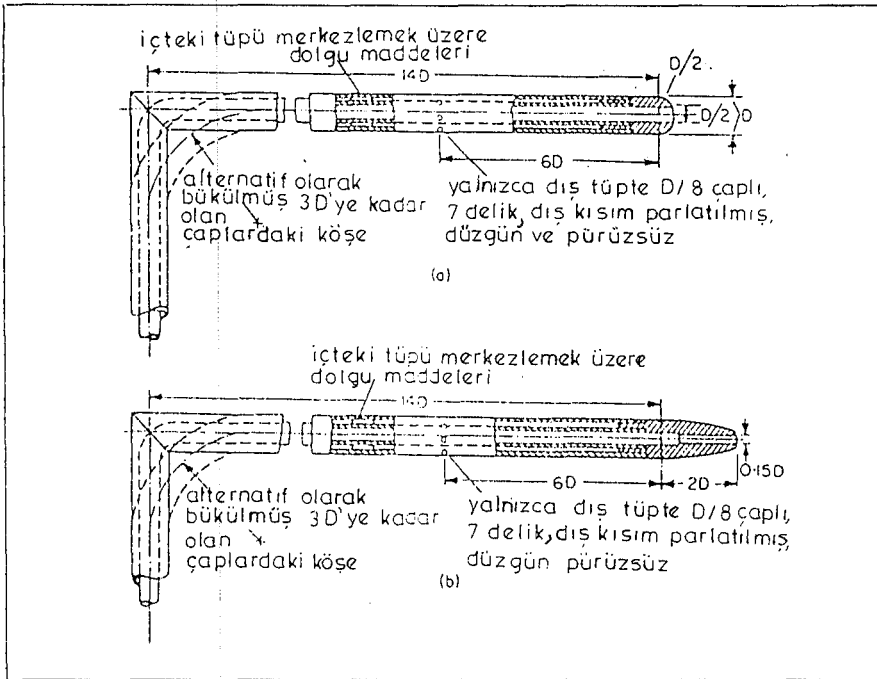
(a)



(b)

Şekil 3.6 Pitot-statik tüpünün iki değişik gösterimi
(Madill, 1983; Doebelin, 1983).

Bu tür sapmalar ana borudaki sürekli hız sapmalarından veya pitot tüpü bağlantılarında tutulmuş nem veya partiküllerin varlığından kaynaklanır. Bu sorunlar akış hattının girişine bir durgunlaştırma kamarası (surge or damping chamber) konularak önlenabilir. İkinci problemi önlemek üzere manometre pitot tüpüne, boruya yerleştirilmeden önce bağlanmalıdır. Bu durumda (kaçak olmadığı varsayılırsa) nem veya partiküllerin sisteme giriş şansı azaltılmış olur (Cheremisnoff and Morresi, 1983).



Şekil 3.7 İki geleneksel pitot-statik tüpü (Strauss, 1975)

(a) Yarıküresel başlıklı pitot-statik tüpü

(b) Elipsoidal başlıklı pitot-statik tüpü.

Pitot-statik tüpüyle yapılan ölçümlerde gaz akış hızı;

$$V_0 = C \sqrt{\frac{2g_c(P_s - P_0)}{\rho_0}} \quad (3.71)$$

bağıntısıyla bulunabilir. Ancak 60 m/s'den yüksek hızlardaki gazlar için sıkıştırılabilirlik önemli olduğundan, aşağıdaki denklem kullanılmalıdır:

$$V_0 = C \sqrt{\frac{2g_c \gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{P_0}{\rho_0}\right) \left[\left(\frac{P_s}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right]} \quad (3.72)$$

Bu denklem Mach sayısının 0.7'den büyük olduğu durumlarda (şok dalgasının karışması söz konusu olduğundan) kullanılamaz.

Sağlıklı bir ölçüm yapabilmek için dairesel bacalar eşit alandan oluşan halkalara bölünür ve her bir halka alanında hızı ölçmek amacıyla dik açı yapacak şekilde kesişen iki çap üzerindeki dört noktada işlem yapılır. Çeper yakınındaki hızı ölçmek zor olduğundan hız, log-log grafiğinden, çepere uzaklıktan ve eğimden faydalanılarak hesaplanır. Dikdörtgen kesitli bacalarda veya diğer şekillerde kanal kesiti küçük dikdörtgenlere

bölünerek her bölmenin merkezinde hız ölçümü yapılır. İşlem, kanal / baca çeperinin bir noktasından girerek çapraz noktalardan yapılabileceği gibi tercihen, çepere yakın iki noktada da yapılabilir. Hız farkı okumasının bir veya daha fazla noktada negatif olması durumunda pitot tüpü mutlaka kontrol edilmelidir. Pitot tüpünde herhangi bir aksaklık olmadığı halde örnek alma yeri uygun olmayabilir. Aynı şekilde akımın yönü, baca eksenine göre 30 °den daha fazla ise (standart pitot tüpünün 5 ° döndürülmesiyle hız farkındaki maksimum ve minimum artışların bulunmasında olduğu gibi) seçilen yer uygun değildir. Pitot tüpü çapının, kanal çapının 1/30'unu aşmaması gerekir.

Kanal veya baca kesitinde yapılan çapraz ölçümler sonucunda ortalama hız, aşağıdaki formülden bulunabilir;

$$(V_s)_{ort} = K_p C (\sqrt{\Delta P})_{ort} \sqrt{\left(\frac{T_s}{P_s M_s}\right)_{ort}} \quad (3.73)$$

Burada yaş baca gazının molekül ağırlığı,

$$M_s = M_D(1-f_w) + 18f_w \quad (3.74)$$

bağıntısından, baca için hacimsel emisyon ise,

$$Q_s = 3600 (V_s)_{ort} A_s \quad (3.75)$$

şeklinde hesaplanabilir. Standart koşullara (20 °C ve 1 atm) düzeltilmiş hacimsel emisyon hızı, kuru temel üzerinden,

$$Q_{std} = 3600 (1-f_w) (V_s)_{ort} A_s \left[\left(\frac{293}{(T_s)_{ort}}\right) \left(\frac{P_s}{1.01b}\right) \right] \quad (3.76)$$

eşitliği ile verilebilir. Örnek alma işlemi tamamlandıktan sonra hacimsel emisyon hızının da hesaplanması gereklidir (Harrison and Perry, 1986):

$$M_s = Q_{std} \cdot C_s \quad (3.77)$$

Ucuz ve dayanıklı pitot tüpünün akım ölçümünde kullanılmasına dair pek çok standart yöntem mevcuttur. Bunlardan özellikle EPA Yöntem 1 ve ASTM D3154-72 standartları önemlidir (Kirk-Othmer, 1978; McGraw-Hill, 1982; Hayward, 1979; Ower and Dankhurst, 1977; McCabe and Smith, 1976; Cheremisinoff and Morresi, 1983; Perry and Green, 1984; Harrison and Perry, 1986; Strauss, 1975; Brenchley, Turley and Yarmac, 1973; Miller, 1983; Doebelin, 1983; Francis, 1975; Massey, 1983).

3.2.1.2 Ortalama alan (averaging) pitot tüpü

Noktasal hız değerlerini belirleyen standart pitot tüpleri yanında alan ortalamasına dayanan hız değerlerini ölçen pitot tüpleri (averaging, annubar, deluxe) de geliştirilmiştir. Daha fazla yer kaplayan bu pitot tüplerinin ölçüm aralıkları daha fazladır. Standart pitot tüpü % +2-5 arasında bir doğruluğa sahipken, ortalama alan pitot tüpünde bu oran % +0.55-1.55 arasındadır. Şekil 3.8 (a) ve (b)'de gösterilmiş olan ortalama alan pitot tüpünün üst akım bölgesinde, borunun parçacıklarla tıkanmasını engellemek üzere yüksek basınç oluşturulmaktadır. Ortalama alan pitot tüpleri

- 1) sistemde basınç düşüşünün önemli problemler oluşturduğu durumlarda (ölçüm elemanının çapı küçük olduğundan ihmal edilebilir seviyede basınç düşüşü oluşturur),
- 2) özellikle petrol çıkarma proseslerinde (rigging, scaffolding and cranes) kullanılan 8 in ve daha büyük çaplı borularda (boru kesilmek suretiyle orifis flanşları kaynakla yerine tutturulur; pitot tüpünün yerleştirilmesi yalnızca boru tarafına 1/2-1/4 in'lik bağlantı elemanlarının (coupling) eklenmesini gerektirir ve maliyeti düşüktür);
- 3) boruların yerinden hareket ettirilemediği durumlarda (1/4 in'lik bir vana ve manşon (coupling) aracılığıyla sıcak manşon (hot tap) bulunan boruya bu pitot tüpü bağlanabilir)

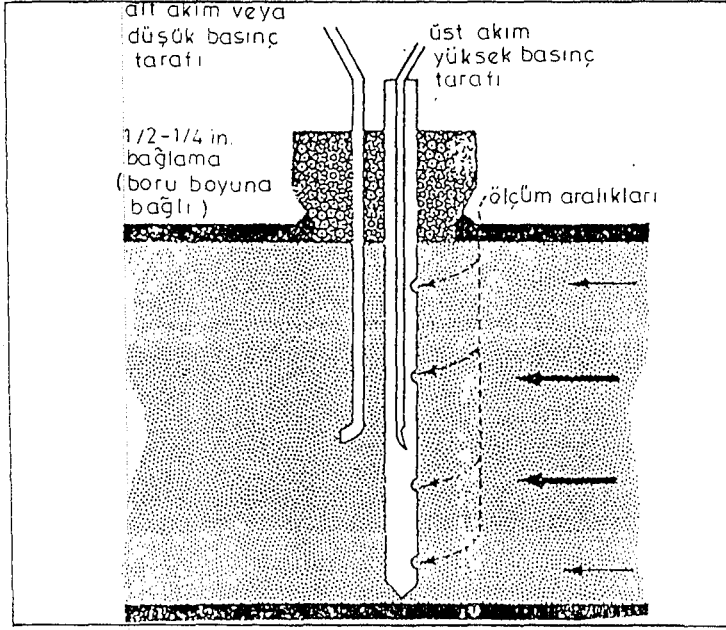
kullanılabilir (May, 1978).

3.2.1.3 S-tipi pitot tüpü

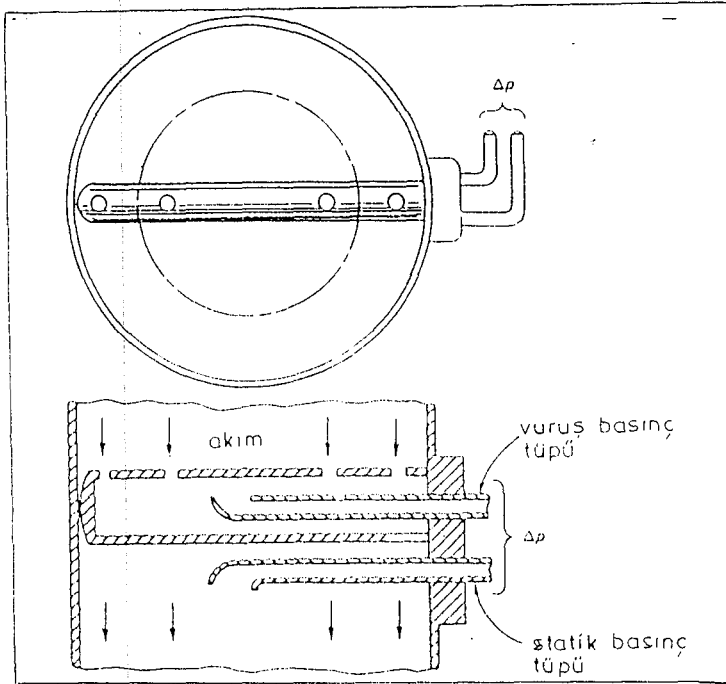
Standart pitot tüpüne kıyasla daha yüksek basınç farklarını ölçmek amacıyla geliştirilen ve genellikle paslanmaz çelikten imal edilen S-tipi (ters) pitot tüpü baca içine daha kolay yerleştirilmekte, partikül ve nem içeriği yüksek olan akımlarda tıkanmaya karşı daha dirençli olabilmekte ve iki yönlü olduğundan, akım tersine çevrilebilmektedir. Şekil 3.9'da gösterilen S-tipi pitot tüpünün akışa açık yüzü ile akımın dinamik basıncı ölçülebilir. Tüpün akıma dik olmayan diğer açık kısmı gerçek statik basınç ölçümüne elverişli değildir. Ters pitot tüpünün bir dezavantajı yüksek sapma duyarlılığına sahip olmasıdır. S-tipi pitot tüpleri aynı noktadaki hız basınçlarını hem S-tipi hem de standart pitot tüpü ile ölçerek kalibre edilmelidir. S-tipi pitot tüpünün kalibrasyonu (EPA Yöntem 2) için

$$C_{P_{test}} = C_{P_{std}} \left[\frac{\Delta P_{std}}{\Delta P_{test}} \right]^{1/2} \quad (3.78)$$

bağıntısından yararlanılabilir.



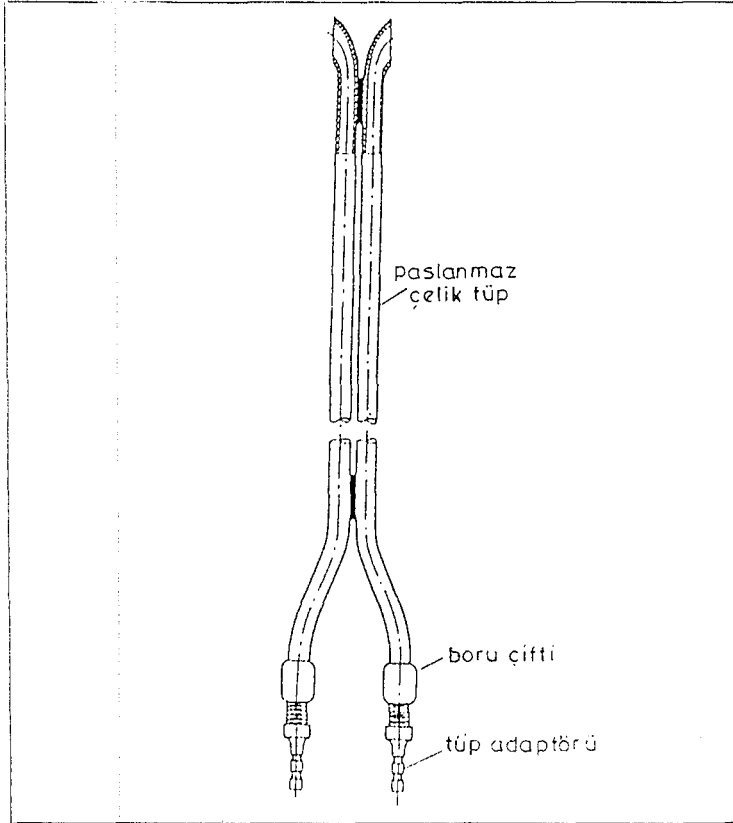
(a)



(b)

Şekil 3.8 Ortalama alan pitot tüpünün iki değişik gösterimi (May, 1978; Doebelin, 1983).

S-tipi pitot tüpünün katsayısı için (standart pitot tüpünün katsayısı bilinmediği takdirde) 0.99 değeri kullanılabilir (Cheremisinoff and Morresi, 1983; Kirk-Othmer, 1978; McGraw-Hill, 1982; Strauss, 1975; Brenchley, Turley and Yarmac, 1973).



Şekil 3.9 S-tipi pitot tüpü (Strauss, 1975).

3.2.2 Orifis ile debi  l m 

Sürekli akım ölümleri için uygun olan orifis, basit bir delikli plakadan ibarettir; prensibi kesit alanındaki ani k  ilme nedeniyle plakanın içinden geçmekte olan akışkan akımının hızının artması ve tıpalara takılan manometre yardımıyla basınç d ŐuŐ n n  l lmesine dayanır. Genellikle, buhar akıŐlarını ölçmek için kullanılan orifis, diğer akış ölüm aletlerine göre ucuz olup kurulması ve kullanımını kolaydır. Orifiste ampirik genişleme faktörünün kullanılmasıyla sıkıştırılabilirlik etkisi bulunabilir. AŞınmaya (abrazyona) karşı da dayanıklı olan orifis % 2-3 doğruluğa sahiptir. Cihaz katı içeriği düşük olan akımlar için tercih edilir.

Orifiste, basınçtaki azalma ile hızdaki artış arasındaki ilişki için Bernoulli denkleminde yararlanılır. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, venturidekine benzer bir yol izleyen akışkan akımı, orifisten, yaklaşık olarak orifis çapının yarısı kadar bir uzaklıkta iyice daralmakta (vena kontrakta) ve bu bölümlerle kanal çeperi arasında pek çok mikrogirdaplar meydana gelirken akış hızı maksimum, basınç ise minimum değerine ulaşmaktadır. Kinetik enerjinin önemli kısmının ısıya dönüştüğü bu bölgede akımın daralma (vena kontrakta) çapı ölçülemediğinden hesaplamalarda genellikle orifis çapı esas alınır. Sürtünme kayıpları nedeniyle aynı basıncın yeniden kazanılması imkansızdır. Orifisin bu dezavantajı orifis çapının boru çapına oranına (β) bağlıdır. Basınçtaki bu fraksiyonel kayıp ile β arasındaki ilişki Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Orifiste venturide bulunmayan, jet şeklindeki akımın ikiye bölünmesi sorunu vardır. Jet, akım hattı duvarının kontrolü altında değildir ve jet değişimi orifisin açık olan kısmındadır. Bu alanın kesin yerinin tanımlanması ise kolay değildir. Altakım tarafındaki jetin hızı, orifis çapıyla da doğrudan ilişkili değildir.

Orifis için hız denklemi Bernoulli denkleminde yararlanılarak yazılabilir;

$$u_0 = \frac{C_0}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2g_c(P_1-P_2)}{\rho}} \quad (3.79)$$

Hızı içermeyen C_0 katsayısı, akışkan jetinin daraldığı yer (vena kontrakta) ile orifis arasındaki düzeltme için deneysel olarak bulunan bir sürtünme katsayısıdır. Bu katsayı, Reynolds sayısına ve β 'ya bağlı olarak değişir. Burada,

$$Re = \frac{D_0 u_0 \rho}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi D_0 \mu} \quad (3.80)$$

şeklinde tanımlanan Reynolds sayısının $Re < 20000$ olduğu durumlarda C_0 , β 'dan bağımsız ve sabittir. Bu koşullarda $C_0=0.61$ alınabilir. Ayrıca, $\beta < 0.25$ ise, $\sqrt{1-\beta^4}$ terimi 1.0'den çok az farklıdır ve Denk.3.79 şu şekli alır;

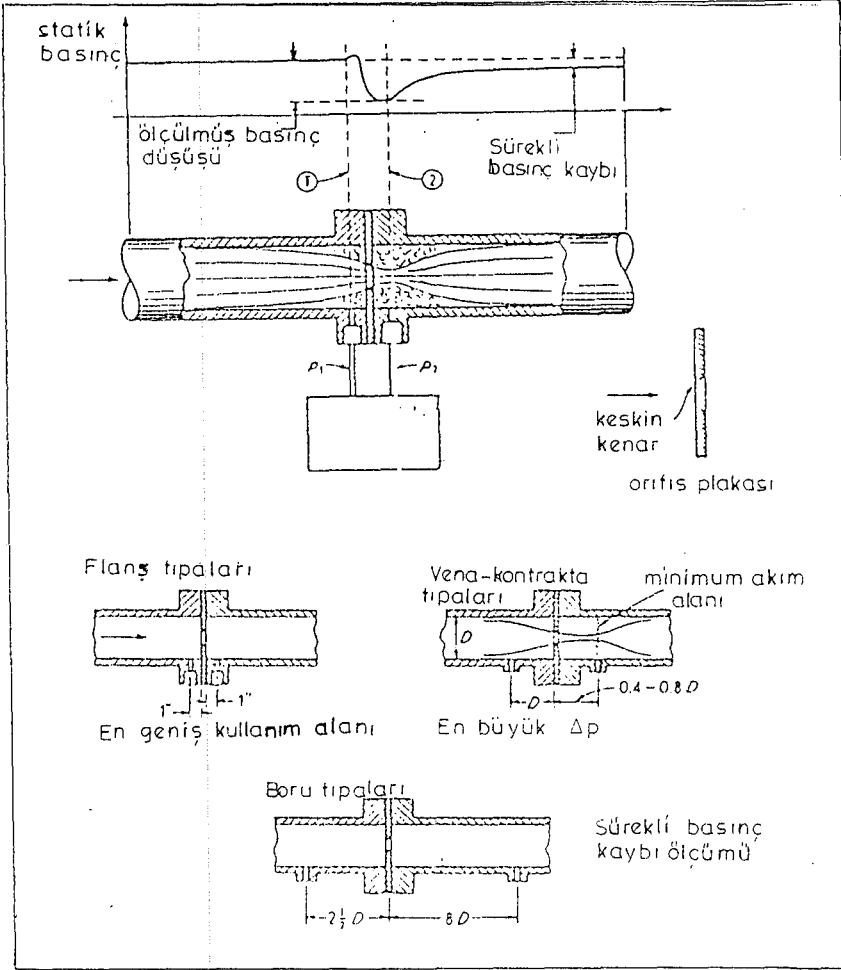
$$u_0 = 0.61 \sqrt{\frac{2g_c(P_1-P_2)}{\rho}} \quad (3.81)$$

Kütleli akış hızı (\dot{m}) için,

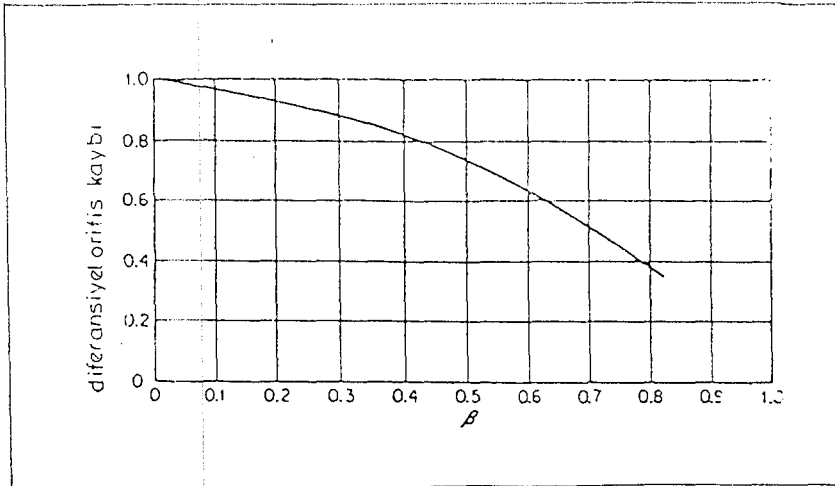
$$\dot{m} = 0.61 Y S \sqrt{\frac{2g_c(P_1-P_2)}{\rho}} \quad (3.82)$$

yazılabilir. Burada Y, boyutsuz genişleme faktörü olup standart keskin uçlu orifisler için

$$Y=1-\frac{0.41+0.35\beta^4}{\gamma}\left(1-\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (3.83)$$



Şekil 3.10 Orifisle debi ölçümü (Doebelin, 1983).



Şekil 3.11 Orifisteki toplam basınç kaybı (McCabe and Smith, 1976).

bağıntısı kullanılır. Hava için Y'nin tipik değerleri Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Bu şekil $P_2 / P_1 < 0.53$ değerleri için (hava akımının kritik basınç oranı sonik olduğundan) kullanılamaz.

Denk.3.82'deki orifis kesit alanı (S_0),

$$S_0 = \frac{D_a^2 S_0}{D_a^2} = \frac{D_a^2 (\pi/4) D_0^2}{D_a^2} = \frac{\pi}{4} (D_a \beta)^2 \quad (3.84)$$

şeklinde hesaplanabilir. β 'nin doğrudan hesaplaması için

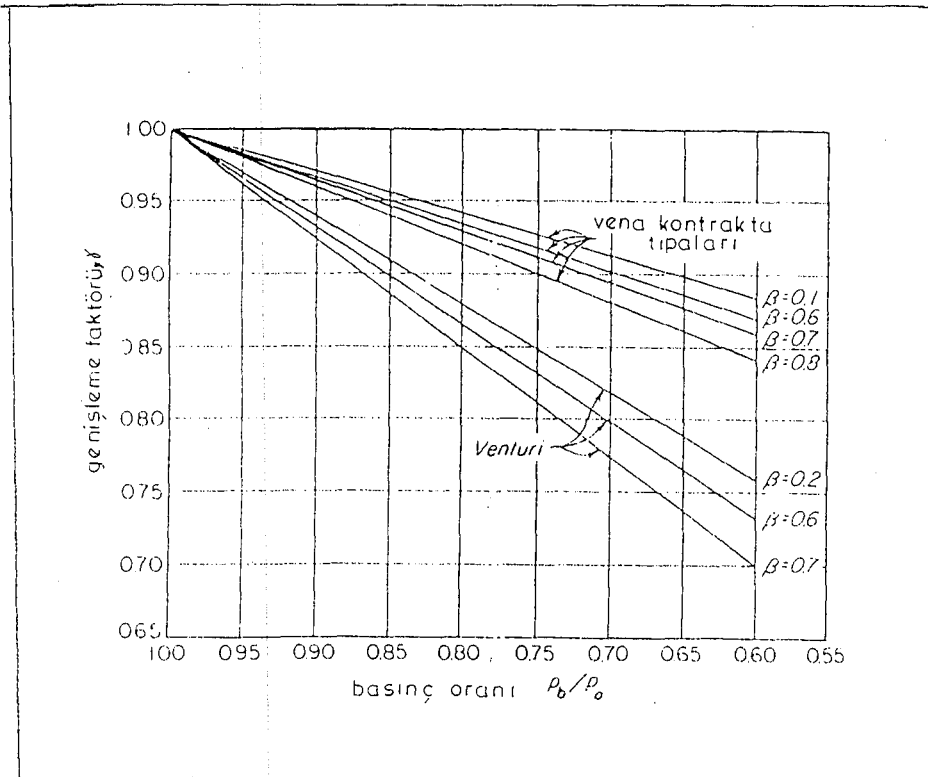
$$\beta^2 = \frac{4m}{0.61\pi D_a^2 \sqrt{2g_c(P_1 - P_2)\rho}} \quad (3.85)$$

bağıntısından yararlanılabilir. Tam bir kesinlik istenmediği müddetçe Denk.3.85 orifis dizaynı için yeterlidir.

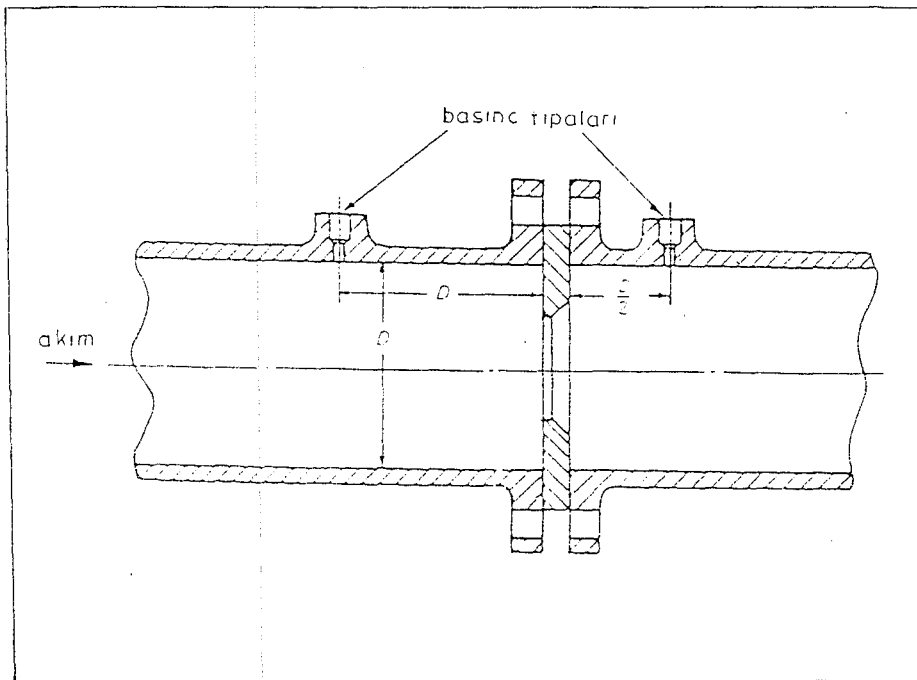
Genellikle dairesel, konsantrik bir orifis ile borudan meydana gelen orifis plakalarının geometrisinde çok çeşitli değişiklikler yapılabilir (özellikle basınç tıplarının pozisyonu ve orifisin üst tarafındaki ucunun şekli değiştirilebilir). Tipik bir orifis plakası düzeninin gösterildiği Şekil 3.13'de tıplar, iki bitişik borudan bir boru çapı (D) kadar alt akımda, bu uzaklığın yarısı (D/2) kadar da üst akım tarafındadır. Tıpların orifis plakasına bitişik boru bağlantılarına yerleştirilme şekli de değiştirilebilir.

Şekil 3.13'deki orifis plakası altakım tarafındaki şekli dolayısıyla, kare kenarlı (square edged) olarak tanımlanır. Bu durumda altakım ucuna açılmış olan kanal daha önemlidir. Orifis plakalarının bu genel şekli, temiz gazlar (düşük viskozitede) için evrensel olarak kullanılır. Uygulamada delik çapının boru çapına oranı genellikle 0.2 ve 0.75 arasında olup doğruluk % + 0.8-5.0 arasındadır. Kare kenarlı orifis plakası dışında, genellikle sıvı akışları için kullanılan dörtgen ve konik kenarlı, integral ve ayrı merkezli ve kesimli orifisler de mevcuttur (Miller, 1983).

Geometri açısından çeşitlilik gösteren orifis plakaları, yanmanın olduğu doğal çekişli sistemler için uygun olmamakla birlikte, fanla çekişin olduğu yerlerde iyi sonuç vermekte; delik açıklıkları küçüldükçe hassasiyetleri artmaktadır. Bu cihazlar verimli çalışabilmeleri için, herhangi bir daralma yerinden veya boruda türbülanslı akış oluşturan kaynaklardan olabildiğince uzağa yerleştirilmelidirler.



Şekil 3.12 Hava akım ölçerleri için genişleme faktörleri (McCabe and Smith, 1976).



Şekil 3.13 Kare uçlu orifis plakası (Hayward, 1979).

Bir kanal / bacadan örnek alma işlemi sırasında orifisle ölçüm yapılabilmesi için herşeyden önce orifis dizaynının hatasız olması, keskin kenarlı orifislerin kullanılması ve örneklemenin izokinetik koşullarda (gazın ve çevresindeki hızın aynı olduğu durumda) yapılması gerekir. İngiliz Standartlar Enstitüsü, minimum orifis çapının 0.375 in. (~ 10 mm.) olmasını tavsiye etmektedir. Bu boyutun altında yüksek toz derişimleri tıkanmaya yol açar ve genel olarak küçük çaplı tiplerde duvar kayıpları artar. Örnek alma debileri 3 mm'lik bir orifis ve 6 m/s hız için 3 lt/dk iken, 15 mm çaplı orifis için 75 lt/dk 'dır. Orifis plakasının kullanımına dayanan örnek alma işlemlerinde (EPA Yöntem 5; Sabit Kaynaklarda Partikül Emisyonlarının Belirlenmesi) plaka içinden geçen hız, basınç düşüşünün bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir;

$$u_0 = C_0 \sqrt{\frac{\Delta P_0}{2g_c \frac{\rho}{\rho_0}}} \quad (3.86)$$

Orifisle örnek alma işleminde genellikle altakım yönüne nem yoğunlaştırma düzeneği konulduğundan, eğik probun içinden geçen gaz akışı ile orifis içinden geçen gaz akımı ilişkilidir.

$$Q_0 = Q_p \left(\frac{T_0}{T_p}\right) \left(\frac{P_p}{P_0}\right) f_{dg} \quad (3.87)$$

Ayrıca

$$Q_p = V_p \left(\frac{\pi D_p^2}{4}\right) = V \left(\frac{\pi D_p^2}{4}\right) \quad (3.88)$$

ve

$$Q_0 = V_0 \left(\frac{\pi D_0^2}{4}\right) \quad (3.89)$$

yazılabileceğinden,

$$C_0 \sqrt{\frac{\Delta P_0}{2g_c \frac{\rho}{\rho_0}}} \left(\frac{\pi D_0^2}{4}\right) = C \sqrt{\frac{\Delta P}{2g_c \frac{\rho}{\rho_0}}} \left(\frac{\pi D_p^2}{4}\right) \left(\frac{T_0}{T}\right) \left(\frac{P}{P_0}\right) f_{dg} \quad (3.90)$$

ifadesi aracılığı ile

$$\Delta P_0 = \left[\left(\frac{C}{C_0}\right) \left(\frac{D_p^2}{D_0^2}\right) \left(\frac{T_0}{T}\right) \left(\frac{P}{P_0}\right) \right]^2 f_{dg}^2 \left(\frac{\rho_0}{\rho_p}\right) \Delta P \quad (3.91)$$

bağıntısı bulunur. Yaklaşık gaz yoğunluklarının bulunmasında kullanılan

$$\rho_0 = \frac{P_0 M_0}{P T_0}, \quad \rho = \frac{P M}{P T} \quad (3.92)$$

denklemleri birleştirilerek basitleştirme yapıldığında,

$$\Delta P_0 = \left\{ \left[\left(\frac{C}{C_0} \right) \left(\frac{D_p^2}{D_0^2} \right) f_{dg} \right]^2 \left(\frac{T_0}{T} \right) \left(\frac{P}{P_0} \right) \left(\frac{M_0}{M} \right) \right\} \Delta P \quad (3.93)$$

veya

$$\Delta P_0 = K \Delta P \quad (3.94)$$

şeklinde bir ilişki elde edilir.

İzokinetik koşullarda, orifis içindeki basınç düşüşü, pitot tüpüyle ölçülen basınç farkıyla orantılıdır. Orantı sabiti ,

- 1) pitot tüpü ve orifis kalibrasyon faktörleri (C ve C₀)
- 2) prob ve orifis çapları (D_p ve D₀)
- 3) baca içindeki gazın nem içeriği (1-f_{dg})
- 4) baca içindeki gazın sıcaklık, basınç ve molekül ağırlığı (T, P ve M)
- 5) orifis içindeki gazın sıcaklık, basınç ve molekül ağırlığı (T, P ve M)

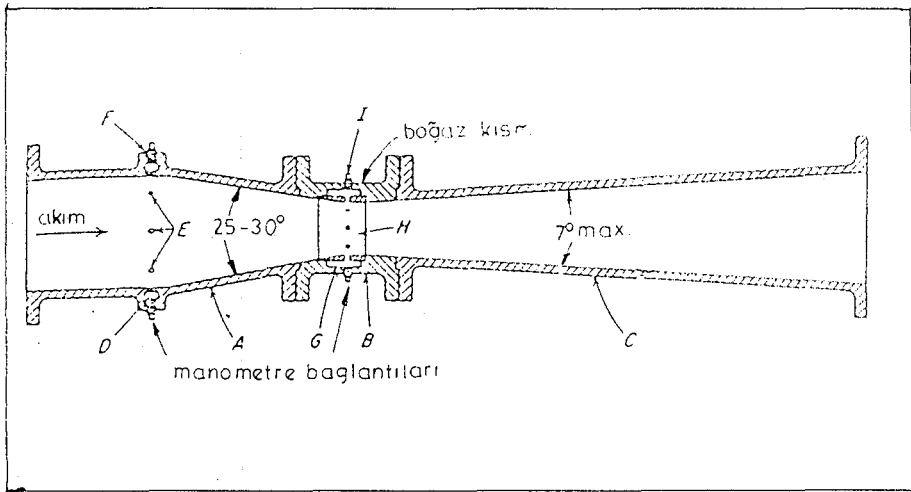
değerlerinin fonksiyonudur (Francis, 1975; Doebelin, 1983; McCabe and Smith, 1976; Kirk-Othmer, 1978; Harrison and Perry, 1986; Cheremisinoff and Morresi, 1983; Miller, 1983; Dorman, 1974; Schmidt, 1989; Brenchley, Turley and Yarmac, 1973; Hayward, 1979; Madill, 1983).

3.2.3 Venturi ile debi ölçümü

Venturimetre olarak bilinen ve bir akım engelleme aleti olan venturi tüpü de aslında bir basınç farkı ölçerdir. Tüm akım engelleyici aletler içinde en yüksek doğruluğa sahip olan ve sürekli akış ölçümleri için uygun olan bu cihazın giriş konisi katıların ve kirlerin birlikte akmasına izin verdiği için herhangi bir birikim söz konusu değildir ve tamamen akışkan ile doldurulduğundan, borunun herhangi bir yerine konulabilir. Düşük basınç farklarında oldukça doğru sonuçlar veren venturimetre aşınmaya (abrazyona) karşı dirençlidir ve gazlar için rahatlıkla kullanılabilmesine karşın oldukça maliyetli olması, fazla yer kaplaması ve zor yerleştirilmesi nedeniyle tercih edilmemektedir.

Akım engelleyici cihazların en önemli dezavantajı basınç düşüşünün akış hızının karesiyle orantılı olarak değişmesidir. Bu nedenle geniş bir akış hızı aralığında kullanım için çok geniş aralıklı basınç ölçüm ekipmanı gerekir. Bu da genellikle düşük akım hızlarında doğruluğu azaltır.

Şekil 3.14'de görülen venturimetrede akışın giriş bölümü kısa, silindirik ve kesik koni biçimindedir. Giriş kısmının açısı bazı literatürlerde $21^\circ \pm 2$, bazısında ise 25° olarak verilmektedir. Şekildeki B bölümü boğaz kısmı, C ise uzun ve kesik koni biçimindeki çıkış kısmıdır. Giriş kısmında olduğu gibi çıkış kısmının açısı hakkında da farklı literatür bilgileri mevcuttur. Şekilde 7° olarak gösterilen bu açının, bir diğer literatürde $5-15^\circ$ arasında olması gerektiğinden bahsedilmektedir. Difüzör kısmı açısının mümkün olduğu kadar küçük tutulması, sınır tabakası ayrılmasını önlediği gibi sürtünmeyi de minimuma indirerek basıncın % 90'ının geri kazanılmasını sağlar. Bazı durumlarda giriş ve boğaz arasındaki sürtünme oldukça küçüktür ve sürtünme etkin olduğu için boğazda hızın uniformluğu bozulur (Holman, 1978; Perry and Green, 1984). Üstakım bölümünde silindirik ve konik kısımların birleştirildiği halka şeklinde bir bölümle (D), bir seri küçük delik (E) vardır. Dairesel halka şeklinde olan bu küçük deliklerin (piezometre halkası) her birinin içinden ayrı basınç geçişi vardır ve ortalama basınç F ile ilişkilidir. İkinci piezometre halkası boğaz kısmındadır ve basınç I bölümünde ölçülür. Basınç farkı F ve I tıparaları arasına yerleştirilen bir basınç ölçer ile belirlenebilir. Venturinin üstakım konisinde hız artarken basınç azalır. Bu basınç düşüşünden yararlanarak akış hızı ölçülür.



Şekil 3.14 Venturi tüpü (Bird, 1960; McCabe and Smith, 1976).

Venturi içinden geçen sıkıştırılabilir akışkan için kütle ve enerji denklileri

$$m = \rho_1 \langle v_1 \rangle A_1 = \rho_2 \langle v_2 \rangle A_2 \quad (3.95)$$

$$\frac{\langle v_2 \rangle^2}{2 \alpha_2} - \frac{\langle v_1 \rangle^2}{2 \alpha_1} + \int_1^2 \frac{1}{\rho} dp + \frac{1}{2} \langle v_2 \rangle^2 e_v = 0 \quad (3.96)$$

şeklinde yazılabilir. Her iki denklemden $\langle v_1 \rangle$ ve $\langle v_2 \rangle$ terimleri yok edildiğinde,

$$m = \rho_2 A_2 \sqrt{\frac{-2 \alpha_2 \int_1^2 \left(\frac{1}{\rho}\right) dp}{2}} \quad (3.97)$$

$$1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \left(\frac{\rho_2 A_2}{\rho_1 A_1} \right) + \alpha_2 e_v$$

bulunur. Denk.3.97 $e_v=0$, $\alpha_1=1$ ve $\alpha_2=(A_2/A_0)^2$ varsayımları yapılarak tekrar yazılırsa,

$$m = C_d \rho_2 A_0 \sqrt{\frac{-2 \int_1^2 \left(\frac{1}{\rho}\right) dp}{2}} \quad (3.98)$$

$$1 - \left(\frac{\rho_2 A_0}{\rho_1 A_1}\right)$$

bağıntısı elde edilir. C_d katsayısının mutlaka deneysel olarak belirlenmesi gerekir. İyi dizayn edilmiş bir venturimetre için C_d 0.98'dir (C_d 'nin 1.0'den büyük çıkması hatalı manometre bağlantılarının bir sonucudur). Venturimetreler için bu değer minimum kesit alanına ($A_2=A_0$) sahip olan 2 nolu noktada kullanılabilir. Ayrıca α_2 , 1.0'e yeterince yakın olmalıdır.

Denk.3.98'in kullanımı için, akışkan yoğunluğunun basınca bağlılığı bilinmelidir. Sürtünmesiz adyabatik koşullarda ideal gazlar için $P \cdot \rho^{-\gamma} = \text{sb}$. Denk.3.98 yardımıyla

ideal gaz
sürtünmesiz
ady. akış

$$m = C_d \rho_2 A_0 \sqrt{\frac{2 \left(\frac{P_1}{\rho_1} \right) \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right]}{1 - \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}}}} \quad (3.99)$$

bağıntısı yazılabilir.

Venturimetrede, ikinci kısmın çapının birinci kısmın çapına oranı genellikle 1/2 'dir ($A_2/A_1=1/4$ ve $u_2/u_1=4$). Ancak daha dar boğaz alanı, basınç farklarının daha doğru ölçülmesini sağlar. Burada genişleme (divergent) kısmındaki enerji geri kazanımı daha büyüktür (Holman, 1978; Kirk-Othmer, 1978; McGraw-Hill, 1982; McCabe and Smith, 1976; Hayward, 1979; Perry and Green, 1984; Cheremisinoff and Morresi, 1983; Miller, 1983; EİE, 1988; Massey, 1983; Bird, Stewart and Lightfoot, 1960).

3.2.4 Nozul ile debi ölçümü

Nozul, akımın geçtiği kesit alanını değiştirerek, akışkanın kinetik ve iç enerjisini değiştiren bir alettir. Basıncı azaltarak akışkan hızının artırılması prensibine göre çalıştırılan nozulun içindeki akış oldukça hızlı, ısı alışverişi ise yavaş olduğu için uygulamada akışın adyabatik koşullarda olduğu varsayılabilir. Pratikte uygun tasarımla tersinirlik sağlanabileceğinden nozul içindeki tüm basınç dağılımı akışkanın kinetik enerjisini artırabilir ve viskoz etkiler yenilebilir. Cihaz, sıvılar ve gazlar için basınç farkı ölçer olarak, sadece gazlar için de sonik (kritik) hız düzenleyici ve ölçer olarak kullanılır.

Şekil 3.15'de basınç farkı ölçer olarak dizayn edilmiş nozullar gösterilmektedir. Orifis plakalarına kıyasla oldukça pahalı, düzeltme katsayıları 1.0'e çok yakın, atmosfer ortamına doğrudan uzatılması mümkün olan bu sistemler kirli ve aşındırıcı akışkanlar için de kullanılabilir; değişken ve zor ölçüm koşulları altında bile doğru sonuç alınmasını sağlarlar. Basınç farkları boruya yerleştirilmiş tıplar arasında ölçülür. Tıpalardan birisi nozulun altakım yönünde D kadar bir uzaklığa, diğeri ise üstakım yönünde D/2 kadar uzağa yerleştirilir.

Adyabatik ve tersinir akış durumlarında nozuldaki basınç, sıcaklık, yoğunluk ve entalpi, izentropik koşullarla ilgilidir. Bu ilişki ideal gaz için basitçe kapalı formda

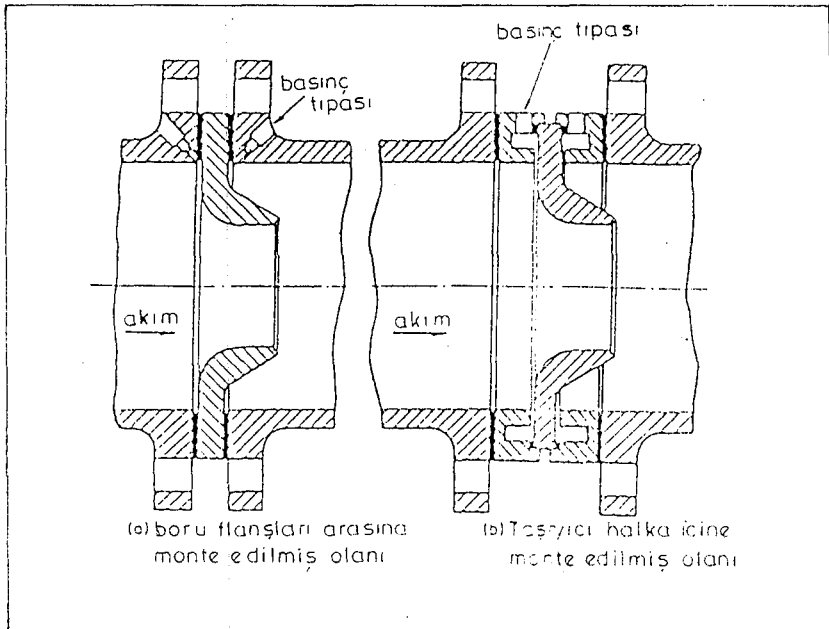
gösterilebilirken, ideal olmayan gazlarda Mollier diyagramı gibi uygun bir diyagramdan yararlanılabilir (Balzshiser, 1972). Şekil 3.16'da gösterilen tipte genişleyen bir nozul için yataşkın hal süreklilik ve enerji denkliklerinde ısı ve iş terimleri olmayacak ve potansiyel enerji etkileri ihmal edilebilecektir. Buna göre enerji balansı,

$$(H_2 - H_1) + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g_c} = 0 \quad (3.100)$$

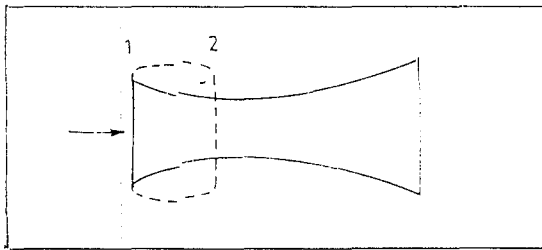
şeklinde basitleştirilebilir veya ($u_1 < u_2$ ise $u_1^2 \ll u_2^2$ olacağından, u_1^2 ihmal edilebilir)

$$u_2^2 = 2g_c(H_1 - H_2) \quad (3.101)$$

tarzında ifade edilebilir. Eğer 2 noktasındaki basınç biliniyorsa, H_2 ve T_2 uygun bir tablodan bulunabilir. Giriş koşullarına (P_1 ve T_1) bağlı olarak 2 noktasındaki basınç Denk.3.101'den hesaplanabilir. Kütleli akış hızı, 2 noktasındaki alanda süreklilik denkleminde bulunur.



Şekil 3.15 Nozulun iki tipi (Hayward, 1979).



Şekil 3.16 Converging-diverging nozul (Balzshiser, 1972).

$$A_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 u_2} \quad (3.102)$$

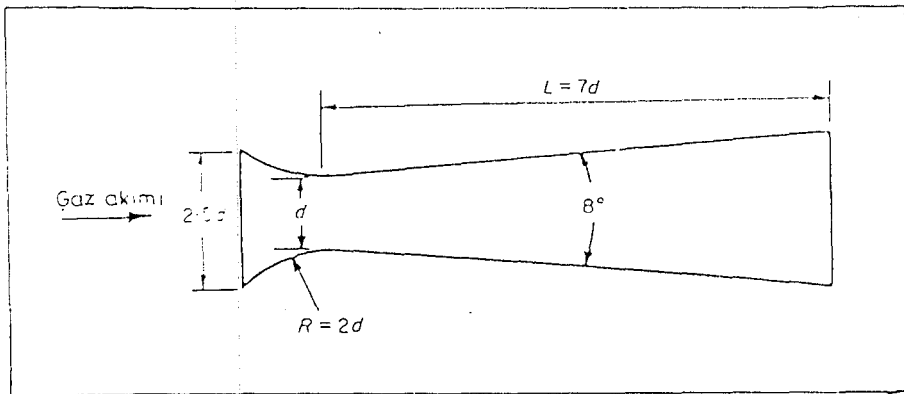
$$m = \rho_2 u_2 A_2 = sb. \quad (3.103)$$

Gaz akış hızının yeterince yüksek olduğu durumlarda, basınç farkı da yüksektir ve sonuçta çok küçük bir akım alanında sonik akım koşulları oluşur. Bu koşullarda akım iyice boğulmuş (choked) durumdadır ve verilen giriş koşulları için akış hızı maksimum değerdedir. Sonik nozul olarak adlandırılan bu akım engelleyici alette sabit hacimsel akış hızı doğru olarak hesaplanmakla birlikte gazın değişken basıncı ve yoğunluğu nedeniyle kütleli akım hızı oldukça geniş sınırlar arasında değişmektedir (Holman, 1978).

Altakım yönünde yavaş genişleyen sonik nozullarda, basıncın bir kısmı üst akım tarafında geri kazanılır. Şekil 3.17'de gösterilen sonik venturi nozul, bir hacim ölçerin kalibrasyonu için oldukça uygundur. Çeşitli boyutlarda sonik venturi nozul kullanarak herhangi bir akım ölçerin değişik akım hızlarında kalibrasyonu yapılabilir.

Sabit spesifik ısılarda izentropik sonik nozulda ideal gaz akışı için,

$$\left(\frac{P_2}{P_1 \text{ kritik}}\right) = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3.104)$$



Şekil 3.17 Sonik venturi nozul (Hayward, 1981).

şeklinde verilen kritik basınç oranı,

$$m^2 = 2 g_c A_2^2 \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_1^2}{RT_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\gamma+1/\gamma} \right] \quad (3.105)$$

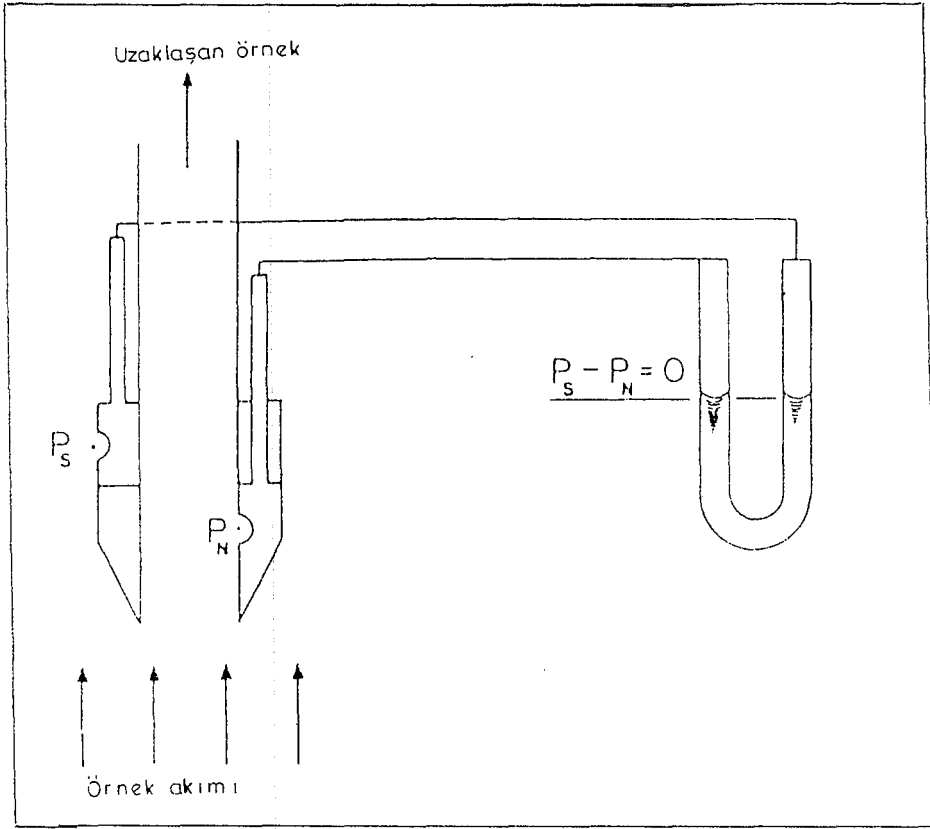
bağıntısında yerine konulursa

$$\dot{m} = A_2 P_1 \sqrt{\frac{2g_c}{RT_1}} \left[\frac{\gamma}{\gamma+1} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{2/\gamma-1} \right] \quad (3.106)$$

elde edilir. Son denklem genellikle basınç oranı kritik değerden daha düşük olan nozullara uygulanır. Bu durumda akış hızı sadece giriş koşullarına (P_1 ve T_1) bağlıdır. Ancak, yüksek basınç düşüşlerinde belli bir hata oranı vardır. Akış nozulu için kritik basınç oranı değeri 0.5 iken, venturi tipi nozullarda basıncı geri kazanmak için bu oranın 0.96 gibi büyük bir değer olması gereklidir. Sonik nozullar genellikle otomotiv karbüratörleri ve emisyon kontrol sistemlerinin akım testlerinde kullanılırlar (Kirk-Othmer, 1978).

Bir baca / kanaldan örnek alma işleminde gaz hızının ölçümü için pitot tüpü her zaman yeterli olmadığı gibi nozulun kullanımında da bazı sınırlamalar söz konusudur. Öncelikle nozul, baca akışının düzenini bozmamalı, alınan örnekteki kirleticinin yapısını değiştirmemeli, örneğe herhangi bir ilavede bulunmamalı (kimyasal olarak inert olmalı) ve boyutu baca girişine konulmaya uygun ve özellikle partikül örneği toplama durumunda, kanaldaki akımı değiştirmeyecek ölçüde küçük çaplı olmalıdır. Ayrıca nozul malzemesi herhangi bir kirleticiyle reaksiyon vermemeli veya kirleticilerin reaksiyonlarında kataliz gibi davranmamalıdır. Nozuldaki hatalı bir eğim (bend), iri partiküllerin çarpmasına (impingment) neden olabildiği için nozulun çapı örnek alma manşonuna (port) uygun olmalıdır (3 veya 4 in).

Bugün, izokinetik koşullardaki nozul statik basıncı ile baca statik basıncının birleştirilmesi prensibiyle çalışan nozul sıfır ayarı tipleri (null balance nozzle) de mevcuttur (Brenchley, Turley and Yarmac, 1973). Şekil 3.18'de gösterilen bu tip bir probun en önemli problemi nozul içindeki sürtünmedir.



Şekil 3.18 Nozul sıfır ayarı tipi (Brenchley, Turley and Yarmac, 1973).

İdeal durumda $P_s = P_n$ 'dir; ancak uygulamada $P_s = P_n + F$ bağıntısı kullanılır. Bu nedenle sıfır ayarı tipi hacim ölçer, S-tipi pitot tüpüyle birlikte sadece kanal veya baca için kalibrasyon işlemlerinde ve izokinetik koşulları sağlamakta kullanılır (Hayward, 1981; Balzshiser, 1972; Brenchley, Turley and Yarmac, 1973; Holman, 1978; Kirk-Othmer, 1978; Francis, 1975; Smith and Van Ness, 1987).

3.2.5 Rotametre ile debi ölçümü

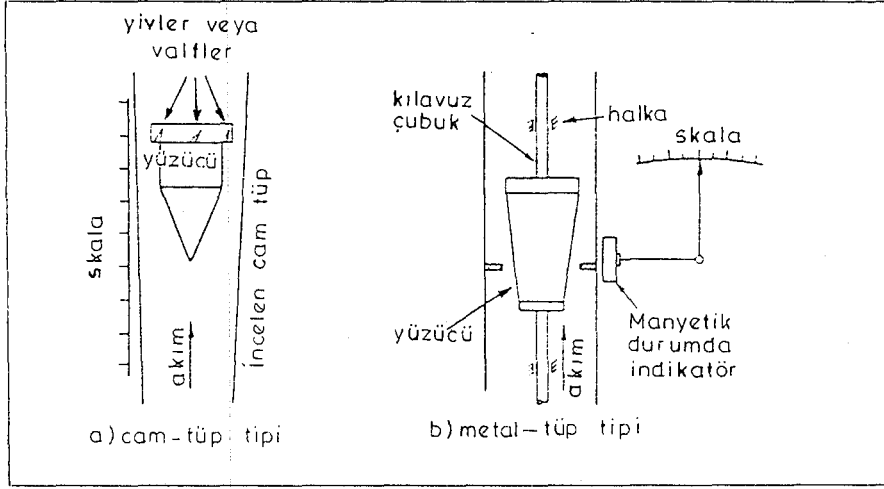
Orifis, venturi veya nozul sabit bir alanda meydana gelen basınç düşüşünün değişiminden akım hızını tespit ederken rotametre, akışkan akımının geçtiği alanın değişken, basınç düşüşünün ise nispeten sabit olduğu durumlarda ölçüm yapan ve doğruluk derecesi % 1-2 olan bir alan ölçerdir (Şekil 3.19). Rotametre bazı korozyif akışkanlarda rahatlıkla kullanılabilir. Aşağı doğru incelen, düşey bir tüp ile akıma göre hareket eden ve askıda duran bir yüzücüden oluşan rotametrenin yüzücü veya tüpünün değiştirilmesiyle kapasitesi kolaylıkla değiştirilebilir. Ancak biraz pahalıdır; opak

akışkanlarda kullanıldığı takdirde yüzücünün görünmesi mümkün değildir ve derişik süspanse katuların taşındığı uygulamalar için kullanılamaz.

Akım olmadığı zaman tüpün dibinde duran yüzücü akımın başlamasıyla birlikte yukarı doğru kalkarak pozisyonu yerçekimi ile kaldırma kuvvetlerinin dengeye geldiği anda sabitleşir. Yüzücünün ağırlığı sabit olduğundan, basınç düşüşü de sabit kalır ve akım artışında yüzücü, daralan tüpün içinde akışkanın içinden geçebileceği uygun bir halkasal boşluk oluşuncaya dek yükselir. Böylece yüzücünün yüksekliği akış hızının bir göstergesi olup şeffaf tüp üzerindeki skaladan akış hızı direkt olarak okunur. Yüzücünün rotametre tüpüyle eş eksenli olması gerekir. Transparent tipi rotametrelerde bu durum yüzücüdeki eğimli fırıldaklarla (vanes) sağlanır. Akışın bu fırıldaklar üzerindeki etkisi yüzücünün dönüşünü sağlar; bu da gerekli olan stabilizasyonu ve merkezleme etkisini gerçekleştirir. Bu görünür dönüş hareketi nedeniyle cihaz rotametre ismini almıştır (Holman, 1978).

Sıvı ve gazların ölçüm koşullarına bağlı olarak rotametre tüpleri cam veya metalden yapılabilir. Doğru sonuç elde edilmesi için rotametrenin kullanılacak akışkan ile kalibre edilmesi gereklidir. Zira su için tasarlanmış bir alet benzin için kullanıldığı takdirde oldukça ciddi hatalar meydana gelebilir (ASTM D 3195-73 Rotametre Kalibrasyonu). Şekil 3.20'de görülen cam tüp tipinde, dışarıdan yapılan okuma hassas olmayabilir ve yüzücü akım hızıyla orantılı şekilde hareket etmeyebilir. Metal tüp tipleri hassas mühendislik çalışmalarına daha elverişlidir ve genellikle kalibrasyonda gerçek lineerliği sağlayacak şekilde dizayn edilmişlerdir. Her iki tipin skala değiştirilebilirlik aralığı (rangeability) 10:1 'dir.

Kolaylıkla temin edilebilecek en ucuz akış hızı ölçer, cam tüp tipi rotametredir ve özenli kullanıldığı takdirde orijinal performansının birkaç yıl üstünde çalışabilir. Ancak opak sıvılar, yüksek sıcaklık ve yüksek debilerde metal tüplerin kullanılması gerekir. Oldukça geniş sıcaklık ve basınç aralığında kullanılabilen metal tüplerde patlama riski de yoktur. Ancak metal tüplerde yüzücü görünmediği için ölçüm okumalarını başka bir yolla göstergelendirmek (indicating) veya iletmek (transmitting) gerekir. Bu amaçla yüzücünün tepesine veya alt kısmına eklenti bir çubuk (armatür) bağlanır. Bu eklenti akışkana geçirgen olmayan bir tüp içine yerleştirilir. Bu tüpün iç kısmı doğrudan rotametrenin iç kısmıyla temasta olduğundan eklenti için bir dolgu kutusu (stuffing box) gerekmez (McCabe and Smith, 1976).



Şekil 3.19 Rotametre prensibi (Hayward, 1981).

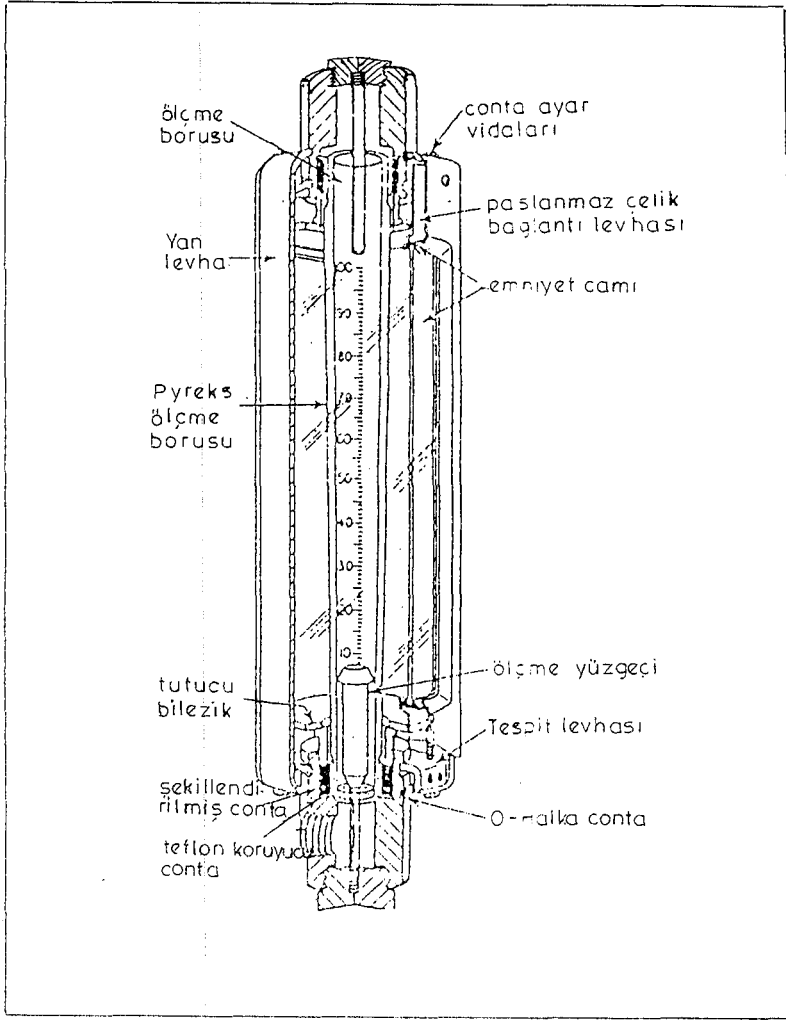
Tüp dıştan indüksiyon bobinleri ile çevrili olup bobinlerle temasta olan armatürün uzunluğu yüzücünün durumuna göre değişir. Bu değişim, bobinin indüksiyonunu değiştirir; değişen indüksiyon elektriksel olarak ölçülür ve değerler sürekli kaydedilir. Armatür çubuğun dışına ve dikey skalaya yakın olarak yerleştirilen bir mekanik izleyici, çubuğun üst ucunun hareketinin izlenebileceği bir indikatör olarak kullanılabilir. Bu şekildeki eklerle rotametre basit, gözle görülen, sadece cam tüpten yapılmış bir alet olmaktan çıkarılıp, verimli bir kaydedici ve kontrol edici alet haline getirilebilir.

Akımın durumuna göre hareket eden yüzücünün konumu, düşey yöndeki basınç farkı, gravite, viskozite ve yüzdürücü kuvvetler nedeniyle sabit kalır (yerçekimi doğrultusunda kendi ağırlığı ile yüzücü üzerindeki sürtünme kuvveti ters yönde ise akışkanın kaldırma kuvveti etkilidir). Yüzücünün alanı sabit kaldığında daralan tüp bu değişken alanı sağlar ve basınç düşmesi sabitleşir. Durağan akım alanında basınç farkı da sabit kalmaktadır. Yüzücü üzerinde kuvvet dengesi kurulup,

$$F_d + \rho_f V_y \frac{g}{g_c} = \rho_y V_y \frac{g}{g_c} \quad (3.107)$$

$$F_d = C_d A_y \frac{\rho_f v_m^2}{2g_c} \quad (3.108)$$

Denk.3.107 ve 3.108 birleştirildiğinde,



Şekil 3.20 Rotametre (McCabe and Smith, 1976).

$$C_d A_y \frac{\rho_f u_m^2}{2g_c} + \rho_f V_y \frac{g}{g_c} = \rho_y V_y \frac{g}{g_c} \quad (3.109)$$

$$C_d A_y \frac{\rho_f u_m^2}{2g_c} = V_y \frac{g}{g_c} (\rho_y - \rho_f) \quad (3.110)$$

$$C_d A_y \rho_f u_m^2 = 2g V_y (\rho_y - \rho_f) \quad (3.111)$$

$$u_m = \sqrt{\frac{1}{C_d} \frac{2g V_y}{A_y} \left(\frac{\rho_y}{\rho_f} - 1 \right)} \quad (3.112)$$

veya

$$Q=Au_m=A\sqrt{\frac{1}{C_d}\frac{2gV_y}{A_y}\left(\frac{\rho_y}{\rho_f}-1\right)} \quad (3.113)$$

bulunur. Yüzücü ve tüp arasındaki halkasal alan ise,

$$A=\frac{\pi}{4}[(D+y)^2-d^2] \quad (3.114)$$

şeklinde hesaplanabilir. Sürtünme katsayısı C_d , akışkanın viskozitesine bağlı olmakla birlikte özel yüzücüler kullanılarak viskozite etkisi azaltılabilir ve daha yüksek kararlılık için tüpler uzun / kısa / daralan şekillerde yapılabilir. Denk 3.114 ile verilen kuadratik alan bağıntısı, gerçek tüp ve yüzücü ölçüleri için çoğu kez doğrusaldır (Holman, 1978). Böylece kütsel akış hızı için

$$\dot{m}=C_d y \sqrt{\frac{\rho_y-\rho_f}{\rho_f}} \quad (3.115)$$

yazılabilir. Genellikle akışkan yoğunluğundan bağımsızca cevap veren rotametreler tercih edilir Bu amaçla kullanılan çeşitli yüzücü tipleri için

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho_f}=0, \quad \rho_y=2\rho_f \quad (3.116)$$

koşulunun sağlanması gerekir. Akışkandaki yoğunluk değişimlerinin etkisini en aza indiren özel yüzücü tipleri yapılabilir. Bu durumda

$$\dot{m}=\frac{C_d y \rho_y}{2} \quad (3.117)$$

bağıntısındaki hata, akışkan yoğunluğunda meydana gelen % 5 değişim için, Denk 3.116 bağıntısından hesaplanana kıyasla % 2 daha azdır (Holman, 1978; Kirk-Othmer, 1978; McGraw-Hill, 1982; Hayward, 1981; McCabe and Smith, 1976; Cheremisinoff and Morresi, 1983; Doebelin, 1983; Harrison and Perry, 1986).

3.2.6 Dirsekmetre ile debi ölçümü

Bir boru içinden geçmekte olan akışkanın akım hızını belirlemek amacıyla akım hatında dirsek kullanarak, iç ve dış yarıçaplar arasındaki basınç farkı ölçülebilir (Şekil 3.21). Akışkan, dirseğin içinden geçerken santrifüj kuvveti nedeniyle dirseğin dış yarıçapında bir basınç artışına neden olur. Dirseklerin genellikle 90° olanı tercih edilir ve basınç bağlantıları 22.5° veya 45° açılı yapacak şekilde tasarlanır.

Basınç tıplarının 45 °den daha fazla eğimli olması akımda ayrılmalara ve düzensiz okumalara neden olabileceğinden, bu bağlantıları yapmak için gerekli delikleri açmak büyük dikkat isteyen bir iştir ve bağlantılar dirseğin iç tarafını aşmamalıdır. Dirseğin iç ve dış kısmı arasındaki basınç farkını ölçmek için normal basınç farkı ölçerler kullanılabilir (cam ölçerler 9/16 in iç çapında olmalıdır). Dirsekmetreden önce gelen düz boru uzunluğu da sonuçları etkiler.

Şekil 3.22'de gösterilen bir dirsekteki akım durumu (dirsekteki hız dağılım modeli) Bernoulli denklemi ve Newton'un II. kanunu kullanılarak incelenebilir. Akışkanın girişteki hızının eşit dağılımlı, enerji birikiminin sıfır ve akım hatlarının merkez eksenine ile konsantrik olduğu varsayılarak,

$$\frac{P}{\rho} + \frac{u_x^2}{2g} = \text{sb.} \quad (3.118)$$

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{2u_x du_x}{2g} = 0 \quad (3.119)$$

$$dP = -\frac{\rho u_x du_x}{g} \quad (3.120)$$

$$[P - (P + dP)]dA = -\frac{\rho}{g} dA dx \frac{u_x^2}{x} \quad (3.121)$$

ilişkileri yazılabilir. Denk.3.120 ve 3.121 birleştirilerek, dPbağıntısı bulunabilir.

$$-\int_{u_x}^{u_0} \frac{du_x}{u_x} = \int_x^R \frac{dx}{x} \quad (3.122)$$

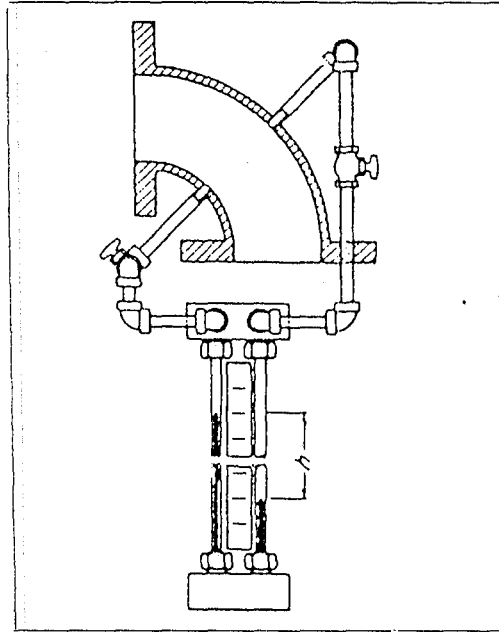
$$\log \frac{u_x}{u_0} = \log \frac{R}{x} \quad (3.123)$$

$$x u_x = R u_0 = a(\text{sb.}) = K \quad (3.124)$$

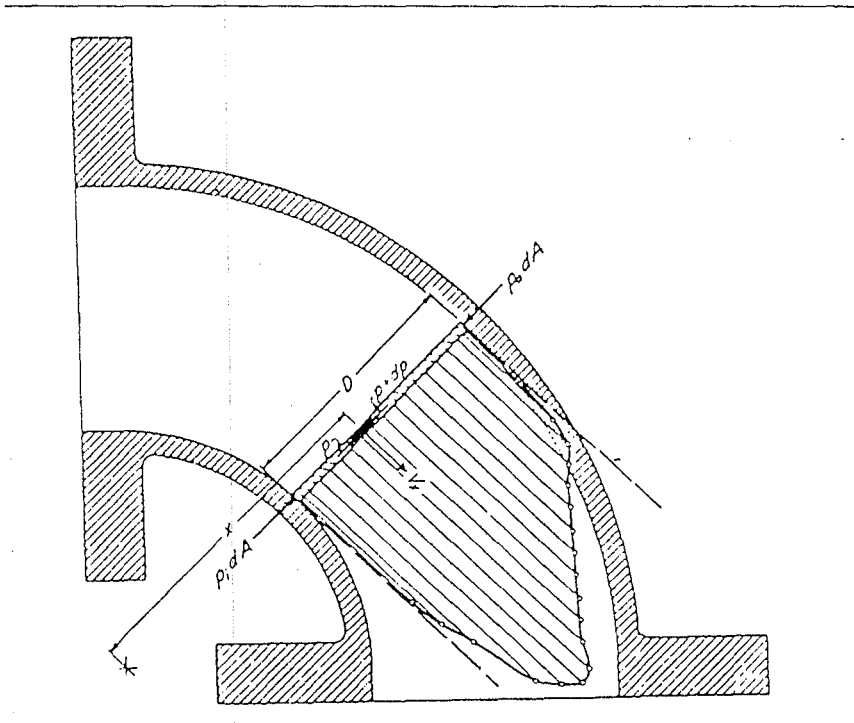
$$dP = -\frac{\rho}{g} dx \frac{u_x^2}{x} \quad (3.125)$$

Bu denklem, Şekil 3.22'dekine benzer bir hız dağılımı veren bir hiperbolü temsil eder. Denk.3.121 ve 3.125'den, sırasıyla,

$$u_x = \frac{K}{x} \quad (3.126)$$



Şekil 3.21 Dirsekmetre (Lansford, 1936).



Şekil 3.22 Dirsekteki hız dağılımının gösterimi (Lansford, 1936).

$$\int_{P_i}^{P_0} dP = \frac{\rho}{g} K^2 \int_r^R \frac{dx}{x^2} \quad (3.127)$$

$$\frac{P_0}{\rho} - \frac{P_i}{\rho} = h = \frac{K^2}{2g} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right] \quad (3.128)$$

ilişkileri yazılabilir. Birim zamanda dx uzunluğundaki bir kanaldan geçen akışkanın miktarı,

$$dQ = u_x d_x = K \frac{d_x}{x} \quad (3.129)$$

şeklinde ifade edilebilir. Birim genişlik (width) başına akış hızı ifadesi

$$Q = K \int_r^R \frac{dx}{x} = K \log \frac{R}{r} \quad (3.130)$$

tarzında verilebilir. Ancak basınç farkının ölçüldüğü çapsal alanda Q, (R-r) x 1 ortalama hız şeklinde verilen alana eşit olduğundan

$$Q = (R-r)u = K \log \frac{R}{r} \quad (3.131)$$

bağıntısı yazılabilir (Lansford, 1936).

$$\therefore K = \frac{(R-r)u}{\log \frac{R}{r}} \quad (3.132)$$

Denk.3.132 ve 3.128 birleştirildiğinde,

$$h = \frac{(R-r)^2}{(\log \frac{R}{r})^2} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (3.133)$$

$$C = \frac{(R-r)^2}{(\log \frac{R}{r})^2} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) \quad (3.134)$$

$$h = C \frac{V^2}{2g} \quad (3.135)$$

bulunur. Böylece dirseğin iç ve dış eğrileri arasındaki basınç farkı elde edilebilir.

Denk.3.135'de gösterilen ve dirsek çapıyla orantılı olarak artan "dirsekmetre düzeltme katsayısı" gerçek işlem bölgesinde kalibrasyonla bulunabilir. Kalibrasyon yerine çeşitli grafiklerden yararlanmak da mümkündür.

Akımı engelleyici ek bir direnç yaratmaması, boru hattının sadece bir kısmına kolaylıkla yerleştirilmesi ve oldukça düşük bir maliyet gerektirmesi nedeniyle avantajlı olan dirseğin en önemli dezavantajı özellikle gaz akımları için düşük basınç farkı oluşturmastır (Lansford, 1936; Miller, 1983).

3.2.7 Anemometre ile debi ölçümü

Yüksek hacimli hava örnekleyicilerde, sabit akım hızı kontrolunda modern ısı akım ölçerlerin ilk kullanımı 1970'lerde başlamıştır. Güncel ısı sensörler izolasyonlu (rugged), tekrarlanabilirlik özelliği yüksek, kirlenmeye karşı duyarsız ve konvansiyonel akış / hız ölçüm cihazlarına kıyasla önemli ölçüde caziptir. Isıl akış ölçerler filtre yüklemesinden, sıcaklıktan, basınçtan ve hattaki voltaj değişimlerinden bağımsız sabit bir kütleli örnek alma hızını korumak üzere, vakum pompası ile birlikte kapalı devrelerde kolaylıkla kullanılabilirler (Kurz, 1983).

Anemometrelerin sıcak-tel, sıcak-film, pervaneli (vane) ve laser-doppler tipleri mevcuttur.

3.2.7.1 Sıcak-tel (hot wire) / sıcak-film (hot film) anemometresi

Değişken akım koşullarında (türbülanslı akışlar) ve sınır tabakalarıyla ilgili araştırma ve uygulamalarda sıkça kullanılan sıcak-tel anemometresinde temel prensip, gaz akımının içine yerleştirilmiş ve ısıtılmış kısa ve ince bir telin soğumaya karşı göstermiş olduğu direncin ölçülmesine dayanır. Tel platin, platin kaplı tungsten veya diğer metallere ve metal bileşimlerinden yapılabilir. Bu tel, koruyucu bir kılıfla kapatılabileceği gibi rezistör iletkin metal tabakayla ince bir film halinde de kaplanabilir (iletken olmayan bir destek üzerinde); bu amaçla termistor de kullanılabilir. Özel rezistör tipleri içinde açık tel elementi en hızlı cevap verendir. Toz kirlenmesi cihazın yüzey alanını ve dolayısıyla soğuma hızını değiştirebilir. Kılıflı tel ve film elementi oldukça sağlam, kontaminasyona karşı daha az hassastır; kolayca temizlenebilir ve geniş bir aralıkta kullanılabilir. Ancak akım hızlı değiştiğinde veya türbülansın olduğu durumlarda bu alet daha yavaş cevap verdiğinden, okumalar hatalı olabilir. Termistorlar, performansları rezistörlere göre daha az olmakla birlikte metal tel veya filmlere kıyasla sıcaklıkla daha fazla direnç değişimi gösterdiklerinden, oldukça düşük hızlarda ölçüm için uygundur. Sıcak-direnç anemometreleri içinde en uygun olanı sıcak-tel tipidir.

Sıcak-telin gösterdiği direnç, sensörden ısı aktarımı ile gazın hızı ve yoğunluğuna bağlıdır. Hassasiyet derecesi ise ısı iletkenliğe, akışkanın spesifik ısısına ve ısı aktarımındaki kontaminasyona bağlıdır.

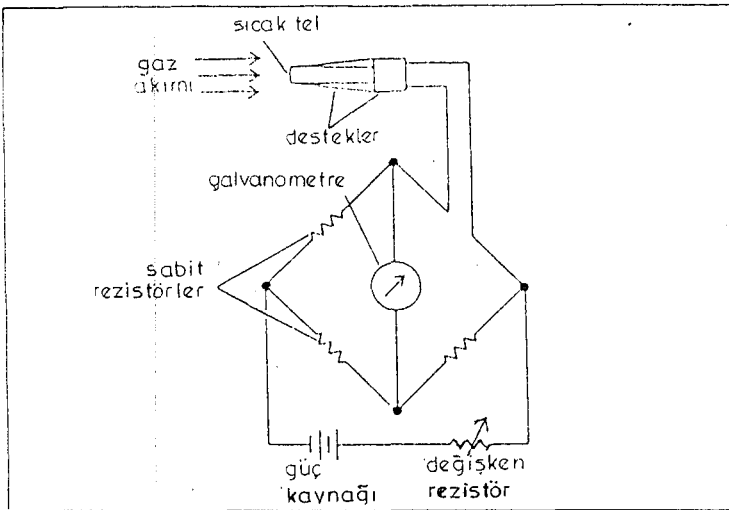
Uygun kalibrasyon ile 0.15 m / s'den süpersonik hızlara kadar hassasiyetle ölçüm yapabilen bu alet, 20000 Hz'in üzerindeki frekanslarda hız dağılımlarını da belirleyebilir. Ancak, aletin kalibrasyonu zordur ve kalibrasyon eğrisi lineer değildir. Kalibrasyon, elementin gerçek sıcaklığındaki uzunluğuna, gazın yoğunluğuna ve ısı özelliklerine bağlıdır. Sabit-sıcaklık (sabit-direnç) ve sabit-akım koşullarında sıcak-tel anemometresi ile çalışılabilir.

Sıcak-tel anemometreleri genellikle sabit-sıcaklık yöntemine göre çalışır. Sensörün direnci ve dolayısıyla sıcaklığı, bir servo amplifikatör ile akışkan sıcaklığının üzerindeki bir değerde sabit tutulur. Bu yöntemde sensör akımı, akım değişimine bağlıdır ve ısı atalet ile hızda meydana gelen ani değişimlere karşı olan duyarlılık minimuma indirilmiştir. Şekil 3.23 'de gösterilen sabit-direnç anemometresinde (Wheatstone köprüsü şeklinde bağlanan devrede), telin direnci akımın soğumasıyla artar ve sonra tel tekrar orijinal sıcaklığına döner. Dirence karşı voltaj düşüşü bir potansiyometre ile ölçülebilir. Sıcak-telden ısı aktarım hızı,

$$q=(a+bu)(T_w-T_\infty) \quad (3.136)$$

$$q = i^2 R_w = i^2 R_0 [1 + \alpha (T_w - T_0)] \quad (3.137)$$

bağıntılarıyla ifade edilebilir.

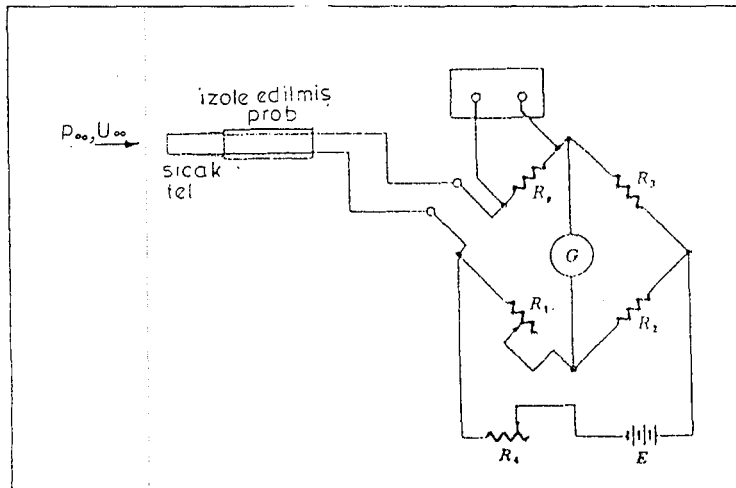


Şekil 3.23 Sabit-direnç akış ölçüm devresi (Holman, 1978).

Sabit-akım (voltaj) tipindeki sıcak-tel anemometresinde ise gaz akımı başlar başlamaz sıcak-tel soğur. Tele bağlanmış olan Wheatstone köprüsü boyunca voltaj sabit tutulur ve gerçek hız, kalibre edilmiş bir galvanometreden okunur. Şekil 3.24'de gösterilen sabit-akım tipi anemometre oldukça düşük hızlarda (0.2 in / s ile altındaki hızlarda) kullanışlıdır.

Fırınlar, bacalar, elektrostatik çöktürücüler ve bacalarda oldukça yaygın şekilde kullanılan sıcak-tel anemometresinde, uzunluk / çap oranının (tipik değer 50.0) ölçüm performansı üzerindeki etkisi önemlidir.

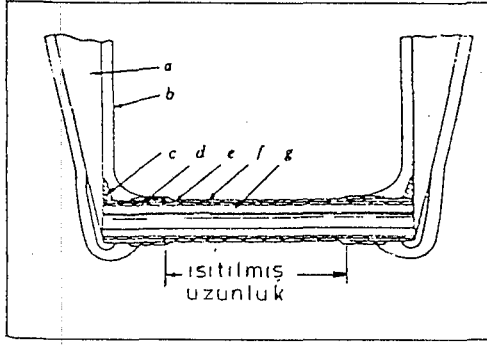
Sıcak-tel anemometresinin sorun çıkardığı durumda yalıtılmış bir silindirin ince metalik filmle kaplanmasıyla sıcak-film anemometresi (Şekil 3.25) yapılabilir. Bu aletin yüksek hız ve sıcaklıklardaki gazlar için mukavemeti fazladır (Holman, 1978; Kirk-Othmer, 1978; McGraw-Hill, 1982; Hayward, 1979; Perry and Green, 1984; Cheremisinoff and Morresi, 1983; Doebelin, 1983).



Şekil 3.24 Sabit-akım ölçüm devresi (McGraw-Hill, 1982).

3.2.7.2 Pervaneli anemometre

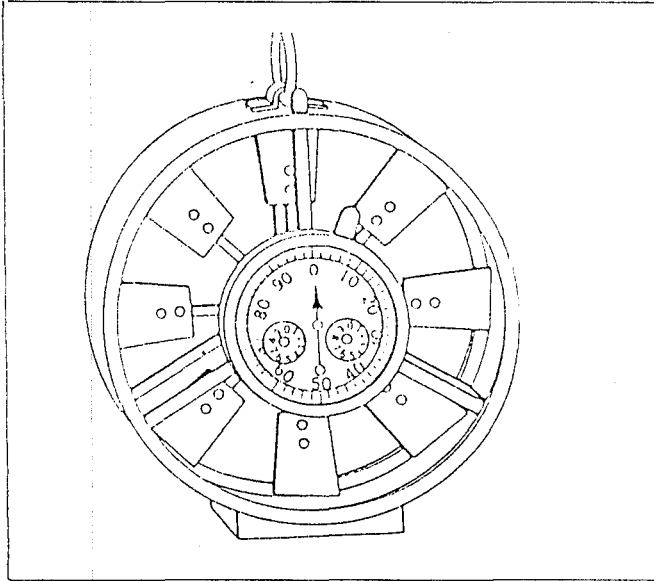
Büyük kanallardaki hava hızları ve düşük rüzgar hızlarının ölçümünde kullanılan ve türbin tipi akım ölçerle eşdeğer bir hız ölçüm aleti olan pervaneli anemometre 0.3-1.5 m / s aralığındaki gaz hızı ölçümleri için kullanılabilir. Alet ortak bir "shaftın" etrafında dönen bir seri pervane ile (dik veya biraz eğimli) pervaneleri çevreleyen bir koruyucudan ibarettir (Şekil 3.26). Dönüş sayısı elektriksel veya mekanik bir sistemle kaydedilir. Doğru ölçüm yapabilmek, dolayısıyla sürtünmeyi minimumda tutmak için parçalar hafif malzemelerden yapılır.



Şekil 3.25 Tipik bir sıcak-film probunun ölçeksiz çizimi (Holman, 1978)

- a) elektrik terminali görevi yapan metalik ayak
- b) epoksi tabaka
- c) elektrik ve mekanik bağlantılar için altın bağ
- d) elektrolizle yapılmış, 5 µm kalınlığında altın tabaka
- e) 25-100 µm çapında cam tüp.

Akışkan yoğunluğuna karşı az etkilenen bu alet vuruşa karşı duyarlıdır ve dikkatsiz kullanım sonucu mil yatağında bozulma olabilir. Bu nedenlerle ve ayrıca partiküllerin etkisini de gidermek üzere cihaz periyodik şekilde kalibre edilir (Perry and Green, 1984; McGraw-Hill, 1982; Hayward, 1979).



Şekil 3.26 Pervaneli anemometre (McGraw-Hill, 1982).

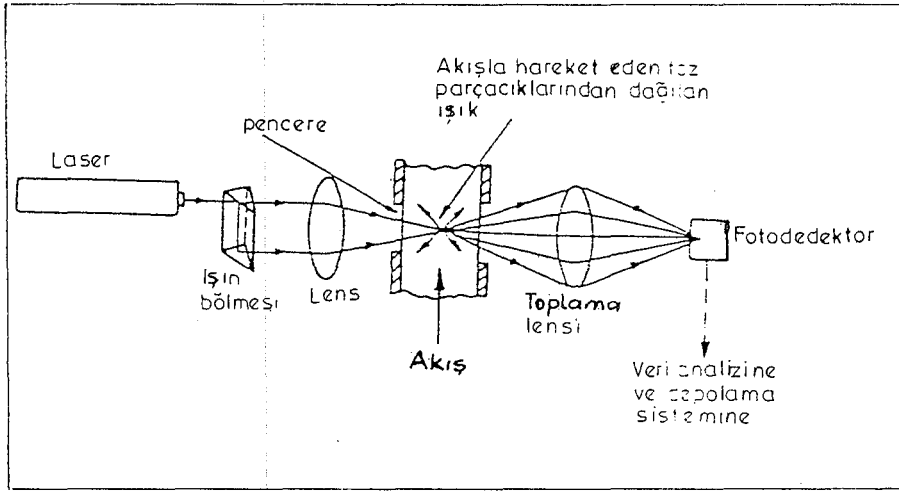
3.2.7.3 Laser-doppler anemometresi

Optik prensibe dayanan bu ölçüm sistemlerinin terminolojisi henüz sabitleşmediğinden, bu teknik için " Laser-Doppler Anemometresi (LDA) ", " Laser-Doppler Velosimetresi (LDV) ", " Laser-Doppler Flowmeter " ve " Optik Anemometre " gibi isimlendirmeler kullanılabilir. Hız bileşenlerinin ayrı ayrı ölçümünü sağlayan, sıcaklık, yoğunluk ve bileşim değişimlerinden etkilenmeksizin ve kalibrasyon gerekliliği olmaksızın hız ölçümü yapan bu optik alet ölçüm ortamıyla doğrudan temas etmez. Daha çok katı parçacık içeren gaz (aerosol) ve sıvı akışkanlar (bulamaçlar) için kullanılır. Basit yöntemlerle gerçekleştirilen hemen hemen imkansız olan ölçümler bu teknikle yapılabilir. Akmakta olan akışkana prob ilave edilme gerekliliği olmaması cihazın önemli avantajlarından birisidir. Ancak kompleks geometri akış bölgelerinde prob kullanımı gerekebilir.

Yöntemin prensibi (Doppler etkisi), kaynak ile gözlemcinin görelilik hareketli olduğu durumlarda ışık ve ses frekansı ile saçılan frekans arasında belirli bir kayma olması ve bu kaymanın görelilik hareket (hız) ile ilişkili olmasına dayanır. Doppler etkisine günlük yaşamdan bir örnek olarak uzaktan gelip hızla geçen ve yine uzaklaşan bir trenin düdüğü sesindeki frekans değişimi verilebilir. Tren düdüğü ve çıkardığı ses aynı olmasına karşın, gözlemciye, uzaktayken kalın, giderek incelen ve uzaklaştıkça kalınlıktan bir ses gibi gelir.

Şekil 3.27 'de gösterilen Laser-Doppler anemometresinde ölçümün hassasiyeti kaynaktaki ışımının dalga boyu spektrumu ile ilgilidir. Akışkan ortamı içindeki tanecikler, ışık hattından geçerken ışığı her yönde saçmakta ve saçılan ışık, sabit bir algılayıcı tarafından her yönden algılanmaktadır. Algılanan ışığın frekansı, kaynaktan çıkan ışığına göre Doppler etkisi uyarınca kaymıştır. Kayma miktarı (Doppler shift), tanecik hızı ile orantılıdır. Şekilde görüldüğü gibi laser ışınları bir ışın bölücünden, Bragg hücrelerinden ve ardından ışın genişleticiden geçer ve tanecik üzerine düştükten ve her yönde saçıldıktan sonra, saçılmış ışığın sadece 180° geri saçılanları toplanarak, foto algılayıcı üzerinde odaklanır. Saçılan ışığın şiddeti Mie saçılma kuramına göre (sinyal-gürültü oranı, laser gücü, tanecik büyüklüğü, mercekle açıklığı, toplama açısı, foto algılayıcı verimi ve tanecik / akışkan görelilik kırınım indeksine göre) bulunur.

Vuruş frekansı ifadesi, ışınların kesiştiği yerde oluşan girişim saçakları göz önüne alınarak bulunabilir. Ardıl saçaklar arasındaki mesafe $\lambda / 2 \sin (\theta/2)$ olup, burada λ ışığın boyunu, θ ise iki ışın arasındaki açıyı simgelemektedir. Akışkan içinde, iki ışın demetinin oluşturduğu düzlemde θ açısının açı ortayına dik yönde v hızı ile hareket eden ve d mesafesine kıyasla küçük olan bir partikülün frekansı $v/d = 2 (u/\lambda) \sin h (\theta/2)$ olacaktır. Bu frekans ölçülerek v değeri bulunabilir (Massey, 1987).



Şekil 3.27 Laser-Doppler anemometresinin prensibi (Hayward, 1979).

Tipik bir Laser-Doppler anemometresi, a-Laser ışık kaynağı; b-Optik düzenek; c-Foto algılayıcı; d-Elektronik sinyal işleme birimlerinden oluşur.

Laser-Doppler anemometresinin, sıcak-tel / sıcak-film anemometresine göre avantajı akımın düzenini bozmasındadır. Ancak, içinde ışığı saçacak tanecik bulunmayan ortamda ölçüm yapamaması, ışığın ortamın bozulmasına neden olacağı durumlarda kullanılamaması ve hız bileşenleri herhangi bir kalibrasyon gerekmeden ölçülebildiği halde, hız bileşenleri ile debi arasında ilişki kurulabilmesi için akışkanın cinsi, ortalama hız ve akış ortamına bağlı bir kalibrasyon gerektirmesi sistemin dezavantajlarıdır (Atamer, 1989; Hayward, 1979; McGraw-Hill, 1982; Goldstein, 1974; Perry and Green, 1984, Kirk-Othmer, 1978; Doebelin, 1983).

3.2.8 Torbametre ile debi ölçümü

Torba orifis olarak da adlandırılan bu alet, gaz akış hızının oldukça düşük olduğu durumlarda gaz akımının hızlı ve doğru bir şekilde ölçülmesini sağlayan, ucuz bir donanımdır. Bu yöntemde, boru veya bacanın sona erdiği üst kısma bir delik açılıp plastik bir torba yerleştirilerek (yüksek sıcaklıklarda ve yüksek hızlarda, ince torbalarla yapılan deneyler hatalı olabilir, deliğin boyutuna göre akıma karşı bir direnç oluşturulur. Torbaya, basınç düşüşünü okumak için bir manometre eklenerek sıradan bir orifis hazırlanmış olur.

Küçük basınç düşüşlerinde, sıkıştırılabilirlik önemsenmediğinden, genel orifis denklemini şu şekilde yazmak mümkündür;

$$Q=K A\sqrt{2gh} \quad (3.138)$$

Temel prensip, bir hava akımının torbametreden geçirilerek, manometre ile basınç düşüşünün belirlenmesi ve dolayısıyla hacimsel gaz akış hızının ölçülmesidir. Torba boyutları orifis çapına kıyasla büyük olduğundan yaklaşan akımın hız faktörü (velocity of approach) 1.0 alınabilir. Manometreden okunan basınç farkı değeri (in.H₂O), hacimsel akış hızı (ft³ / dk) ve yoğunluk(lb / ft³) parametreleri kullanılarak yukarıdaki denklem

$$Q=5.982 KD^2\sqrt{\frac{h}{\rho}} \quad (3.139)$$

şeklinde de yazılabilir. Bu durumda torba kalınlığından bağımsız olan orifis katsayısı için (K=C=0.07089+0.0290) değeri kullanıldığında,

$$Q=4.25 D^2\sqrt{\frac{h}{\rho}} \quad (3.140)$$

bulunur. Uygun orifis boyutunun seçilmesinde, suyun basıncının 1-4 in olması gerekir. Basıncın 1 in 'den az olması halinde, ölçüm zorlaşır; basınç 4 in 'den fazla olunca da torba borudan kayar. Eğer akım hızı kabaca tahmin edilebilirse (delik çapının (in) ve su basıncının da (2 1/2 in) verilmesi zorunludur), delik çapı,

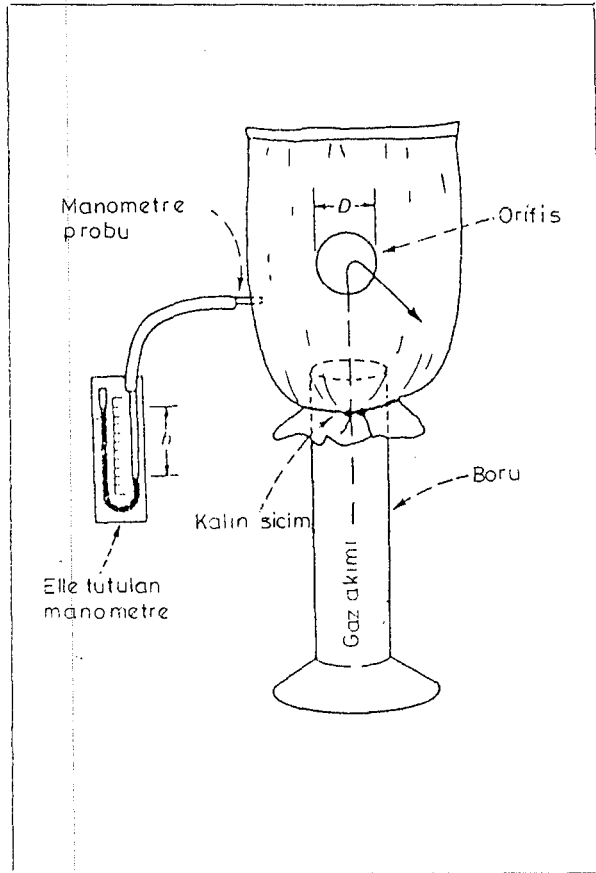
$$D=0.21\sqrt{Q} \quad (3.141)$$

bağıntısı yardımıyla yaklaşık olarak hesaplanabilir.

Torbametre ile gaz hızı ölçümünde, tasarım esnasında dikkat edilmesi gereken noktalardan en önemlisi manometre probunun durumudur. Manometre probu, torba

duvarının içine doğru biraz yaklaştırılmalı, borunun ağzı törpülenmeli ve Şekil 3.28 'deki gibi dik konumda olmalıdır. Ayrıca, kapağın aşağı doğru sarkmasını ve yırtılmayı önlemek ve yaklaşım hızının (approach velocity) etkisini minimuma indirmek için torba yeterince büyük olmalıdır (Smith, 1978).

Torbametre ile ölçüm yaparken deney yapan kişi ölçülen gaza maruz kaldığından yanmaları önlemek üzere gerekli tedbirler alınmalıdır (Smith, 1978).



Şekil 3.28 Torbametre (Smith, 1978).

3.2.9 Sabun-film büreti (soap-bubble flowmeter) ile debi ölçümü

İlk olarak 1934 'te tanımlanan bu teknik, ortam basıncındaki gazların akım ve hacim ölçümü için kullanılmış ve çeşitli modifikasyonlar yapılarak düşük hızlı akışlar için laboratuvarlarda denendiğinde , hacimsel yer değiştirme yöntemi olarak oldukça ümit verici

sonuçlar alınmıştır. Düşük hızdaki akımlarda ve gaz ölçüm aletlerinin kalibrasyonu için de uygun tipleri (değişken alan tipi) bulunan bu cihaz, kalibrasyon gerektirmeyen tek akım ölçerdir. Foto elektrik hücrelerin kullanılmasıyla doğruluk ve uygunluk açısından büyük ilerlemeler kaydedildiğinden, bu donanım daha geniş akım aralıklarında da kullanılmaya başlanmıştır.

Cihaz akım hızını \pm % 0.5 doğrulukla ölçebilir; hacim ile doğruluk arasında \pm % 0.5 ve \pm % 0.2 şeklinde bir ilişki vardır. Ancak dış faktörler bu değere etki edebilir. Oldukça ucuz ve yapımı kolay olan bu donanımla, 8000 ml 'in üzerindeki büretler kullanılarak, 1000 ml / dk.'ya kadar olan akım hızlarını ölçmek mümkündür (Şekil 3.29).

Sadece düşük akım hızlarında kullanıma elverişli olan 20 in çaplı sabun film büreti Şekil 3.30 'da görüldüğü gibi saydam bir büretten oluşmakta ve tüpün alt kısmında sabun veya deterjan çözeltisi bulunmaktadır. Lastik haznedeki çözeltinin seviyesi gaz akım hızını gösterecek şekilde bir film halinde yükselir. Gaz hızının 60 in / dk 'dan fazla olması halinde film yarı yolda patlayabilir ve fotosel zamanlayıcısı ile kayıt yapılamaz. Bu nedenle ölçülecek gaz hızının önceden tahmininde ve böylece uygun büret boyutunun seçilmesinde yarar vardır.

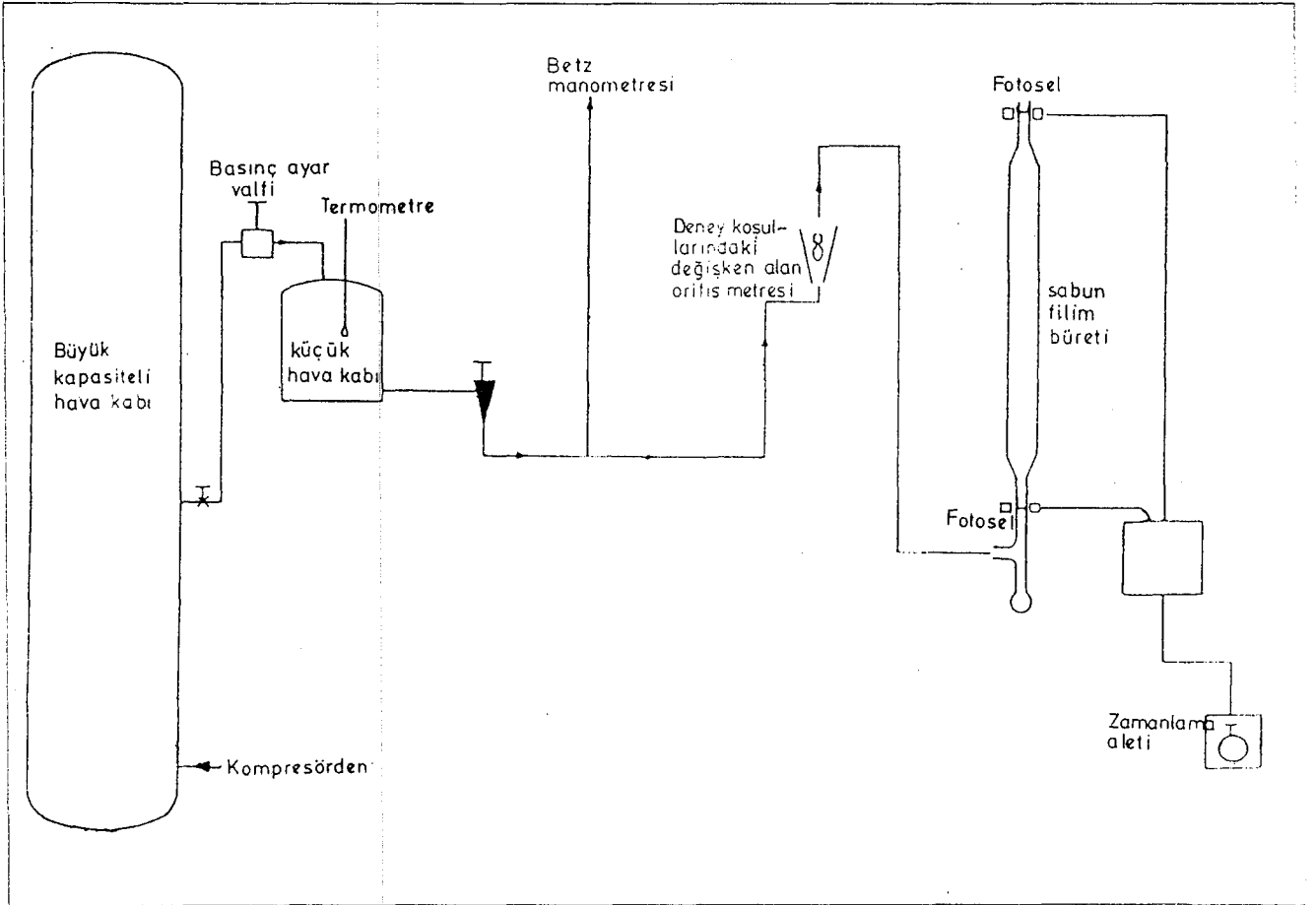
Yüksek doğruluk elde etmek üzere filmin geçiş süresi en az 1 dk olmalıdır. Ancak büret çapının köpüğün oluştuğu sap kısmının çapına oranının (burette / stem diameter ratio) küçük olduğu hallerde büret uzunluğu çok fazla olabilir. Büretin genellikle dikey yerleştirilmesi tercih edildiği halde yatay tasarımlar da yapılabilir. Sap kısmıyla büret çapı arasındaki geçiş sahasının şekli bu geçişte ani bir kesiklilik (discontinuity) olmadığı sürece pek kritik değildir. Ancak düzgün ve yumuşak bir geçiş sağlayan koni giriş ve çıkışı arası kavslendirilmiş (radiused) olarak tasarlanırsa daha uygun sonuçlar elde edilir.

Sabun-film büreti aletinde, büretin giriş tüpü çeşitli şekillerde olabilir. Şekil 3.31'de gösterilen üç farklı durum aşağıda kısaca açıklanmıştır (Danckwerts, 1970; Harrison, 1967; Hayward, 1983);

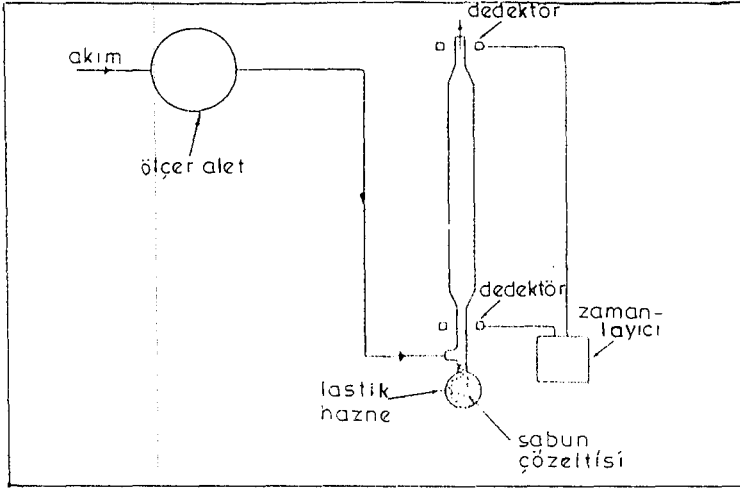
- 1) Alt kısmı Y-şeklinde yerleştirilmiş ve sabun çözeltisiyle doldurulmuş küçük lastik hazneye gaz, Y-şeklindeki kolonun bir tarafından girmekte ve sabun çözeltisinin seviyesini değiştirerek film halinde dikey büret boyunca yükselmektedir (a).
- 2) İlkinden daha detaylı olan bu tipte (b) üç kol vardır ve birisi dirsek şeklinde yerleştirilmiştir. Bu, çocukların sabundan yaptıkları kabarcık borusuna benzer bir

versiyonun modifiye edilmiş şeklidir. Hazne sıkıştırıldığında boru, sabun çözeltisi ile dolmakta ve taşmaktadır. Sadece bir film için kullanılabilen bu yöntem oldukça zordur.

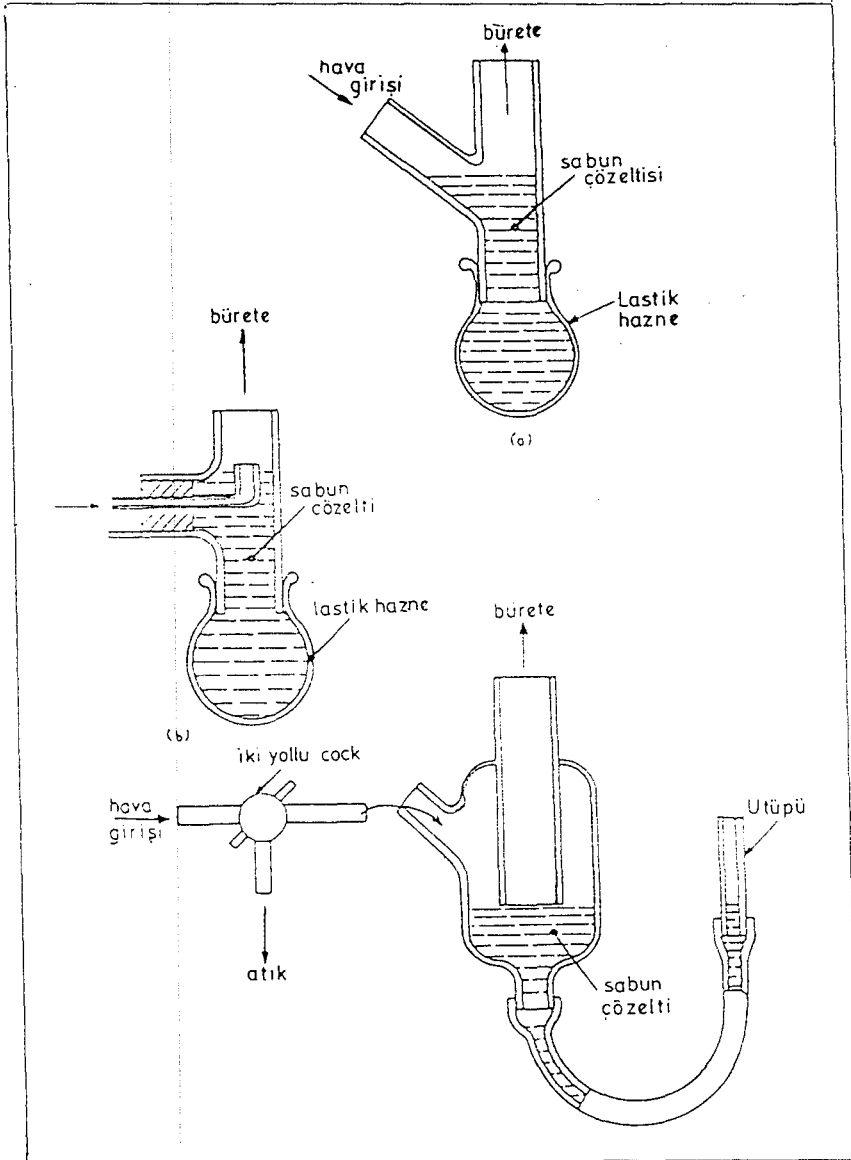
- 3) Sabun filmi daha fazla kontrol edebilmek amacıyla, bir anda sadece bir film için kullanılan bu daha kapsamlı yöntemde (c) U-tüpü şeklinde, hareket ettirilebilen bir kol ile atık çift yönlü vanayla atılabilmekte ve tüpün ucu sabun film çözeltisi içine daldırılmış bulunmaktadır. U-tüpünün kolu çözelti seviyesinden daha düşük bir seviyeye getirilerek film son kısımdan çıkmaktadır. İki yönlü vana ise gazın çözelti kısmına girmesini ve filmin tekrar bütetin içinde yükselmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.29 Bir akım ölçüm deneyinde sabun film bütetinin kullanımı (Harrison, 1970).



Şekil 3.30 Sabun-film büretinin prensibi (Hayward, 1983),



Şekil 3.31 Sabun-film büreti şekilleri (Harrison, 1970).

3.3 Nem Ölçümüne İlişkin Kuramsal Kavramlar

Kimya mühendisliği işlemlerinin pek çoğunda, hava ve subuharı karışımlarının özellikleri ile ilgili hesaplamaların yapılması zorunludur. Bu hesaplamalarda, değişik koşullar altında hava tarafından taşınan subuharı miktarı ile ilgili bilgilere ihtiyaç vardır. Bunlar, hava ve subuharı karışımlarının ısı özellikleriyle, su veya ıslak katı maddelerle temas halinde olan nemli havanın nem miktarında ve entalpisinde meydana gelen değişikliklerden oluşmaktadır.

Esas itibariyle iki fazlı kütle aktarımına dayanan nem teorisi oldukça geniştir ve proste pek çok kimyasal ve fiziksel olay sözkonusudur. Bu bölümde nem ölçüm teorisi incelenmiş, nemle ilgili bazı tanımlar Ek Açıklamalar-B'de verilmiştir.

3.3.1 Psikrometrik kavramlar

Nemle ilgili tüm uygulamalarda psikrometrik diyagramların teorisi, oluşturulması ve kullanımının iyi bilinmesi gerekir. Psikrometrik ölçümler nemli havanın bileşimi ile ilgili bazı özelliklerin saptanmasını sağlar. Hava neminin belirlenmesinde en uygun yöntem yaş termometre sıcaklığının ölçülmesidir. Yaş termometre sıcaklığının teorisi, suyun nemli hava içerisine buharlaşması mekanizmasını izah eder. Şekil 3.32'de gösterilen modele göre, yaş termometre sıcaklığında (t_w) bulunan serbest su yüzeyi hareketli bir nemli hava akımına maruz kaldığında, su yüzeyinde hızı sıfırdan başlayarak esas hava akımı hızına (V_0) kadar değişen su yüzeyine bitişik bir sınır tabakası oluşur. Sınır tabakası içinde sıcaklık su yüzeyindeki yaş termometre sıcaklığından, esas hava akımının sıcaklığı olan t_0 'a kadar sürekli bir artış gösterir. Su yüzeyine bitişik olan havanın doygun olduğu varsayılabilir. Nemlilik oranı y-ekseni yönünde azalır. Sınır tabakasının kalınlığı hız, sıcaklık ve nemlilik oranı ile ilişkilidir.

Havadan su yüzeyine ve sudan havaya subuharı aktarımının söz konusu olduğu bu proste sınır tabakası boyunca ısı aktarımı, konveksiyon ve kondüksiyon prosesleri ile, buhar transferi ise konveksiyon ve difüzyon prosesleri ile gerçekleşir. Isı aktarımı için verilen

$$h_c(t_0 - t_w) = k \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (3.142)$$

bağntısında boyutsuz sıcaklık ve uzunluk,

$$t = (t - t_w) / (t_o - t_w) \quad \text{ve} \quad y' = y/L$$

şeklinde tanımlanırsa,

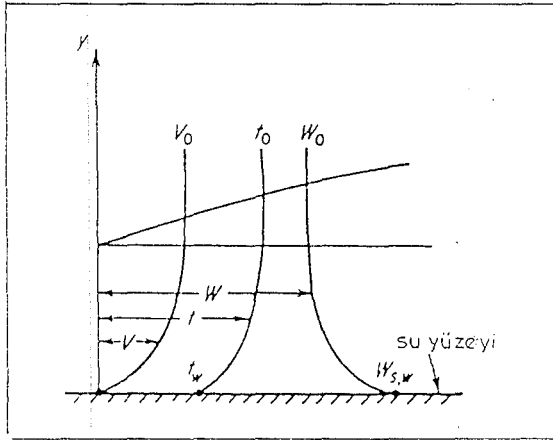
$$\frac{h_c L}{k} = \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (3.143)$$

ifadesi yazılabilir. Denk.3.143'ün benzetişiminden,

$$\frac{h_c L}{k} = f(Re, Pr) \quad (3.144)$$

bağntısı bulunur (Threlkeld, 1986). Burada $h_c L / k$ boyutsuz Nusselt sayısı, $Re = LV\rho / \mu$ boyutsuz Reynolds sayısı ve $Pr = C_p \mu / k$ 'da boyutsuz Prandtl sayısıdır. Fick yasası ise temel difüzyon ilkesini ifade eder.

$$m_w = -D\rho_a \frac{dW}{dy} \quad (3.145)$$



Şekil 3.32 Nemli hava içine suyun buharlaşması (Threlkeld, 1986).

Şekil 3.32'deki sınır tabakası boyunca, subuharı transferi, kütle aktarım katsayısı h_D ile orantılı olarak,

$$m_w = h_D (W_{s,w} - W_o) \quad (3.146)$$

şeklinde verilebilir. Bu durumda,

$$h_D (W_{s,w} - W_o) = -D\rho_a \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (3.147)$$

ifadesi, boyutsuz niceliklerin ($W = (W_{s,w} - W) / (W_{s,w} - W_o)$ ve $y' = y/L$) kullanımı ile,

$$\frac{h_D L}{\rho_a D} = \left(\frac{\partial W'}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (3.148)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemin çözümü ise,

$$\frac{h_D L}{\rho_a D} = f(Re, Sc) \quad (3.149)$$

şeklindedir. Burada $Sc = \mu / \rho D$ boyutsuz Schmidt sayısıdır ve Denk.3.147 ve 3.149 'dan,

$$\frac{h_c L}{k} = a \left(\frac{LV\rho}{\mu} \right)^b \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^c \quad (3.150)$$

$$\frac{h_D L}{\rho_a D} = a \left(\frac{LV\rho}{\mu} \right)^b \left(\frac{\mu}{\rho D} \right)^c \quad (3.151)$$

yazılabilir. Bu durumda oluşturulan

$$\frac{h_c}{h_D} = \frac{k}{D\rho_a} \left(\frac{D}{\infty} \right)^c \quad (3.152)$$

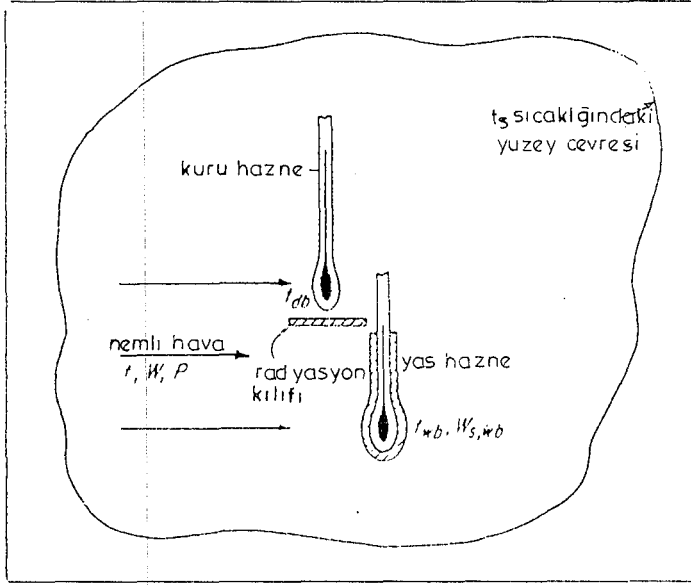
şeklindeki ifadeye ısı yayınlılık $\alpha = k / \rho C_p$ 'dir. Eşitliğin her iki tarafı $C_{p,a}$ ile bölüldüğünde,

$$\frac{h_c}{h_D C_{p,a}} = \left(\frac{\infty}{D} \right)^{1-c} \quad (3.153)$$

elde edilir. Burada $h_c / (h_D)(C_{p,a})$, Lewis sayısı olarak adlandırılan boyutsuz bir terimdir. Nemli hava sabit sıcaklıktaki bir su yüzeyi üzerinden aktığında psikrometrik diyagramdaki havanın nemlilik değişimi Lewis sayısına bağlıdır. Lewis sayısı 1.0 ise, havanın nemlilik değişimi havanın giriş koşullarını belirleyen nokta ile doyumluk eğrisi üzerindeki yaş termometre sıcaklığına karşı gelen noktayı birleştiren doğru boyunca olmaktadır.

Psikrometre (yaş termometre) sıcaklığı sürekli bir gaz akımı ile temasta olan az miktarda bir sıvının adyabatik koşullarda kararlı hale ulaştığı dengesiz sıcaklıktır. Sıvı kütlesi gaz fazına oranla çok küçük olduğu için gaz özelliklerinde meydana gelen değişme ihmal edilebilir. Şekil 3.33'de gösterilen yaş termometre haznesi, nemlendirilmiş bir bez fitil tarafından çevrilmiş bir termometredir. Fitolin fonksiyonu yaş termometre üzerinde ince bir su filmi oluşturmaktır. Aynı ortamda hem kuru hem de yaş termometrenin yer alması durumunda cihaz, psikrometre olarak adlandırılır.

Termometre gövdeleri boyunca ısı aktarımı etkileri ihmal edilebilir. Hazneyi çevreleyen ortamın sıcaklığı (t_s), kuru termometre sıcaklığından (t) farklı ise kuru termometre, t_s ve t değerleri arasında herhangi bir yerdeki t_{db} değerini gösterecektir. Yaş termometre, hava akımından konveksiyonla ve yüzeyden radyasyonla ısı alabilir.



Şekil 3.33 Yaş termometre (Threlkeld, 1986).

Şekil 3.33'deki sistem için yatışkın halde (kuru termometre için) aşağıdaki eşitlikler yazılabilir;

$$h_c(t_{db}-t)=h_R(t_s-t_{db})$$

$$t=t_{db}-\left(\frac{h_R}{h_c}\right)(t_s-t_{db}) \quad (3.154)$$

Son eşitlik havanın kuru hazne sıcaklığının hesaplanmasını sağlar. Şekil 3.33'deki yaş termometre için

$$h_D(W_{s,wb}-W)h_{fg,wb}=h_c(t-t_{wb})+h_R(t_s-t_{wb}) \quad (3.155)$$

yazılıp Denk.3.155 'te $h_D=hc / (Le)(C_{p,a})$ değeri yerine konulduğunda,

$$W=W_{s,wb}-K(t-t_{wb}) \quad (3.156)$$

bulunur. Burada,

$$K=\frac{Le C_{p,a}}{h_{fg,wb}} \left[1 + \frac{h_R(t_s-t_{wb})}{h_c(t-t_{wb})} \right] \quad (3.157)$$

şeklindedir. Spesifik ısı, nemlilik oranının aritmetik ortalaması alınarak

$$C_{p,a} = 0.240 + 0.45 \frac{(W + W_{s,wb})}{2} \quad (3.158)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanabilir.

Denk.3.156 ve 3.158 yardımıyla K'nın değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$K = \frac{0.240 + 0.45 W_{s,wb}}{\frac{h_{fg,wb}}{Le \left[1 + \frac{h_R (t_s - t_{wb})}{h_c (t - t_{wb})} \right]} + 0.225 (t - t_{wb})} \quad (3.159)$$

Denk.3.156 ve 3.159 havanın nemlilik oranının belirlenmesini sağlar. Yaş termometre sıcaklığında doymuş nemli havanın nemlilik oranı ($W_{s,wb}$) Dalton kanunu'na göre hesaplanabilir veya deniz seviyesindeki basınç için nemli havanın termodinamik özelliklerinden yararlanılabilir. Denk.3.159'da verilen genel K ifadesi iki özel durum için;

(a) yaş termometreyi çevreleyen yüzeyin ortalama sıcaklığının, havanın kuru termometre sıcaklığına eşit olduğu varsayıldığında ($t = t_s$)

$$K = \frac{0.240 + 0.45 W_{s,wb}}{\frac{h_{fg,wb}}{Le \left(1 + \frac{h_{R,t}}{h_c} \right)} + 0.225 (t - t_{wb})} \quad (3.160)$$

(b) yaş termometre, radyasyon etkilerinden mükemmel bir şekilde korunursa,

$$K = \frac{0.240 + 0.45 W_{s,wb}}{\frac{h_{fg,wb}}{Le} + 0.225 (t - t_{wb})} \quad (3.161)$$

şeklinde yazılabilir. Radyasyon katsayısı h_R yaş termometre için aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir;

$$h_R = 0.1713 \epsilon_{wb} \frac{\left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{wb}}{100} \right)^4 \right]}{(t_s - t_{wb})} \quad (3.162)$$

Tek bir tele veya silindire dikey yönde hava akışı için konveksiyon katsayıları sırasıyla aşağıdaki denklemlerden bulunabilir (Threlkeld, 1986);

$$\frac{h_c d}{k_f} = 0.615 \left(\frac{d V \rho_f}{\mu_f} \right)^{0.466} \quad 40 < Re < 4000 \quad (3.163)$$

$$\frac{h_c d}{k_f} = 0.174 \left(\frac{dV \rho_f}{\mu_f} \right)^{0.618} \quad 4000 < Re < 40000 \quad (3.164)$$

3.3.1.1 Termodinamik yaş termometre sıcaklığı ile psikrometrik yaş termometre sıcaklığı arasındaki ilişki

Termometreden okunan bir sıcaklık ile termodinamik yaş termometre sıcaklığı arasında belirgin bir fark vardır. Bu nedenle bu iki sıcaklık farkının çok iyi anlaşılması gerekir. Yaş termometre sıcaklığı aslında kuramsal bir sıcaklık olup termodinamik bir özelliktir. Yaş termometre sıcaklığı ısı ve kütle aktarımından etkilendiği için termometreyi çevreleyen havanın temel fonksiyonu değildir. Psikrometrik eşitlikler ve diyagramlarda daima termodinamik yaş termometre sıcaklığı göz önüne alınır.

Yaş termometre sıcaklığı (t_{wb}) ve termodinamik yaş termometre sıcaklığı (t^*) arasındaki ilişkiyi irdelemek amacıyla, adyabatik doyumluk süreci için aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$W = W_s^* - K^* (t - t^*) \quad (3.165)$$

Burada,

$$K^* = \frac{C_{p,a}}{h_{fg}} \quad (3.166)$$

olup adyabatik doyumluk prosesi için yaş termometre katsayısına benzer bir terimdir. Denk.3.157, 3.165 ve 3.166 'nın karşılaştırılması sonucunda, Lewis sayısının 1.0'den küçük olması halinde, korunmalı bir yaş termometre sıcaklığının, termodinamik yaş termometre sıcaklığından daha düşük bir sıcaklık değerini göstereceği anlaşılır. Bununla birlikte Denk.3.157'deki t_{wb} değeri t^* 'a eşit olabilir.

$$Le \left[1 + \frac{h_R (t_s - t_{wb})}{h_c (t - t_{wb})} \right] = 1.0 \quad (3.167)$$

Yani, Lewis sayısının 1.0'den daha az olmaya başladığı durum için ısı aktarımı yaş termometreye olan radyasyonla dengelenebilir.

Psikrometrik yaş termometre sıcaklığı ile termodinamik yaş termometre sıcaklığı arasındaki genel ilişki Denk.3.156 ve 3.165 yardımıyla türetilir.

$$(t_{wb}-t^*) + \frac{(W_{s,wb}-W_s^*)}{K^*} = \left(\frac{K}{K^*}-1\right)(t-t_{wb}) \quad (3.168)$$

Dar bir sıcaklık aralığında (t_{wb} 'nin t^* 'den çok az farklı olduğu bilindiği için)

$$W_{s,wb}=A+Bt_{wb}$$

$$W_s^*=A+Bt^*$$

yazılabilir. Burada A ve B sabit değerlerdir. Denk.3.168 ve 3.169 ile

$$W_{s,wb}-W_s^*=B(t_{wb}-t^*) \quad (3.170)$$

bağıntısı birleştirildiğinde elde edilen

$$\frac{t_{wb}-t^*}{t-t_{wb}} = \frac{(K/K^*)-1}{1+(B/K^*)} \quad (3.170)$$

eşitliği, $(t-t_{wb})$ şeklindeki yaş hazne farkından, $(t_{wb}-t^*)$ sapmasını ifade eder. B katsayısının barometrik basınçtaki değerleri Şekil 3.34'de verilmektedir.

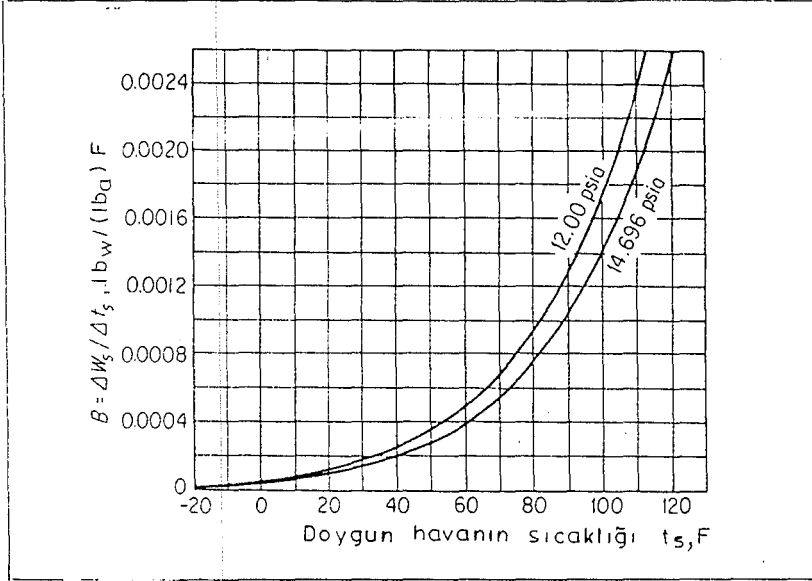
Yaş termometreyi çevreleyen yüzeyin ortalama sıcaklığının havanın kuru termometre sıcaklığına eşit olduğu özel durum için ($t_s = t$) Denk.3.170 aşağıdaki eşitliğe indirgenebilir ($h_{fg,wb}$ hemen hemen h_{fg}^* 'ye eşittir).

$$\frac{t_{wb}-t^*}{t-t_{wb}} = \frac{Le(1+h_{R,t}/h_{\phi})-1}{1+(B/K^*)} \quad (3.171)$$

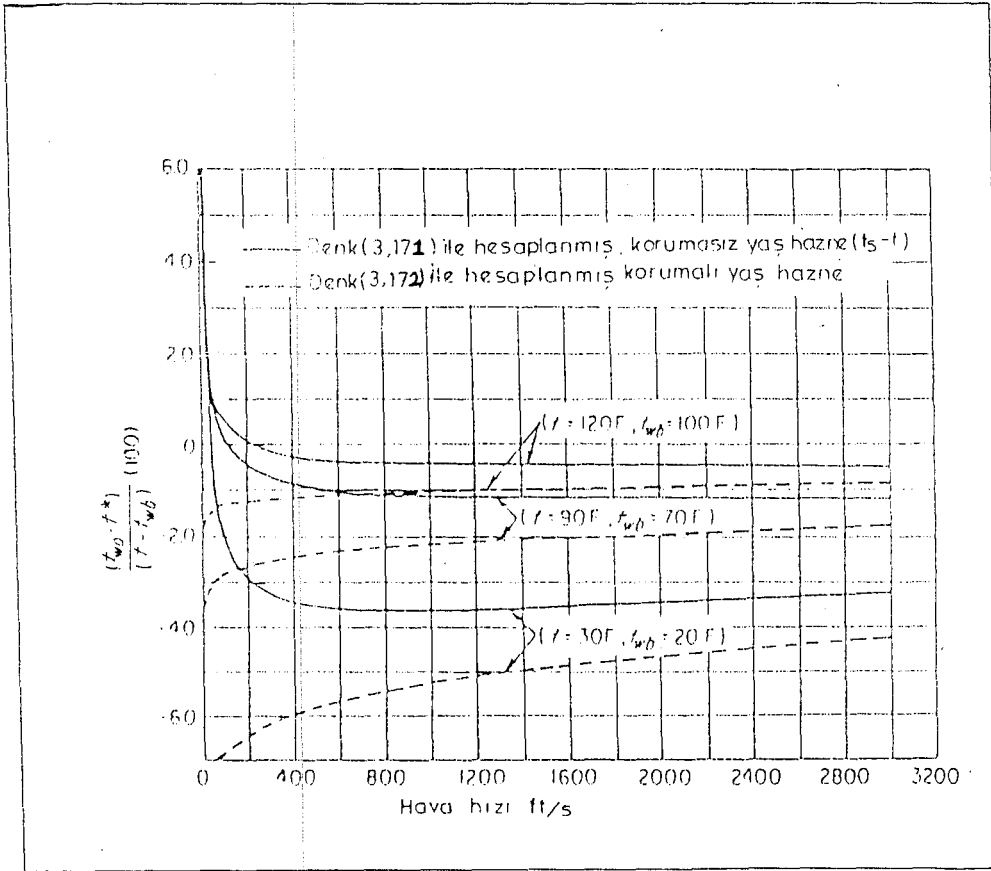
Korunmalı bir yaş termometre için, Denk.3.171 aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\frac{t_{wb}-t^*}{t-t_{wb}} = \frac{Le-1}{1+(B/K^*)} \quad (3.172)$$

Şekil 3.35'de 0.3 in çaplı bir yaş hazne için psikrometrik yaş hazne sıcaklığının termodinamik yaş termometre sıcaklığından sapması gösterilmektedir. Yaş termometreyi çevreleyen yüzeyin sıcaklığının, havanın kuru termometre sıcaklığına eşit olduğu durum için Denk.3.171 yardımıyla koyu çizgili eğriler, korunmalı yaş termometre durumu için Denk.3.172 yardımıyla da kesik çizgili eğriler hesaplanmıştır. Korunmasız bir yaş termometre için, her bir sıcaklık kombinasyonunda t_{wb} ve t^* 'nin eşit olmasını sağlayan ayrı bir hız değeri sözkonusudur. Hız sıcaklıkla artar ve belirli bir hızın ötesinde sıcaklık farkı oldukça sabit kalır. Yaklaşık 100 ft / dk 'dan daha düşük hızlarda sapma büyük olabilir.

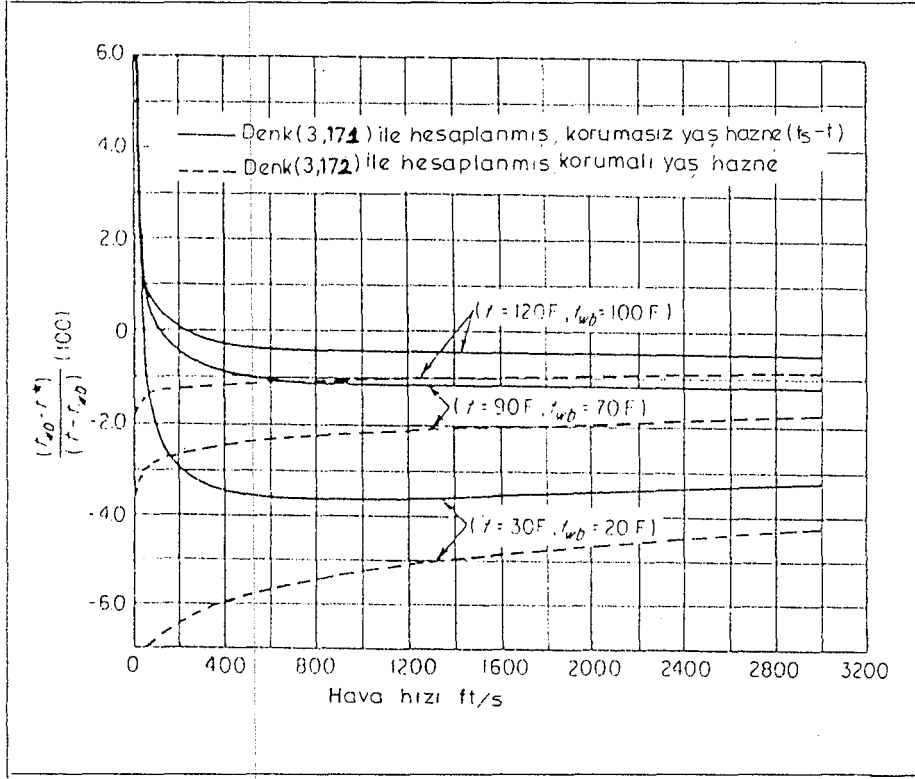


Şekil 3.34 Doğun hava için sıcaklık ile nem oranı ilişkisi (Threlkeld, 1986).



Şekil 3.35 14.696 psia barometrik basınçta 0.3 in. çaplı yaş hazne termometresi için psikrometrik yaş termometre sıcaklığının termodinamik yaş termometre sıcaklığından sapması (Threlkeld, 1986).

Şekil 3.36 sapmanın her zaman negatif olduğunu ve genellikle $t_s=t$ olan korunmasız yaş hazneye kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.36 14.696 psia barometrik basınçta, 0.1 in. çaplı yaş hazne termometresi için psikrometrik yaş termometre sıcaklığının termodinamik yaş termometre sıcaklığından sapması (Threlkeld, 1986).

Şekil 3.34 ve 3.35 sadece üç sıcaklık kombinasyonu için verilmiş olmakla birlikte bazı genelleştirmelerin yapılması mümkündür. Donma noktasının üzerindeki atmosferik sıcaklıklarda (yaş termometre sapmasının $20\text{ }^\circ\text{F}$ 'in üzerine çıkmadığı ve radyasyon ortamlarının var olmadığı yerlerde) hava akış hızı 100 ft / dk değerini aştığı sürece, korunmasız bir sıvalı cam termometre için t_{wb} , t^* 'dan $0.5\text{ }^\circ\text{F}$ 'dan daha az farklı olacaktır. Yaş termometre olarak ısı çiftlerinin kullanılması halinde daha düşük hava hızlarında da benzer bir hassasiyet sözkonusudur. Böylece uygun koşullarda korunmasız bir psikrometreden elde edilen yaş termometre sıcaklığı, mühendislik hesaplamalarında, termodinamik yaş termometre sıcaklığı olarak kullanılır. Bu durumda nemli havanın yapısı doğrudan psikrometrik diyagramlardan elde edilebilir (Threlkeld, 1986; Bird, 1960; Çataltaş, 1972; McCabe and Smith, 1976; Bennett and Myers, 1974).

3.3.2 Psikrometrik diyagramların yapısı

Nemle ilgili çeşitli bağıntıların hassasiyetle çözümlenerek sonuca gidilmesi mümkün olsa da, bu işlem oldukça yorucu ve zaman alıcıdır. Bu nedenle nemin belirlenmesinde, ilgili bağıntıların grafiğe geçirilmiş şekli olan psikrometrik diyagramlar daha sık kullanılır. Bunlar sadece değişik özelliklerin okunması için değil, pek çok proses problemi için de uygun grafiksel çözümleri sağlar.

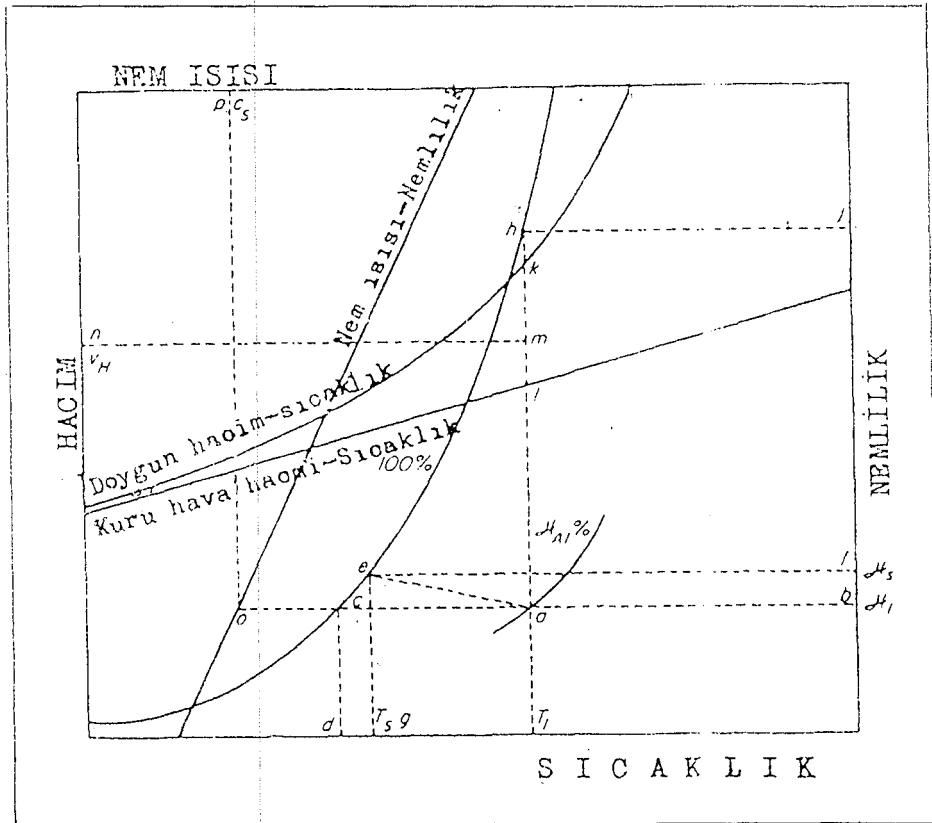
Barometrik basınçla birlikte iki bağımsız özellik biliniyorsa, nemli havanın termodinamik hali (intensive) belirlenebilir. Psikrometrik diyagramlarda genellikle standart deniz seviyesi basıncı kullanılır ve koordinat seçimi keyfidir. Örneğin ABD 'de kullanılan psikrometrik çizelgelerde temel koordinatlar kuru termometre sıcaklığı ve nemlilik oranı iken, Almanya'da 1923'de Mollier tarafından geliştirilen diyagramda entalpi ve nemlilik oranı esas alınmıştır (Threlkeld, 1986). Temel koordinatlar olarak entalpi ve nemlilik oranının kullanılması pek çok avantaj sağlar. Bu diyagram tipinde termodinamik yaş termometre sıcaklığı doğrusal değişim gösterir. Diyagram klima problemlerinin incelenmesine de olanak sağlar.

Genellikle hava-su sistemi için hazırlanmış olan psikrometrik diyagramlarda iki birim sistemi ve üç ayrı sıcaklık aralığı kullanılır. Bu diyagramlarda nemlilik oranını gösteren yatay doğrular sıfırdan (kuru hava) başlar. Birbirine paralel olan entalpi doğruları ise eğimli olarak çizilir. Kuru termometre sıcaklık doğruları dikey konumda hafif eğimli olup doğrusaldır. Termodinamik yaş termometre sıcaklık doğruları diyagram boyunca eğimli çizilirler; yönleri az da olsa entalpi doğrularının yönlerinden farklılık gösterir; bu doğrular birbirine paralel değildir. Bağıl nemlilik doğruları sıfırdan % 100 'e (doygunluk eğrisi) kadar % 10 aralıklarla gösterilir. Doygunluk eğrisi üzerinde sis durumlarını gösteren dar bir bölge mevcuttur. Sis, her ikisi de aynı sıcaklıkta olan doygun nemli hava ve su damlacıklarının mekanik bir karışımı olup doygun nemli havanın aynı sıcaklıktaki su ile adyabatik aşırı doygunluk durumuna eşdeğerdir.

Şekil 3.37'de gösterilen nem diyagramında a noktası, kuru termometre sıcaklığı T_1 ve nemi W_a olan doymamış bir hava-su karışımını temsil etmektedir. Bu noktadan apsise bir paralel çizilerek b noktası (karışımın nemi) bulunur; a noktasından geçen sabit nem hattı takip edilerek % 100 doygunluk eğrisine ulaşılır ve çiğlenme noktası bulunur. Bu noktadan apsise inilen dik (d noktası) çiğlenme sıcaklığını (havanın doymuş hale

gelebilmesi için soğutulması gereken sıcaklık) verir. Adyabatik çizgiyi takip ederek a noktasından doymuluk eğrisine kadar ilerlendiğinde e noktası ve buradan sıcaklık eksenine inildiğinde ise g noktasına ulaşılır. Bu sıcaklık (adyabatik doyma sıcaklığı t_s) yaş termometre sıcaklığına oldukça yakındır. Sıcaklık eksenine e noktasından çizilen paralel, nem eksenini f noktasında (adyabatik doymuluk sıcaklığında bulunan doymuş havanın nemi) keser. Eğer a noktasındaki özelliklere sahip hava sabit sıcaklıkta doymunlaştırılırsa, bu havanın bileşimi a noktasından sıcaklık eksenine bir dik çizilip, bunun doymuluk eğrisini kesinceye kadar uzatılmasıyla bulunur. Bu doymuş havanın nemi, h noktasından sıcaklık eksenine çizilen paralelin nem eksenini kestiği j noktasından bulunur.

T_1 sıcaklığına karşılık gelen k ve l noktalarından (doymuş ve kuru hava hacimleri) a noktasındaki nemli havanın hacminin bulunması mümkündür. Sonra h noktasından itibaren l k doğrusu üzerinde ($W_a / 100$) k l uzunluğu kadar gidilirse, m noktasından hacim eksenine çizilen dik ile de n noktasına karşılık gelen nemli hacim bulunur.



Şekil 3.37 Nem diyagramının kullanılışı (Gülbaran, 1981).

3.4 Nem Ölçüm Yöntemleri ve Prensipleri

Hava kalitesini kontrol amacıyla yapılan emisyon ölçümlerinde, örnek hattının zarar görmesini (korozyon, tıkanma vb.) önlemek, örneği korumak ve sonuçta kuru baz üzerinden çalışma yapmak için gaz akımının içerdiği nem miktarının bilinmesi oldukça önemlidir. Ancak sadece emisyon değil, imisyon ve işyeri atmosferinde de nemin doğru tespiti gereklidir. Çizelge 3.3 'te nem ölçüm yöntemlerinin toplu bir özeti verilmiş, bu çalışmada yaş-kuru termometre ve adsorpsiyon yöntemleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.3 Nem ölçüm yöntemleri (Considine, 1985)

Parametre	Tanımı	Birimleri	Tipik Uygulamaları
Yaş hazne sıcaklığı	Hava akımı içine uzatılmış bir termometreden okunan minimum sıcaklık	$^{\circ}F$ veya $^{\circ}C$	Yüksek sıcaklıktaki kurutucular, klima, meteoroloji, test odaları
Yüzde bağıl nem	Genellikle kuru hazne sıcaklığında, suya göre gerçek buhar basıncının doygunluk buhar basıncına oranı	0-100 %	Monitor sistemli klima odaları, test odaları, farmasotik ve gıda paketleme tesisleri
Çiğlenme veya donma noktası	Çiğ noktası doygun halde soğutulmuş havanın sıcaklığıdır. Sıcaklık $32^{\circ}F$ 'in altında ise donma noktası adını alır.	$^{\circ}F$ veya $^{\circ}C$	Isı muamelesi, kızdırma atmosferleri, kurutucu kontrolü, hava izleme aleti, meteorolojik / çevresel ölçümler
Hacim veya kütle oranı	Hacimsel olarak su buharının kısmi basıncının kuru taşıyıcı gazın kısmi basıncına oranıdır. Ağırlıkça ppm ile aynıdır, fakat oran, taşıyıcı gazın molekül ağırlığına bağlıdır.	ppm, ppm _v , ppm _w	Öncelikle hava, azot, oksijen, metan, hidrojen vb. gibi endüstriyel gazların kuruluşundan emin olmak için kullanılır.

3.4.1 Yaş ve kuru termometreler ile nem ölçümü

Bu teknik, ıslatılmış termometre haznesinden (veya diğer sıcaklık hissedici bir elemandan) su buharlaşma hızının bağıl nem tespiti için kullanılmasına dayanır. Yaş termometre sıcaklığını hassas olarak ölçmek için fitil yeterince ıslak olmalı, gazla temas eden hiç bir kuru alan bulunmamalıdır. Gaz hızını yeterince yüksek tutarak daha sıcak olan çevreden termometre haznesine radyasyonla ısı akış hızı, gazdan hazneye olan konveksiyonla duyulur ısı akış hızına göre ihmal edilebilmelidir. Hazneye ilave edilen sıvının sıcaklığının yaş termometre sıcaklığında olması gereklidir. Fitil distile suyla ıslatılmalı ve kirlilikten uzak tutulmalıdır.

Yaş termometredeki sıvının yüzeyi kütesine oranla çok büyük olduğundan, sıcaklık hızla bir denge değerine düşer. Bir süre sonra daha yüksek sıcaklığa sahip olan gazdan sıvıya aktarılan ısının değeri ile, sıvı buharının sıvı fazdan gaz fazına geçiş değeri arasında dinamik bir denge kurulur. İşte bu denge anındaki sıvının sıcaklığı, içinde buharlaştığı gazın sıcaklığından daima daha düşüktür ve kuru termometre, yaş termometreden önce yerleştirilmelidir. Akım hızı 4.6 m / s'den büyük olduğu takdirde yaş termometredeki okuma, direkt olarak adyabatik doygunluk sıcaklığını verecek, gaz fazı başlangıçta doygunluk haline kadar sıvı buharı ile doyurulmuşsa, buharlaşma veya yaş termometre sıcaklığında bir düşüş olmayacaktır. Yaş termometre sıcaklığındaki düşmenin miktarından, buhar-gaz karışımının doygunluk derecesini ölçmek mümkündür. Yaş-kuru termometre sıcaklıklarının ölçülmesi ile gaz fazı tarafından taşınan buhar miktarının hesaplanması prensibi, her buhar-gaz karışımı için kullanılabilir.

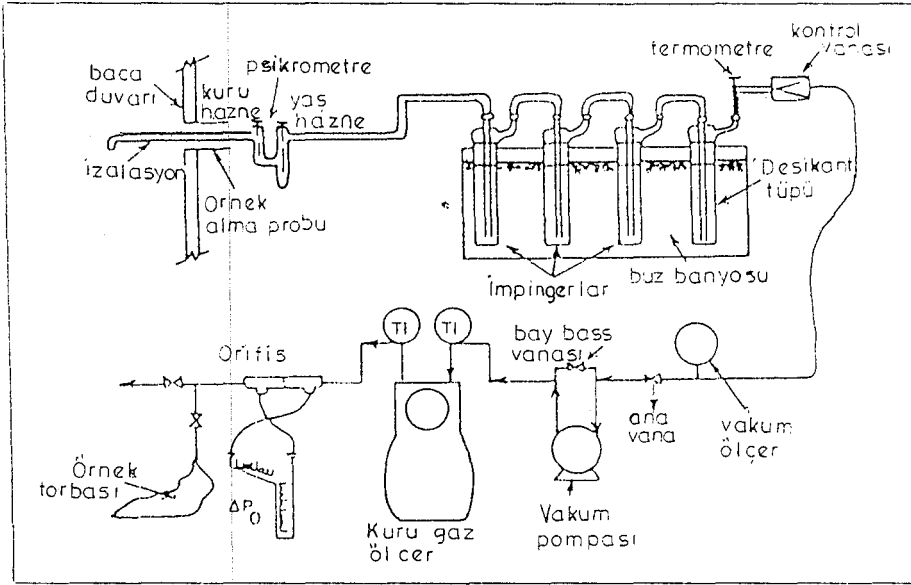
Pek çok yanma kaynağında, gaz neminin ön ölçümü için psikrometre rahatlıkla uygulanan bir yöntemdir ve özellikle kereste fırınları, tuğla ve kiremit işletmeleri gibi buna benzer aletlerin hava kirletici maddelere maruz kaldığı veya kötü kullanım koşullarının mevcut olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Yanma dışındaki diğer kaynaklar için yoğunlaşma (EPA Yöntem 4) yöntemi kullanılmalıdır.

Şekil 3.38 'de modifiye edilmiş bir örnek alma hattı gösterilmektedir. Burada nemin yoğunlaşmasını önlemek amacıyla sonda (prob) ve yaş-kuru termometrelerin çevresi yalıtılmıştır. Vakum pompasını gazdaki nemden korumak amacıyla sisteme yıkama şişeleri ve desikant tüpü konulmuştur.

Yaş ve kuru hazne sıcaklıkları okunduktan sonra psikrometrik diyagramlardan yararlanarak gaz içindeki nemin hacimsel kesri

$$\frac{f_w}{1-f_w} = \frac{P_w^o}{P-P_w^o} - \left[\frac{\infty (d-t_w)}{\lambda_w} \right] \left(\frac{M_{dg}}{M_w} \right) \quad (3.173)$$

bağıntısından hesaplanabilir.



Şekil 3.38 Psikrometre ile baca neminin belirlenmesi (Cheremisinoff and Morresi, 1983).

P_w^o ve λ_w değerleri standart buhar tablolarından, M_{dg} ise gaz bileşiminden bulunabilir. Ayrıca, gaz basıncı ile barometrik basıncın da ölçülmesi gerekir (EIE, 1988; Harrison and Perry, 1986; Brenchley, Turley and Yarmac, 1973; McGraw-Hill, 1982; Miller, 1983; Strauss, 1975; Cheremisinoff and Morresi, 1983; Considine, 1985).

3.4.2 Yoğunlaşma yöntemi ile nem ölçümü

Belirli akım hızlarında bacadan çekilerek kondenserden geçirilen örnekten toplanan kondensat miktarından, hacmi bilinen gaz örneği için nem içeriğinin hesaplanması mümkündür. Yöntem, nem içeriği % 1'in üzerinde ise uygundur.

Prencip olarak, subuharının kısmi basıncının azalmasıyla, örnek sıcaklığının da azalacağını öngören bu yöntemde buz banyosu (kondenser) genellikle çeşitli kuru ve yaş gaz yıkama şişelerinin birleştirildiği bir seriden oluşmakta, bir tüpe sarılmış bakır bobinden de yararlanılabilmektedir. Yoğunlaşma prosesine yardımcı olmak üzere başlangıçta kondensere belirli bir miktar su konulabilir.

Örnek hattından ve sistemden geçen gaz örneğinin miktarı bilindiğinden, örnekteki nemin toplam hacmi için,

$$V_{wo} = V_{wc} + V_{wm} \quad (3.174)$$

ve V_{wm} için,

$$V_{wm} = \frac{e_m}{P_m} V_m \quad (3.175)$$

bağıntıları yazılabilir. Örnek alma noktasında (bacada) nem (hacimsel) oranı

$$f_w = \frac{V_{wo}}{V_{wc} + V_m} \quad (3.176)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanabilir. Denk.3.175, 3.176'da yerine konulursa,

$$f_w = \frac{V_{wc} + V_{wm}}{V_{wc} + V_m} \quad (3.177)$$

ve V_{wm} için Denk.3.175 çözümlü, 3.177'de yerine konulduğunda,

$$f_w = \frac{V_{wc} + \left(\frac{e_m}{P_m}\right)V_m}{V_{wc} + V_m} \quad (3.178)$$

bulunur. Eşitliğin pay ve paydası P_m ile çarpılırsa,

$$f_w = \frac{P_m V_{wc} + e_m V_m}{P_m (V_{wc} + V_m)} \quad (3.179)$$

bağıntısı oluşturulabilir. Denk.3.175'de ideal gaz kanunu uygulanıp, 3.180'de V_{wc} için çözüm yapılırsa,

$$f_{wo} = \frac{m_{wc} R t_m + e_m V_m M_w}{m_{wc} R t_m + P_m V_m M_w} \quad (3.180)$$

ifadesinden bulunan değerler doğrudan baca gazının molekül ağırlığının tespitinde kullanılabilir (Brenchley, Turley and Yarmac, 1973; Harrison and Perry 1986).

3.4.3 Adsorpsiyon yöntemi ile nem ölçümü

Yüksek nem koşullarında adsorban, subuharının yoğunlaşmasıyla deaktive olabileceğinden, özellikle düşük nem içeriğine sahip durumlarda kullanılan yöntem 150 °C'ın üzerindeki sıcaklıklarda iyi sonuç vermez. Bu yöntemde adsorpsiyon işlemi başta silikajel olmak üzere CaCl_2 , magnezyum perklorat, fosfor pentoksit veya Drierite R gibi subuharına karşı yüksek afiniteye sahip olan ve bu amaç için uygun maddelerle gerçekleştirilebilir.

Adsorban katılar genellikle granül halindedir ve çapları 12 mm'den 50 μm 'ye kadar değişebilir. Silikajel oldukça iyi bir adsorbandır ve sodyum silikat çözeltisinin asitle muamele edilmesiyle hazırlanabilir. Silikajelin en sık kullanılan 6-16 mesh boyutlu olanları küçük partiküllerin taşınmasını engeller. İndikatör silikajeller ise suyu bünyesinde adsorpladıktan sonra renk değiştirirler. İşlemi başlatmadan önce kuru silikajelin ağırlığı belirlenir ve gaz örneği toplandıktan sonraki ağırlık değişiminden nem miktarı ölçülür. Silikajel tamamen doymadığı takdirde (gaz sıcaklığı düşük olduğunda) tüpten ayrılan su buharı miktarı ihmal edilebilir. Yöntem, düşük sıcaklık ve yüksek doyumluktaki gaz akımları için en uygun çalışma sistemidir. Ancak, gaz akımındaki tüm partiküllerin önceden uzaklaştırılması ve gaz akımı içindeki (silikajel tarafından adsorplanabilecek) ana bileşenlerin adsorplanmamasının sağlanması gereklidir. Silikajel, 175 °C 'da rejenere edilebilir. Her atık gaz için kullanılamayan bu yöntemde, diğer bileşenlerin de adsorplanması halinde hatalı ağırlık artışı, dolayısıyla nem içeriğinin beklenmeyen bir şekilde yükselmesi sözkonusudur (Brenchley, Turley and Yarmac, 1973, Treybal, 1986).

3.4.4 Elektriksel nem ölçümü

Klasik olarak psikrometrik diyagramlardan ve yaş-kuru termometre sıcaklıklarından yararlanarak bulunan bağıl nemin kontrolü ve / veya sürekli kaydı için Dunmore tipi elektriksel (transducers) cihazlar da yaygın olarak kullanılmaktadır. Prensibi, bir direnç elemanındaki direncin bağıl nemle değişmesine dayanır. Direnç elemanı, bir plastik parçanın üzerine iki kat sarılan soymetaller arasına yerleştirilmiştir. Teller lityum klorür çözeltisiyle kaplandığında, teller arasında iletkenlik sağlanmış olur. Köprü tipi direnç ölçüm devresinde, direnç / bağıl nem ilişkisi doğrusal değildir ve bir dönüştürücü (transducer) sadece % 10 gibi düşük bağıl nem değerlerini ölçebilir.

Yedi veya sekiz dönüştürücünün (transducer) gerektiği büyük aralıklarda (bağıl nemin an az % 5-99 aralığında) toplam aralığın özel bir kısmı tek bir devre kutusunda birleştirilir. Sensörler, çevreden önemli miktarlarda nem veya ısı absorplamaz veya çevreye ısı iletmezler; çalışma sıcaklıkları -40 ile 150 °F arasındadır (Doebelin, 1983).

Bir diğer elektrik-direnç tipi sensör, "pope cell" olarak adlandırılan, sülfolanmış polistiren iyon değişim aletidir ve birkaç megohm % 0 bağıl nemden, 1000 Ω % 100'e kadar lineer olmayan direnç değişimini kapsar ve giriş aralığında tek bir sensör vardır. Yarı iletken sensörlerle uygunluğu, moleküler seviyede oldukça yüksek gözeneklilik, subuharı moleküllerinin yapının içine ve dışına serbestçe sürüklenmeleri, örgülü su dipollerinin birbirini etkilemesi halinde etkin direncinin değişmesidir. Tek bir sensör (elektronikle beraber) sıcaklık dengelemeşini 0-50 °C 'da % 0-100 bağıl nem aralığını kapsayacak şekilde % +4 doğrulukla ve lineerleştirilmiş çıktıyla yapar.

Gaz arıtım tesislerinde, çiğ noktasının altındaki toplama işlemlerinde korozif maddeler de çözünebileceğinden (SO₃ gibi), temizlenecek gazın çiğ noktasının doğru olarak bilinmesi oldukça önemlidir. Zira yüksek atmosferik nemde atık gazlar, çevre sıcaklığına soğutulduktan sonra hemen doygun hale gelir; gazın çiğ noktasının altında su buharı, örnekleme sisteminin iç yüzeylerinde yoğunlaşır. Çiğ noktası, iki elektrot arasına yerleştirilen iletken olmayan düz bir yüzeyde sıcaklık ölçen bir aletle tespit edilebilir. Materyal kuru olduğunda sonsuz olan direnç, kondense olmuş nem yüzey üzerinde bir film tabakası oluşturduğunda düşer ve elektrotlar arasından akım geçer.

Elektrolitik tipte nem sensörleri de vardır. Burada örnek gaz akımı sürekli şekilde, iç tarafında çift katlı helis şeklinde sarılmış iki platin tel bulunan analiz tüpünün içinden geçmektedir. Teller arasına güçlü bir desikant (P₂O₅) yerleştirilip telin sonuna dc potansiyeli uygulanır. Örnek gazdaki nem P₂O₅ ile tutulduğunda, H₂ ve O₂ gazı içinde su elektrolizlenir ve elektrolitik akım ölçülebilir (Doebelin, 1983; Strauss, 1975).

3.4.5 Dönme psikrometresi ile nem ölçümü

Ortam neminin ölçülmesinde en fazla kullanılan bu psikrometrede yine yaş ve kuru termometre sıcaklıklarından yararlanır. Her iki termometrenin de yerleştirilebileceği yivli dönen kısım ile elle dönme hareketinin verildiği bir bölüm bulunmaktadır. Denge halinde yaş ve kuru termometre sıcaklıklarının ölçülmesinde, ısı ve kütle aktarımını etkili bir

şekilde gerçekleştirmek için hava akım hızının 5 m / s'de tutulması gereklidir. Bu yöntemle 5-50 °C aralığında değişen sıcaklıklarda nem tayini yapılabilir. Yaş hazne sıcaklığı 1 °C'nın altında olmamalıdır. Bağıl nemdeki belirsizlik \pm % 5'ten fazla, kuru hazne sıcaklığının okumasındaki belirsizlik ise \pm 0.6 °C'dan fazla olmamalıdır. Bağıl nemdeki belirsizliğin \pm % 3'ten daha fazla olmaması istendiği takdirde, sıcaklık hassasiyeti \pm 0.2 °C 'dan daha fazla olmayan termometreler seçilmelidir (ASTM, 1985; Yücel ve İçer, 1989).

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Materyal ve Metod

4.1.1 Örnek alma koşullarının incelenmesi

Çok değişken nitelik ve nicelik taşıyan kirleticileri içeren gaz ve partikül biçimindeki hava örneklerinin sabit ve hareketli emisyon kaynaklarında (baca, egzoz ve işyeri atmosferi) ve / veya dağılım gösterdikleri atmosferde analizleri için sağlıklı bir örnek alma sisteminin tespiti ve toplanan örneklerin en pratik, hızlı ve ekonomik yöntemlerle kesikli veya sürekli (monitoring) tarzda, yerinde veya taşındıkları ayrı bir laboratuvarında kalitatif ve kantitatif tayinlerinin yapılması gereklidir.

Örnek alma işlemi (özellikle sabit bir kaynakta) sık aralıklı ve uzun süreli bir örnek alma periyodunu gerektirir. Bunun yanında,

- a) kirletici bileşenin miktarının, örneği oluşturan bileşenlerin niteliklerinin (gaz / partikül, organik / inorganik vb.), etkilerinin (insan / hayvan / bitki / eşya / doğa üzerine etkileri, fotokimyasal duman / sera etkileri, ozon tabakasına etkiler, korozif / kanserojen / alerjik etkiler vb.), derişimlerinin ve girişim olasılıklarının göz önüne alınması ve en uygun ölçüm anının düşünülerek ölçüm yapılması,
- b) çeşitli zamanlarda, yeterli sayıda ölçüm yapılması suretiyle sonuçların tamamen ilgili kaynak emisyonunu temsil etmesi,
- c) örneğin bulunduğu koşulların (işyeri atmosferi / baca / egzoz, dış atmosfer, topoğrafik durum, meteorolojik koşullar, rüzgar / inversiyon durumları, sıcaklık / basınç / nem / debi vb.) dikkatlice incelenmesi,
- d) ölçümün yapılacağı yerin çalışan personel için emniyetli olması ve gerek çalışanlar gerekse donanım için bir platformun hazır bulunması,
- e) uygun bir manşonla (portla), ölçüm yapılacak kanal / boru / bacanın içine girilebilmesi,
- f) kullanılan donanım için uygun gücün sağlanması

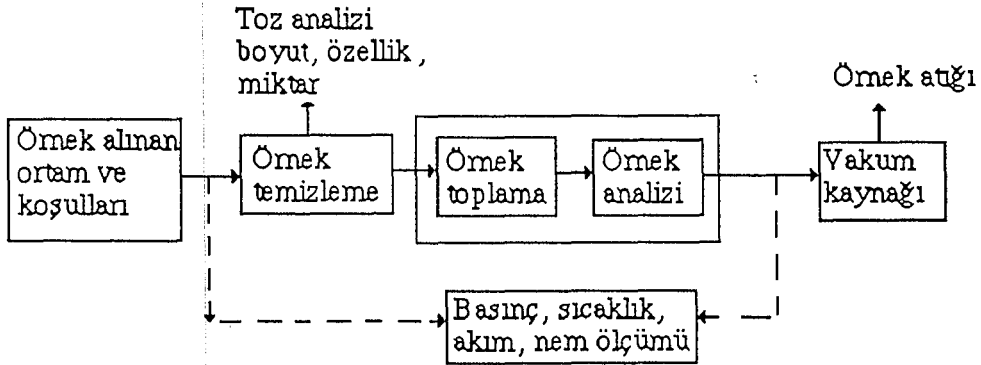
gereklidir.

2 Kasım 1986 tarih ve 19269 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği'nde de belirtildiği gibi, bir inceleme bölgesinde inceleme alanlarının, ölçme konularının, ölçüm yüksekliği, yeri ve yönteminin, ölçüm sıklığının ve her bir ölçüm için gereken sürenin doğru seçimi gerçekçi yorum yapabilmek ve sonuçta uygun önlem alabilmek açısından oldukça önemlidir.

Bir örnek alma hattı genellikle dört temel bölümden oluşur:

1. Örnek-temizleme donanımı
2. Örnek-toplama donanımı
3. Ölçüm aletleri
4. Vakum kaynağı

Şekil 4.1'de bir örnek alma hattı gösterilmiştir. Burada örnek temizleme işlemi, filtrasyon, kurutma ile nemin uzaklaştırılması ve örneğin daha sonraki işlemler için su buharı ile doyurulmasını gerektirebilir. Örnek toplama bölümünde gaz veya partikül şeklindeki kirleticiler bir veya daha fazla yöntemle hava akımından uzaklaştırılır. Gaz toplama işlemi, katı yüzeyde adsorpsiyon, sıvıda kimyasal reaksiyonla absorpsiyon ve buz banyosu gibi soğutucu bir engel vasıtasıyla yoğunlaştırma şeklinde olabilir. Partikül toplama işlemi de, tek veya çok basamaklı filtrasyon, yağ veya kuru tutucularla (impinger) veya sedimentasyonla uzaklaştırma şeklinde gerçekleştirilebilir.

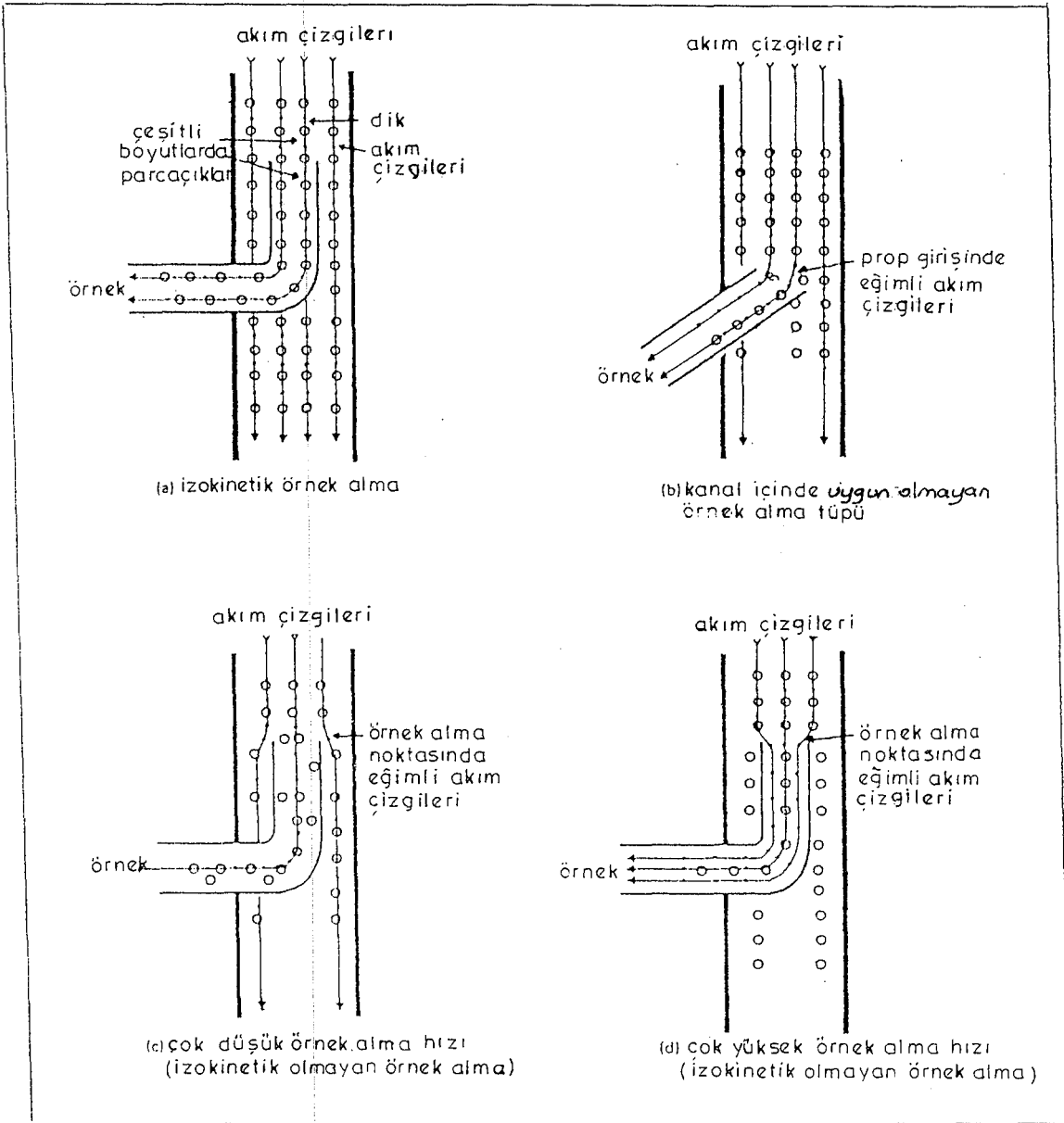


Şekil 4.1 Genelleştirilmiş örnek alma hattı (Var, 1990; Holman, 1979)

Özellik ve koşulları belirli bir kaynaktan çekilen hava örneği, analiz edilmeden önce aşağıda belirtilen çeşitli işlemlere tabi tutulur.

- a) Kaynak dış atmosferse, hava kalitesi ölçümleri kural olarak yer seviyesinden, binadan veya ekili alandan 1.5-4.0 m arasındaki yüksekliklerde ve binadan en az

- 1.5 m yan mesafede tutularak yapılmalı, ormanda yapılan ölçümlerde dirsekler yardımıyla, ölçüm sistemi yüksekte tutulmalıdır.
- b) Eğer bir baca / kanalda ölçüm sözkonusu ise, özellikle katı parçacıkların baca / kanal kesiti boyunca dengesiz dağılımına ve akış rejiminin bozulmasına neden olabilecek dirsek, eklenti, flanş ve benzeri engellerden yeterince uzak bir yer seçilmeli, temel ilke olarak ölçüm hatalarını düzeltmek amacıyla et kalınlığı az olan ve bacadaki normal akış rejimini az etkileyen örnek alma ağzı ve boruları kullanılmalı örnekleme sisteminin borusu ve ağzı baca içinde akış doğrultusuna paralel olarak yerleştirilmelidir.
- c) Akım hattındaki gaz ve aerosollerin, akımdaki durumu tam olarak temsil edecek şekilde ve momentumda bir değişikliğe yol açmayacak koşullar altında örneklenmesi örnek alma borusuna giriş hızının, kaynaktaki akış hızıyla aynı olmasının sağlanması gereklidir (böylece örnek alma debisinin kaynaktaki debiye oranı, kaynağın normal akış rejimini bozmayacak kadar düşük olur (izokinetik örnekleme)). Şekil 4.2 (a)'da izokinetik örnek alma durumu, (b)'de ise akıma göre hatalı yerleştirilmiş olan bir örnek alma probunun etkisi gösterilmektedir. Şekil 4.2(c)'de örnek alma hızının kanaldaki gaz hızından daha düşük olduğu durumda, atalet nedeniyle dış akım hattındaki daha büyük partiküllerin orifisin içine taşınması sonucunda, gaz akımının dış yüzey çevresinde olması hali belirtilmiştir. Havanın gaz akımından daha yüksek bir hızda sondadan (prob) geçmesi durumunda (Şekil 4.2(d)) büyük partiküller ataletle, akım çizgileri boyunca sürüklenir, tüpten yeterli ölçüde geçiş olduğunda ölçülen derişim oldukça düşük olur. Partikül çapının 3μ ve daha az olması halinde izokinetik örnek alma koşulunun uygulanması şart değildir.
- d) Ölçüm sistemine hava girişi veya sistemden dışarıya gaz kaçağının olup olmadığı da kontrol edilmeli ve gaz bileşenler ile kullanılan borular arasında korozyon ve benzeri kimyasal tepkimelerin olmaması için uygun borular kullanılmalıdır. SO_2 içeren bir gaz örneği için taygon tüp veya boruların kullanılması tavsiye edilmektedir.
- e) Örnek alma cihazının kaynak ile katı parçacıkların tutulduğu kısım arasında kalan bölümünde sıcaklık yoğunlaşmayı önleyecek düzeyde tutulmalı, ancak sıcak gazların (baca ve egzoz gazları) soğutulması ve böylece tutulma verimlerinin artırılması için örnekleme sistemine bir soğutucu eklenmelidir.
- f) Örnek miktarı daha sonra yapılacak analiz ve ölçümler için yeterli olmalı, örnek alma cihazına giren toplam gaz hacmi bilinmeli, bu amaçla mutlaka uygun bir



Şekil 4.2 İzokinetik ve izokinetik olmayan örnek alma durumu (Intersociety Committee, 1972).

akım ölçer (rotametre, kuru-yaş gaz ölçerler vb.) kullanılmalı, ayrıca ölçülen bu hacmin standart koşullara (0°C ve 1 atm) indirgenebilmesi için sisteme sıcaklık ve statik basınç ölçülebilen cihazlar da eklenmelidir.

g) Cihazdaki katı parçacık (toz, kurum vb.) tutucusunun (siklon, darbeli mekanik ayırıcı, kağıt / cam / bez / membran filtre veya elektrostatik tutucu) verimi yüksek olmalı, toplanan partiküllerde boyut, özellik ve miktar tayinleri gibi çeşitli fiziksel

veya kimyasal analizler yapılmalıdır.

- h) İstenen kirletici bileşeni tayin etmek üzere öncelikle bu bileşenle girişim yapabilen diğer istenmeyen bileşenleri gaz karışımından uzaklaştırmak için, esas bileşenin tutulmasında da kullanılabilen absorpsiyon, adsorpsiyon, soğutma, yoğunlaştırma (çiğlenme noktalarına göre gazları ayırmak için) veya katalitik olan veya olmayan çeşitli tepkimelerle yeni kimyasal bileşikler oluşturma tekniklerinden yararlanılabilir.

Böylece üretildikleri kaynaktan veya dış atmosferden çekilerek partikül ve yabancı bileşenlerden arındırılmış ve uygun bir spesifik ortamda tutulmuş olan çeşitli kirletici gazların emisyon ve imisyon derişimleri, bunların debi ve nemle olan bağlantıları, daha önce belirtilmiş olan çeşitli yöntemlerle bulunabilir.

EPA ve ASTM standartlarına göre debi ve nem ölçüm metodlarının adları Çizelge 4.1'de verilmiştir (Var, 1990; Cheremisnoff and Morresi, 1983; Harrison and Perry, 1986; Intersociety Committee, 1972; Strauss, 1975; Yılmaz, 1990).

Çizelge 4.1 Çeşitli standartlara göre debi ve nem ölçüm metodları

Metod no	Metodun adı
EPA Metod 1	Sabit Kaynaklarda Örnek Alma ve Hız Ölçümü İçin Çapraz Nokta Belirlenmesi
EPA Metod 2	Baca Gazı Hızı ve Hacimsel Akış Hızının Belirlenmesi (S-tipi pitot tüpü)
EPA Metod 4	Baca Gazlarındaki Nem İçeriğinin Belirlenmesi
ASTM D3154-72	Bir Kanalda Ortalama Hız İçin Standart Test Metodu (pitot tüpü)
ASTM D3195-73	Rotametre Kalibrasyonu
ASTM D3464-75	Isıl Anemometre Kullanarak Kanalda Ortalama Hız İçin Standart Test Metodu
ASTM D4230-83	Soğutulmuş Yüzey Higrometresi İle Nem Ölçümü
ASTM E337-84	Psikrometre İle Nem Ölçümü (Yaş-kuru Hazne Sıcaklıklarının Ölçümü)

4.1.2 Bu çalışmada uygulanan yöntemler

Çalışmanın deneysel kısmında bir soba sisteminde maksimum 400-500 °C 'a kadar olan yanma sıcaklıklarında çeşitli metodlarla partikül ve gaz emisyonlarının ölçümleri ile debi ve nem tayinleri yapılmıştır. Emisyon ölçümleri yanında Eskişehir'in Tepebaşı mahallinde 24 saatlik günlük ortalamalar şeklinde alınan emisyon verileri ayrı bir çalışmada (Kul, 1991) sunulmuştur.

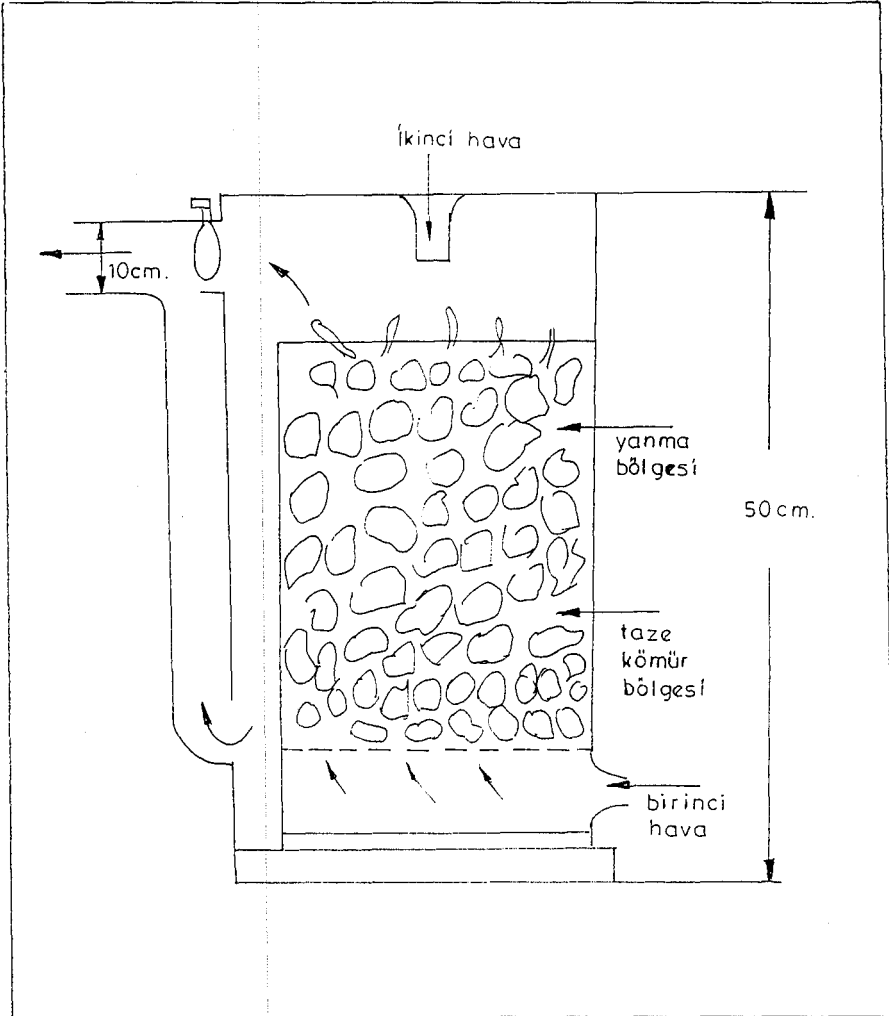
4.1.2.1 Emisyon ölçüm sistemi

Çalışmada yüksek sıcaklıklardaki debi ve nem ölçümlerinin uygun bir şekilde yapılmasını araştırmak, işlem ve dizaynla ilgili problemleri gidermek için bir yanma sistemi (soba) tasarlanmıştır. Deneysel çalışmayla teorik hesaplamaların uygunluğunu denetlemek için kullanılan kömürün elementel analizi ve ısı değeri yanında Orsat cihazı ile kuru baca gazı miktarı da belirlenmiştir. Örnek alma düzeneği yardımı ile NO₂, SO₂ ve asılı partikül derişimleri, pitot tüpü ile gaz hızı ölçülmüş, nem tayinleri için iki ayrı düzenek ve adsorpsiyon (silikajel) yöntemi kullanılmıştır.

Yakma sistemi ve kullanım özellikleri açısından, Türkiye'de genellikle iki ayrı tip soba (geleneksel tuğla astarlı ve kovalı tip) kullanılmaktadır. Bu çalışmada kovalı tip sobadan yararlanılmıştır. Şekil 4.3 'de şematik olarak gösterilen bu soba, silindirik bir gövde ve gövdenin içine üst kısımdan yerleştirilip çıkarılabilen bir kovadan oluşmaktadır. Kova, kömürle doldurulduktan sonra sobanın üst kapağı kaldırılarak, yine saçtan yapılmış silindirik gövdenin içine, belli bir aralık kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Birisi ızgara altından, diğeri üst kapaktaki delikten olmak üzere iki ayrı hava giriş kanalı vardır. Kullanılan sobanın diğere özellikleri Çizelge 4.2 'de verilmiştir.

Kovalı sobada üstten yakma yöntemi uygulanarak, daha az duman çıkması ve daha yüksek verim elde edilmesi sağlanmaktadır. Kova kömürle doldurulduktan sonra bir miktar odun kullanılarak üst taraftan ateşlenmiş böylece kömürün üst tabakalardan başlayarak yanması sağlanmıştır. Yanma bölgesinden çıkan alev ve sıcak gazlar taze kömürün içinden geçmediği için yanıcı gazların açığa çıkış hızı daha düşüktür. Izgara altından giren birincil hava üst taraftaki yanma bölgesine gelinceye kadar ısındığından, daha fazla yanıcı gaz yakılabilmekte, bu şekilde daha az dumanın çıkması sağlanmaktadır. Ancak yanıcı gazların açığa çıkışı kontrol altına alınamadığından ve ikinci hava deliğinden

giren hava yanıcı gazlarla iyi karışmadığından duman oluşumunun tamamen önlenemediği söylenemez (Özcan ve Kural, 1979).



Şekil 4.3 Çalışmada kullanılan kovalı tip soba şeması.

Çizelge 4.2 Deneysel çalışmada kullanılan sobanın özellikleri ve uygulanan yakma koşulları

Sobanın markası.....	Hocaoğlu
Sobanın tipi.....	Kovalı tip
Isıtma yüzeyi (m ²) ^a	0.84
Isıl verim (%) ^b	Bkz.Ek Açıklamalar-C
Anma ısıl gücü ^c	Bkz.Ek Açıklamalar-C
Sobanın kullanım amacı.....	Isıtma
Sobanın kullanım süresi (hr /gün).....	~6-7 (bir beçlik yanma süresi)
Isıl kapasite (kcal / hr) ^d	6068.4
Yakıt kapasitesi (kg).....	7-8
Hava besleme şekli.....	Primer ve sekonder
Yakıt besleme şekli.....	Kovaya elle besleme
Hava / Yakıt Oranı (λ) ^e	min.1.296
.....	max.5.000
.....	ort.2.857
Yanma odası hacmi (m ³) ^f	0.019
Sobanın ısıl gücü (kW) ^g	7.056

a Isıtma yüzeyi hesabı;

soba yüksekliği (h)= 0.57 m.

soba genişliği (D)= 0.36 m.

ısıtma yüzeyi $2\pi r(r+h) = 2\pi (0.18) (0.18+0.57) = 0.84 \text{ m}^2$

b Isıl verim hesabı Ek Açıklamalar-C 'de verilmiştir.

c Anma ısıl gücü hesabı Ek Açıklamalar-C 'de verilmiştir.

d Isıl kapasite hesabı;

* Çizelge 4.4 (a)'dan Tunçbilek + /18-50 kömürü için yaklaşık kalorifik değer 5200 kcal/kg olarak alınmıştır.

* Bir beçte yakılan kömür miktarı= 7 kg /hr (1.167 kg /hr)

$5200 \text{ (kcal /kg)} \times 1.167 \text{ (kg / hr)} = 6068.4 \text{ kcal / hr}$

e Hava / yakıt oranı hesabı Ek Açıklamalar-C 'de verilmiştir.

f Yanma odası hacminin hesabı;

$V = 1/3 \pi r^2 h = 0.019 \text{ m}^3$

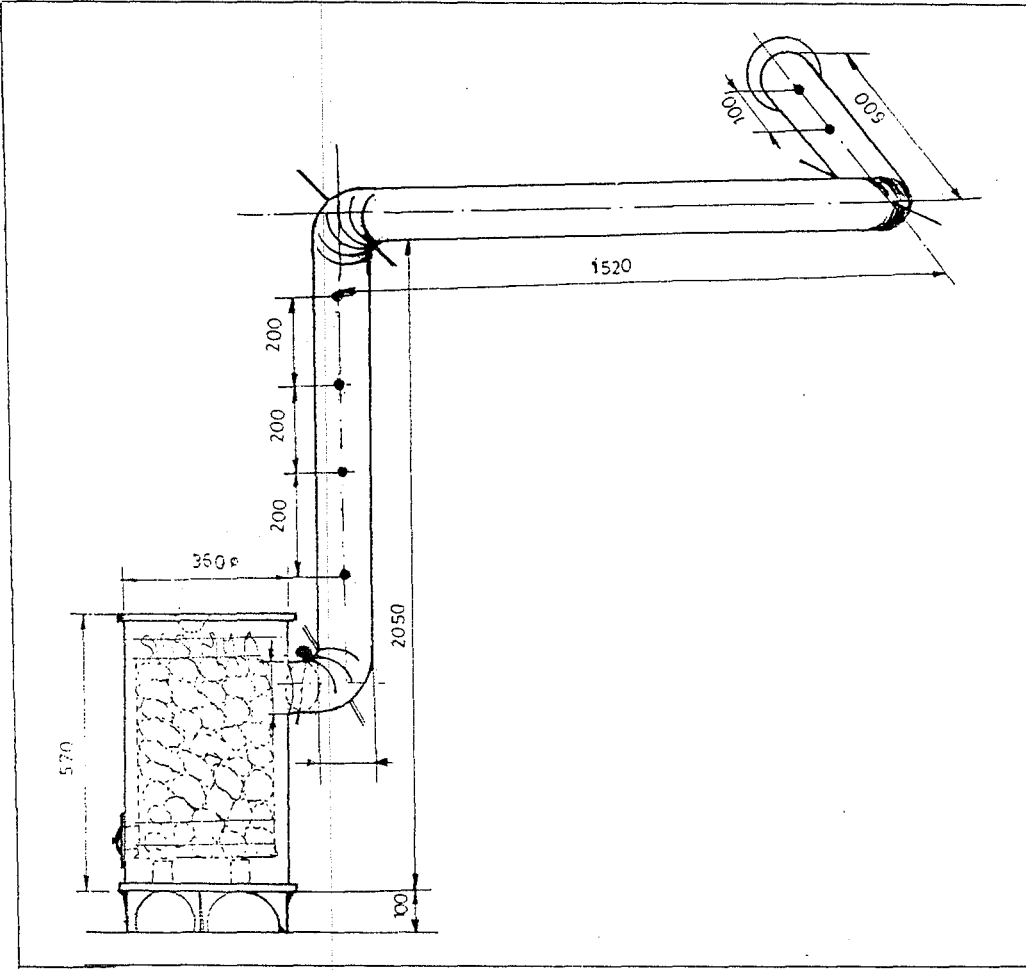
g Sobanın ısıl gücünün hesabı;

$(7 \text{ kg kömür / 6 hr}) \times (5200 \text{ kcal / kg}) \times (1000 \text{ cal / 1 kcal}) \times (4.187 \text{ j / 1 cal}) \times (1 \text{ hr / s})$
 $= 7055.8 \text{ (7055.8 j / s)} \times (1 \text{ W / 1 j / s}) \times (1 \text{ kW / 1000 W}) = 7.056 \text{ kW}$

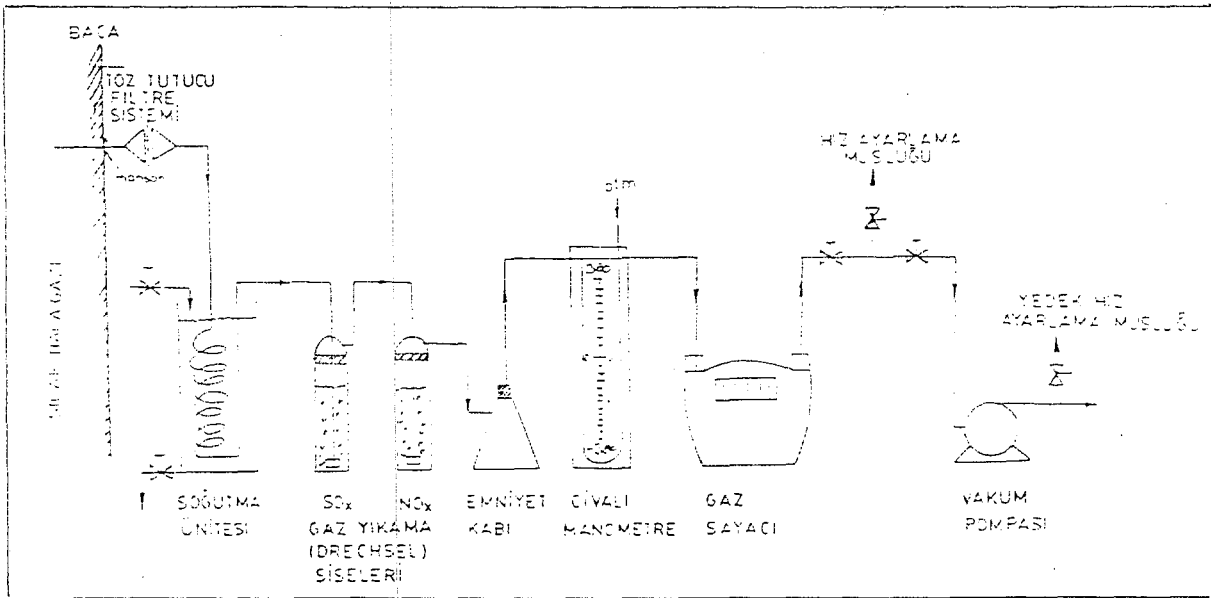
Sistemde, Şekil 4.4'de gösterildiği gibi toplam üç dirsekten oluşan bir gaz akış hattı mevcuttur. Tasarımda ölçüm aletlerinin yerleşim düzeni önemli olduğundan boru üzerinde 20 'şer cm aralıkla 1.0 cm çaplı manşonlar açılmış ve gerektiğinde kapatılmak üzere kör tıplar kullanılmıştır. Her biri yaklaşık 4-5 hr. süren kesikli yanma işlemleri süresince partikül, SO₂ ve NO₂ derişimlerini belirlemek üzere sisteme bir örnek alma düzeneği bağlanmıştır (Şekil 4.5). Örnek alma işlemine paralel olarak iki ayrı düzenekte (Şekil 4.6 (a)(b)) ve 1-3 mm boyut aralığında indikatör tipi ve 2-5 mm boyut aralığında pellt formunda silikajeller kullanılarak nem tayini yapılmış, Orsat cihazı ile CO₂, CO ve N₂ miktarları belirlenmiş, Bluma Gaco-SN cihazı ile gaz ve ortam sıcaklıkları, O₂, SO₂, CO, NO_x, CO₂, η, λ ve ısılık değerleri tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan yakıtın özellikleri Çizelge 4.3'te, kömürlerin ve Kütahya bölgesindeki bazı kömür çeşitlerinin analizleri Çizelge 4.4 (a) ve (b)'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Kullanılan yakıtın özellikleri

Yakıtın cinsi.....	Kömür (Tunçbilek)
Yakıtın kullanım amacı.....	Yakma / ısıtma
Yakıtın tüketim miktarı (kg / hr).....	~1.167
Yakıtın sağlandığı yer / kaynak.....	Tunçbilek
Yakıtın elementel analizi / kaynak.....	Bkz.Çizelge 4.4 (b)
Yakıtın proximate (kaba) analizi / kaynak.....	Bkz.Çizelge 4.4 (a) (b)
Yakıtın boyutu.....	+18-50
Katkı maddesi.....	Odun / tutuşmayı sağlamak amacıyla



Şekil 4.4 Soba sistemi.



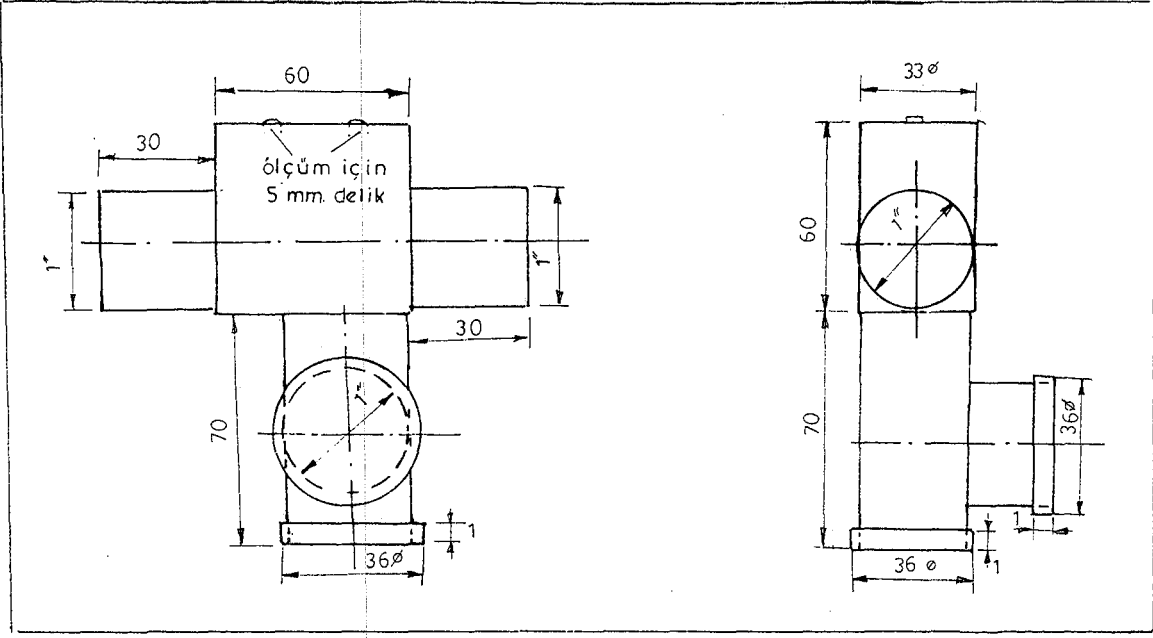
Şekil 4.5 Örnek alma düzeneği (Döğeroğlu, 1988).

Çizelge 4.4 (a) Kütahya bölgesine ait bazı kömür örneklerinin analiz sonuçları

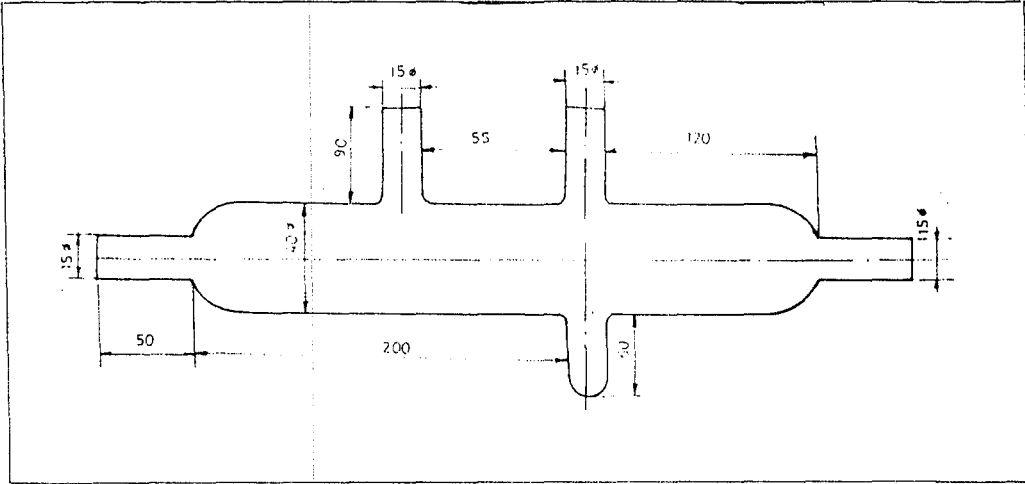
Cinsi	Rutubet (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Kalorifik Değer (kcal/kg)
Tunçbilek +/30	12-21	18-45	1,2-3	2150-4500
Tunçbilek +/50	18-30	15-40	1,2-3	4651-4945
Tunçbilek +/18-50	16-30	15-40	1,1-3	4920-5220
Dumansız yakıt kuru köm.	16,8 23,6	1,2	3756	
Seyitömer +/100	33-37	10-33	1-1,3	1750-3250

Çizelge 4.4 (b) Bazı kömür örneklerinin analiz sonuçları (Yıldırım, 1965)

Kömür Örneği	Nem (%)		Kül (kuru temele göre) (%)	Uçucu madde (kuru-kükürt temele göre) (%)	Element Analizi (Kuru-kükürt) (%)					Mol H / Mol C
	Orjinal Kömürde	Yıvımsız Kömürde			C	H	N	S	O+R	
Çan	9,0	4,7	12,1	48,3	73,3	5,9	2,6	6,0	15,2	1,01
Seyitömer	17,1	7,0	18,0	50,7	71,0	5,6	2,9	2,5	16,0	0,95
Soma	28,7	16,2	20,2	52,0	63,6	5,6	0,7	6,0	23,9	1,05
Tunçbilek	10,0	-	23,1	47,2	71,4	6,8	2,2	3,8	15,8	1,14
Elbistan	35,9	10,4	28,4	65,1	57,9	5,5	3,1	3,3	30,2	1,14
Beypazarı	10,8	-	41,5	51,9	69,9	4,6	1,4	6,7	18,8	0,79



(a)



(b)

Şekil 4.6 Piriç / cam yağ-kuru hazne ölçüm aletleri (Timellini, 1979).

4.1.2.2 İmisyon ölçüm sistemi

Emisyon ölçümüyle bütünlük sağlaması açısından çalışmada emisyon ölçümleri de yapılmış, 1 Ocak 1990-1 Ocak 1991 tarihleri arasında alınan günlük veriler Kul (1991) çalışmasında verilmiştir. Bu amaçla Döğeroğlu (1988) tarafından daha önce yapılan bir çalışmada kullanılan örnek alma düzeneği (Şekil 4.5) aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır:

- a) Örnek alınan noktaya yerleştirilen örnekleme borusu (0.6 cm iç çaplı 1.5 mm et kalınlığında bükülebilir boru) bina duvarından dışarıya 1.5-2 m uzatılmıştır;
- b) Gaz karışımında bulunan partiküllerin tutulmasını sağlayan selülozik veya fiber glass filtre (örnekleme borusunun dış ucuna yerleştirilmiştir);
- c) Gaz karışımındaki kükürt ve azot oksitlerinin tutulmasını sağlayan uygun absorplayıcı çözeltileri içeren seri bağlı 100 cc'lik gaz yıkama (Dreschel) şişeleri;
- d) Vakum ve ani hız değişimi etkisiyle, gaz yıkama şişelerindeki çözeltilerin, sistemin sonraki bölümlerine aktarılmasını (kaçmasını) önlemek üzere kullanılan bir emniyet kabı;
- e) Sisteme çekilen gaz miktarını gösteren bir gaz sayacı veya sabun köpüklü akım ölçer;
- f) Pompa (sisteme gaz çekişini sağlamak üzere vakum yapacak tarzda ayarlanmış özel akvaryum pompası veya diğer tip vakum pompaları).

Gaz karışımında (havada) SO_2 derişimleri, gaz yıkama şişelerine konulan yükseltgeyici çözeltili yardımıyla SO_2 'yi sülfürik asit haline dönüştürmek ve sonra bu asidi BDH indikatörü eşliğinde bazla titre etmek suretiyle belirlenmiş, NO_2 derişimleri ise bu gazı, yine bir gaz yıkama şişesine konan Saltzman ayırıcında tutup, oluşan renk şiddeti 550 nm dalga boyunda spektrofotometrik olarak (Schimadzu UV-120-01) ölçmek suretiyle saptanmıştır. Ölçüm düzeneği ve SO_2 / NO_2 ölçüm metodları ile ilgili detaylı bilgi Döğeroğlu (1988) tarafından verilmiştir.

Filtre sistemine önceden boş tartımı alınan filtre kağıtları (Whatman 1; 7 cm ϕ) yerleştirilmiş, örnek alma işlemleri sonucunda filtrede tutulan partikül miktarları gravimetrik yolla ağırlık farklarından belirlenmiş, bilinen gaz akım hızları yardımıyla, birim hacim gaz karışımındaki partikül ağırlıkları hesaplanmıştır. İslilik (duman) değerleri ise reflektometre (ışık yansımaları) cihazı kullanılarak tespit edilmiş, reflektometre

okumaları (A),

$$\text{Derişim} = \frac{18.055 \times A}{\text{düzeltilmiş gaz hacmi}} \quad (4.1)$$

bağıntısı yardımıyla derişim değerlerine dönüştürülmüştür. (İfadedeki A değeri Çizelge 4.5 'de verilen % okumalara karşılık, $\mu\text{g} / \text{cm}^2$ cinsinden bulunabilir).

Çizelge 4.5 Ringelman indeksinde % okumaya karşılık $\mu\text{g} / \text{cm}^2$ değerleri (Var, 1990)

% Okuma	(A) $\mu\text{g} / \text{cm}^2$	%	(A) $\mu\text{g} / \text{cm}^2$
1	0.5	21	15.2
2	1.0	22	16.4
3	1.5	23	14.4
4	2.0	24	18.6
5	2.5	25	19.6
6	3.0	26	20.8
7	3.8	27	22.2
8	4.5	28	22.3
9	5.2	29	24.8
10	5.8	30	26.2
11	6.6	31	27.4
12	7.2	32	29.0
13	8.2	33	30.6
14	8.8	34	32.3
15	9.6	35	33.8
16	10.5	36	35.8
17	11.4	37	37.8
18	12.2	38	39.6
19	12.4	39	41.8
20	14.2	40	44.2

4.2 Deneysel Bulgular

Deneysel çalışmanın emisyonla ilgili kısmında çeşitli tarihlerde 7 kez soba deneyi yapılmış ve birer saatlik periyodlar halinde toplanan gaz numuneleri analiz edilmiştir. Örnek alma düzeneği ile yapılan ölçümlere ilişkin ham veriler Çizelge 4.6'da, Orsat analizi sonuçları Çizelge 4.7'de, yaş-kuru termometre düzenekleri ile alınan ölçüm verileri Çizelge 4.8'de, Bluma Gaco-SN cihazı ile alınan ölçüm değerleri Çizelge 4.9'da , adsorpsiyon yöntemiyle alınan ölçüm verileri Çizelge 4.10'da, soba deneyinin yapıldığı günlerdeki meteorolojik koşullar Çizelge 4.11'de, ölçüm sonuçları Çizelge 4.12'de, diyagramlardan okunan nem değerleri Çizelge 4.13'de, adsorpsiyonla belirlenen nem değerleri Çizelge 4.14'de, hesaplama yoluyla bulunan baca gazı debileri Çizelge 4.15'de, ısı verim değerleri ise Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 Soba deneyi örnek alma düzeneği ölçüm verileri

Deney Tarihi	15/11/90	17/11/90	22/11/90	22/11/90	22/11/90	22/11/90
Deney No	1	2	3	4	5	6
Zaman						
Baş.Saati	15 ⁰⁰	11 ⁴⁵	9 ⁰⁵	10 ¹⁰	11 ⁰⁰	12 ⁰⁴
Bit.Saati	16 ⁰⁰	12 ⁴⁵	10 ⁰⁰	11 ⁰⁰	12 ⁰⁰	13 ⁰⁰
Yakıt Miktarı (kg)						
Baş.Mik.	7.328	6.955	7.240	7.240	7.240	7.240
Bit.Mik.	1.690	1.100	1.980	1.980	1.980	1.980
Sıcaklık (°C)						
	25	17;23	22	22	22	22
Sayaç Okuma						
Baş.Değ.	4.1364	4.1388	4.1888	4.2196	4.2461	4.2760
Bit.Değ.	4.1388	4.1886	4.2196	4.2461	4.2760	4.3355
Filtre Kağıdı (gr)						
Baş.Ağ.	0.2599	0.2779	0.2715	0.2830	0.2664	0.2641
Bit.Ağ.	0.2544	0.2849	0.2753	0.2872	0.2678	0.2652
SO₂ çöz. (ml)^a						
Baş.	30.0	30.0	30.0	30.0	50.0	30.0
Bit.	30.0	30.0	28.0	28.0	48.0	28.0
Baş.pH	4.48	4.48	4.48	4.48	4.49	4.49
Bit.pH	2.19	0.59	0.83	1.05	1.39	1.04
Na ₂ CO ₃ sarf. (ml) ^{7.5}		-----	15.6	15.2	10.4	14.5
NO₂ çöz.(ml)						
Baş.	30.0	30.0	30.0	28.0	30.0	30.0
Bit.	30.0	30.0	28.0	28.0	30.0	30.0
Ref.Abs.	0.057	0.057	0.057	0.057	0.057	0.057
Örn.Abs.	0.223 ^b	0.067 ^b	0.626 ^b	0.185 ^b	0.739	0.204 ^b

a (0.1 N Na₂CO₃ çözeltisi kullanılmıştır)

b (1 ml numune+4 ml su) şeklinde okuma yapılmıştır.

Çizelge 4.6 (devam)

Deney Tarihi	24/11/90	24/11/90	24/11/90	30/11/90	30/11/90	30/11/90
Deney No	7	8	9	10	11	12
Zaman						
Baş.Saati	11 ³⁶	12 ³⁷	13 ³⁶	10 ³⁵	11 ³⁷	12 ³⁹
Bit.Saati	12 ³⁶	13 ³⁴	14 ³⁴	11 ³⁵	12 ³⁴	13 ³⁹
Yakıt Miktarı (kg)						
Baş.Mik.	7.180	7.180	7.180	6.440	6.440	6.440
Bit.Mik.	1.695	1.695	1.695	1.380	1.9380	1.9380
Sıcaklık (°C)						
	16.5;23	23	23;21.5	14;19	19;20	20;19
Sayaç Okuma						
Baş.Değ.	4.3351	4.3710	4.4050	4.4568	4.4820	4.5226
Bit.Değ.	4.3710	4.4050	4.4568	4.4820	4.5226	4.5800
Filtre Kağıdı (gr)						
Baş.Ağ.	0.2595	0.2547	0.2581	0.2651	0.2550	0.2764
Bit.Ağ.	0.2671	0.2574	0.2587	0.2755	0.2580	0.2771
SO₂ çöz. (ml)^a						
Baş.	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Bit.	28.0	28.0	30.0	30.0	30.0	28.0
Baş.pH	4.51	4.51	4.51	4.51	4.51	4.51
Bit.pH	0.99	0.98	0.97	1.25	0.90	2.65
Na ₂ CO ₃ sarf. (ml)	17.6	18.1	18.9	6.9	16.0	5.0
NO₂ çöz.(ml)						
Baş.	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Bit.	28.0	28.0	29.0	30.0	30.0	30.0
Ref.Abs.	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
Örn.Abs.	0.013	-0.029	0.224	0.600 ¹	0.150	0.052

Çizelge 4.6 (devam)

Deney Tarihi	30/11/90	21/12/90	21/12/90	21/12/90	26/12/90	26/12/90
Deney No	13	14	15	16	17	18
Zaman						
Baş.Saati	13 ³⁴	14 ³⁸	15 ⁴⁰	16 ⁴⁸	17 ³⁰	18 ³⁵
Bit.Saati	14 ³⁰	15 ³⁵	16 ⁴⁵	17 ¹⁵	18 ³⁰	19 ³⁰
Yakıt Miktarı (kg)						
Baş.Mik.	6.440	6.700	6.700	6.700	8.230	8.230
Bit.Mik.	1.380	1.855	1.855	1.855	2.050	2.050
Sıcaklık (°C)						
	19;18	12;17	17;17	17;17	12;17	17;18
Sayaç Okuma						
Baş.Değ.	4.5800	4.6430	4.6908	4.7590	4.7748	4.8336
Bit.Değ.	4.6430	4.6908	4.7590	4.7748	4.8336	4.8500
Filtre Kağıdı (gr)						
Baş.Ağ.	0.2746	0.2649	0.2559	0.2542	0.2487	0.2458
Bit.Ağ.	0.2751	0.2649	0.2559	0.2542	0.2494	0.2458
SO ₂ çöz. (ml) ^a						
Baş.	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Bit.	30.0	18.0	30.0	30.0	28.0	28.0
Baş.pH	4.51	4.53	4.53	4.53	4.47	4.47
Bit.pH	6.33	7.71	7.55	6.51	1.32	5.45
Na ₂ CO ₃ sarf. (ml)	-----	-----	-----	-----	4.0	-----
NO ₂ çöz.(ml)						
Baş.	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	
Bit.	30.0	30.0	30.0	30.0	18.0	
Ref.Abs.	0.045	0.008	0.008	0.008	0.008	
Örn.Abs.	0.042	0.450	0.061	0.026	0.149 ^b	

Çizelge 4.6 (devam)

Deney Tarihi	26/12/90
Deney No	19
Zaman	
Baş.Saati	13 ⁴²
Bit.Saati	14 ³⁷
Yakıt Miktarı (kg)	
Baş.Mik.	8.230
Bit.Mik.	2.050
Sıcaklık (°C)	18;17
Sayaç Okuma	
Baş.Değ.	4.8500
Bit.Değ.	4.8502
Filtre Kağıdı (gr)	
Baş.Ağ.	0.2681
Bit.Ağ.	0.2681
SO ₂ çöz. (ml) ^a	
Baş.	30.0
Bit.	30.0
Baş.pH	4.47
Bit.pH	6.14
Na ₂ CO ₃ sarf. (ml)	-----
NO ₂ çöz.(ml)	
Baş.	30.0
Bit.	30.0
Ref.Abs.	0.024
Örn.Abs.	0.030

Çizelge 4.7 Orsat analizi ölçüm verileri

Deney Tarihi	Yakıt Miktarı (kg)		Ölçüm Saati	Ölçüm Yeri	CO ₂ %	O ₂ %	CO %
	Baş.	Bit.					
15/11/90	7.328	1.690	16 ⁰⁰		4.0	4.8	0.7
17/11/90	6.955	1.100	11 ⁵⁰	3.manşon	6.2	12.0	0
17/11/90	6.955	1.100	12 ³⁰	3.manşon	6.0	11.9	0.1
17/11/90	6.955	1.100	13 ⁰⁰	3.manşon	5.9	13.5	0.4
22/11/90	7.240	1.980	9 ³⁰	3.manşon	6.4	12.6	0
22/11/90	7.240	1.980	11 ³⁰	3.manşon	3.0	16.0	1.0
24/11/90	7.180	1.695	11 ⁴⁵	3.manşon	8.0	9.4	0
24/11/90	7.180	1.695	12 ⁴⁰	3.manşon	6.8	12.4	0
24/11/90	7.180	1.695	13 ⁴⁵	3.manşon	4.4	16.8	0
30/11/90	6.440	1.380	11 ⁴⁰	3.manşon	6.8	11.8	0
21/12/90	6.700	1.855	14 ⁴⁵	3.manşon	10.8	7.2	0
21/12/90	6.700	1.855	16 ⁰⁵	3.manşon	3.0	14.4	0
26/12/90	8.230	2.050	11 ³⁵	1.manşon	5.6	13.8	0
26/12/90	8.230	2.050	12 ⁵⁰	1.manşon	4.4	16.2	0
26/12/90	8.230	2.050	13 ⁵⁰	1.manşon	3.0	15.6	0

Çizelge 4.8 Yaş-kuru termometre düzenekleri ile alınan ölçüm verileri

Deney tarihi	Deney no	Kuru termometre (°C)	Yaş termometre (°C)
15/11/1990	1	18; 20; 33; 40; 41; 38	16.5; 18; 31; 38; 35.5
17/11/1990	2	20; 63; 77; 109; 110; 107; 104; 100	17; 25; 45.5; 47.5; 48.5; 48; 46; 46.5
22/11/1990	3	17; 65; 79; 85.5; 76.5	15.5; 40; 48; 50; 49
22/11/1990	4	76.5; 78; 87.5; 77; 81	49; 47.5; 49.5; 49.5; 49
22/11/1990	5	81; 75; 72; 67; 64	49; 46.5; 40.5; 42.5; 41
22/11/1990	6	66.5; 59; 58; 58; 55	38.5; 39; 38.5; 38; 37
24/11/1990	7 ^c	18; 23; 40; 37	18; 18.5; 30.5; 34.5; 38.5
24/11/1990	8 ^c	40; 45; 43; 39	30; 30; 28.5; 27.5
24/11/1990	9 ^c	35; 32; 28; 26	27; 28.5; 27; 26
30/11/1990	10	36; 203; 161; 199; 178	17; 74; 95; 86.5; 95.5
30/11/1990	11	173; 179; 186; 181	84; 150; 153; 151.5
30/11/1990	12	171; 156; 139; 102	144.5; 133; 120; 70
30/11/1990	13	102; 99; 91; 85; 76.5	70; 73; 71; 67; 63
21/12/1990	14	118; 202; 166; 169; 169	18; 109; 126; 130; 136
21/12/1990	15	168; 167; 147; 150; 150	134; 131; 116.5; 113.5; 113
21/12/1990	16	147; 142; 139; 135	111.5; 130; 106; 104
26/12/1990	17	60; 262; 244; 214	18; 105; 128; 124
26/12/1990	18	166; 198; 185; 177; 170	127; 132.5; 131; 126.5; 125.5
26/12/1990	19	165; 153; 141; 129; 124	116; 111; 103; 93; 90.5

* Tüm termometre okumaları 15 'er dk. süreyle kaydedilmiştir.

^c Buradaki termometre okumaları cam düzenek ile yapılmıştır.

Çizelge 4.9 Soba deneyinde Bluma Gaco-SN Cihazı ile alınan ölçüm verileri

Deney Tarihi	Ölçüm Saati	T.G * (°C)	O ₂ * (%)	T.R.* (°C)	SO ₂ * (ppm)	CO* (ppm)	NO _x * (ppm)	CO ₂ * (%)	η (%)	λ	islielik
17/11/90	11 ⁵⁵	326; 469; 388	17.8; 18.9; 18.4	13; 14; 13.5	263; 326; 299	271; 311; 289	0; 817; 100	2.6; 2.9; 2.7	100	5.5; 6.8; 6.0	
22/11/90	11 ¹⁰	127; 272; 210	-	15; 17; 16	0; 1; 0.6	0; 1; 0.5	58; 87; 68	-	-	-	
22/11/90	12 ¹⁰	96; 165; 123	-	16	0	0	0	-	-	-	
24/11/90	11 ⁴⁰	175; 378; 251	-	14	0	0	0; 139; 95	-	-	-	
24/11/90	12 ⁴⁵	110; 449; 321	20.7; 20.9; 20.9	14	0; 2; 1	0; 320; 189	0; 93; 43	0; 0.2	-	-	
21/12/90	15 ⁰⁰	370; 498; 437	-	-	0; 1	0	0; 80; 38	-	-	-	
26/12/90	11 ⁵⁰	359; 524; 464	-	-	0	0-1	0; 882; 67; 114	-	-	-	

*Bu kolondaki değerlerden birincileri minimum, ikincileri maksimum, üçüncüleri ise alınan tüm verilerin ortalamasıdır.

Çizelge 4.10 Adsorpsiyon yöntemiyle alınan ölçüm verileri

Deney Tarihi	Sıcaklık Ölçüm süresi (°C)	Baş.	Bit.	Sayaç Baş.	Bit.	KESB Fark	KESD	Fark	USB	USD	Fark
21/12/90	12;17	1438	1710	1237.078	1239.2257	2.1477	45.1656	45.5103 0.3447			
21/12/90	12;17	1438	1710	571.800 575.5366	3.7366				23.7485 24.0684 0.3199		
26/12/90	12;17	1130	1230	575.5366	575.7070	0.1704	46.5069	54.7062 8.1993			
26/12/90	12;17	1235	1345	575.7070	575.8407	0.1337			25.1960 26.0432 0.8472		
26/12/90	12;17	1345	1445	575.8407	575.9734	0.1327			26.0432 26.3429 0.2997		
KESB	:küçük erlen+silikajel boş tartım										
KESD	:küçük erlen+silikajel dolu tartım										
USB	:U-tüpü+silikajel boş tartım										
USD	:U-tüpü+silikajel+dolu tartım										

Çizelge 4.11 Soba deneyinin yapıldığı günlerde meteorolojik veriler (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden alınmıştır)

Tarih	Saat	Basınç (mb)(ort)	Nem (%)	Sıcaklık (oC)	Rüzgar Hızı (m/s)	Rüzgar Yönü
15.11.90	07		90	0.6	0.0	C
	14	932.0	45	12.0	6.9	ESE
	21		79	3.0	3.9	ESE
17.11.90	07		91	2.2	2.2	E
	14	932.6	45	16.6	1.5	ESE
	21		86	4.8	0.0	C
22.11.90	07		91	-1.8	1.5	ESE
	14	933.0	55	17.0	6.3	E
	21		84	8.2	1.6	E
24.11.90	07		91	0.3	0.6	SW
	14	925.7	58	14.0	3.3	ESE
	21		90	4.4	1.2	ESE
30.11.90	07		89	8.1	8.8	E
	14	917.3	57	16.2	11.8	SSE
	21		75	12.3	6.0	SW
21.12.90	07		88	2.2	3.2	WSW
	14	927.7	70	5.0	5.3	NW
	21		86	1.5	6.3	WSW
26.12.90	07		90	-8.2	0.3	E
	14	932.9	56	1.4	6.0	SE
	21		88	-4.2	9.9	SE

Çizelge 4.12 Partikül, SO₂ ve NO₂ için emisyon derişimleri

Deney tarihi No	Deney (m ³ gaz)	V ₂	VO (Nm ³)	Partikül (µg/Nm ³)	SO ₂ (µg/Nm ³)	NO ₂ (µg/Nm ³)
15.11.1990	1	0.0024	0.00219	-2511415.5	1.09x10 ⁶	1.6x10 ⁴
17.11.1990	2	0.0498	0.0459	1.52x10 ⁵	-	48.58
22.11.1990	3	0.0308	0.0285	1.33x10 ⁵	1.75x10 ⁵	4.1x10 ³
22.11.1990	4	0.0265	0.0245	1.71x10 ⁵	1.98x10 ⁵	1.08x10 ³
22.11.1990	5	0.0299	0.0276	5.07x10 ⁴	1.2x10 ⁵	1.1x10 ³
22.11.1990	6	0.0595	0.0550	2x10 ⁴	8.4x10 ⁴	5.9607
24.11.1990	7	0.0359	0.0334	2.27x10 ⁵	1.6x10 ⁵	-
24.11.1990	8	0.0340	0.03136	8.6x10 ⁴	1.84x10 ⁵	-
24.11.1990	9	0.0518	0.04794	1.2x10 ⁴	1.26x10 ⁵	160.99
30.11.1990	10	0.0252	0.02376	4.4x10 ⁵	9.3x10 ⁴	5.2x10 ³
30.11.1990	11	0.0406	0.0379	7.9x10 ⁴	1.35x10 ⁵	123.57
30.11.1990	12	0.0574	0.0536	1.3x10 ⁴	2.98x10 ⁴	5.825
30.11.1990	13	0.0630	0.0590	8.4x10 ³	-	-
21.12.1990	14	0.0478	0.0454	0.0	-	43.25
21.12.1990	15	0.0682	0.0642	0.0	-	36.82
21.12.1990	16	0.0158	0.0148	0.0	-	54.124
26.12.1990	17	0.0588	0.0588	1.25x10 ⁴	2.3x10 ⁴	338.12
26.12.1990	18	0.0164	0.0154	0.0	-	102.72
26.12.1990	19	0.0002	0.000188	0.0	-	1.4x10 ³

Çizelge 4.13 Yaş-kuru hazne sistemi ile ölçülen nem değerleri

Deney Tarihi	Deney No	Kuru Ter.Sic. °C (°F)	Yaş Ter.Sic. °C (°F)	lb su buharı / lb kuru hava/ lbmol sb / lbmol kh	%RH
15.11.90	1	18 (64.4)	16.5 (61.7)	0.008	80
15.11.90	1	20 (68.0)	18 (64.4)	0.012	78
15.11.90	1	33 (91.4)	31 (87.8)	0.028	75
15.11.90	1	40 (104)	38(100.4)	0.042	89
15.11.90	1	41 (105.8)	38 (100.4)	0.0415	80
15.11.90	1	38 (100.4)	35.5 (95.9)	0.007	88
17.11.90	2	63 (145.4)	25 (77)	0.005	3.5
17.11.90	2	77 (170.6)	40.5 (104.9)	0.004	13
17.11.90	2	109 (228.2)	45.5 (113.9)	0.0039	4.5
17.11.90	2	110 (230)	47.5 (117.5)	0.00465	5
17.11.90	2	107 (224.6)	48.5 (119.3)	0.00515	5.8
17.11.90	2	104 (219.2)	48 (118.4)	0.0051	6.4
17.11.90	2	100 (212)	46.5 (115.7)	0.0047	7
22.11.90	3	17 (62.6)	15.5 (59.9)	0.011	88
22.11.90	3	65 (149)	40 (104)	0.038	23
22.11.90	3	79 (174.2)	48 (118.2)	0.0615	20
22.11.90	3	85.5 (185.9)	50 (122)	0.070	18
22.11.90	3	76.5 (170)	49 (120.2)	0.0685	24
22.11.90	4	76.5 (170)	49 (120.2)	0.0685	24
22.11.90	4	78 (172.4)	47.5 (117.5)	0.0595	21
22.11.90	4	87.5 (189.5)	49.5 (121.1)	0.068	15
22.11.90	4	77 (179.6)	49.5 (121.1)	0.0685	19
22.11.90	4	81 (177.8)	49 (120.2)	0.066	19
22.11.90	5	81 (177.8)	49 (120.2)	0.066	19
22.11.90	5	75 (167)	46.5 (115.7)	0.0585	23
22.11.90	5	72 (161.6)	40.5 (104.9)	0.0368	17
22.11.90	5	67 (152.6)	42.5 (108.5)	0.0442	25
22.11.90	5	64 (147.2)	41 (105.8)	0.042	27

Çizelge 4.13 (devam)

Deney Tarihi	Deney No	Kuru Ter.Sic. °C (°F)	Yaş Ter.Sic. °C (°F)	lb su buharı / lb kuru hava/ lbmol sb / lbmol kh	%RH
22.11.90	6	66.5 (151.7)	38.5 (101.3)	0.032	18
22.11.90	6	59 (138.2)	39 (102.2)	0.037	30
22.11.90	6	58 (136.4)	38.5 (101.3)	0.0358	30
22.11.90	6	58 (136.4)	38 (100.4)	0.034	27
22.11.90	6	55 (131)	37 (98.6)	0.030	31
24.11.90	7*	23 (73.4)	18.5 (65.3)	0.012	67
24.11.90	7*	40 (104)	30.5 (86.9)	0.024	52
24.11.90	7*	40 (104)	34.5 (94.1)	0.033	68
24.11.90	8*	40 (104)	30 (86)	0.0238	49
24.11.90	8*	45 (113)	30 (86)	0.021	36
24.11.90	8*	43 (109.4)	28.5 (83.3)	0.0185	32
24.11.90	8*	39 (102.2)	27.5 (81.5)	0.0192	45
24.11.90	9*	35 (95)	27 (80.6)	0.019	52
24.11.90	9*	32 (89.6)	28.5 (83.3)	0.023	75
24.11.90	9*	28 (82.4)	27 (80.6)	0.022	90
24.11.90	9*	26 (78.8)	26 (78.8)	0.0228	100
30.11.90	10	203 (397.4)	74 (62.6)	0.54	
30.11.90	10	161 (321.8)	95 (203)	0.585	
30.11.90	10	199 (390.2)	86.5 (187.7)	0.55	
30.11.90	10	178 (352.4)	95.5 (203.9)	0.57	
30.11.90	11	173 (343.4)	84 (183.2)	0.575	
30.11.90	11	179 (354.2)	150 (302)	0.565	
30.11.90	11	186 (366.8)	153 (307.4)	0.555	
30.11.90	11	181 (357.8)	151.5 (304.7)	0.560	
30.11.90	12	171 (339.8)	144.5 (292.1)	0.575	
30.11.90	12	156 (312.8)	133 (271.4)	0.59	
30.11.90	12	139 (282.2)	120 (248)	0.492	
30.11.90	12	102 (215.6)	70 (158)	0.37	

Çizelge 4.13 (devam)

Deney Tarihi	Deney No	Kuru Ter.Sıc. °C (°F)	Yaş Ter.Sıc. °C (°F)	lb su buharı / lb kuru hava/ lbmol sb / lbmol kh	% RH
30.11.90	13	102 (215.6)	70 (158)	0.37	
30.11.90	13	98 (208.4)	73 (163.4)	0.535	
30.11.90	13	91 (195.8)	71 (159.8)	0.54	
30.11.90	13	85 (215.6)	67 (152.6)	0.46	
30.11.90	13	76.5 (169.7)	63 (145.4)	0.565	
21.12.90	14	118 (244.4)	18 (64.4)	0.515	
21.12.90	14	202 (395.6)	109 (228.2)	0.542	
21.12.90	14	166 (330.8)	126 (258.8)	0.58	
21.12.90	14	169 (336.2)	130 (266)	0.582	
21.12.90	14	169 (336.2)	130 (266)	0.582	
21.12.90	15	168 (334.4)	134 (273.2)	0.58	
21.12.90	15	167 (332.6)	131 (267.8)	0.58	
21.12.90	15	117 (242.6)	1116.5 (241.7)	0.52	
21.12.90	15	150 (302)	113.5 (236.3)	0.60	
21.12.90	15	150 (302)	113 (235.4)	0.60	
21.12.90	16	147 (296.6)	111.5 (232.7)	0.60	
21.12.90	16	142 (287.6)	130 (266)	0.498	
21.12.90	16	139 (282.2)	106 (222.8)	0.496	
21.12.90	16	135 (275)	104 (219.2)	0.499	
26.12.90	17	60 (140)	18 (64.4)	0.245	
26.12.90	17	262 (503.6)	105 (221)	0.482	
26.12.90	17	244 (471.2)	128 (262.4)	0.490	
26.12.90	17	60 (140)	18 (64.4)	0.245	
26.12.90	17	214 (417.2)	124 (255.2)	0.535	
26.12.90	18	166 (330.8)	127 (260.6)	0.58	
26.12.90	18	198 (388.4)	132.5 (270.5)	0.545	
26.12.90	18	185 (365)	131 (267.8)	0.56	
26.12.90	18	177 (350.6)	126.5 (259.7)	0.57	
26.12.90	18	170 (338)	125.5 (257.9)	0.579	

Çizelge 4.13 (devam)

Deney Tarihi	Deney No	Kuru Ter.Sıc. °C (°F)	Yaş Ter.Sıc. °C (°F)	lb su buharı / lb kuru hava/ lbmol sb / lbmol kh	% RH
26.12.90	19	165 (329)	116 (240.8)	0.58	
26.12.90	19	153 (307.4)	111 (231.8)	0.595	
26.12.90	19	141 (285.8)	103 (217.4)	0.492	
26.12.90	19	129 (264.2)	93 (199.4)	0.505	
26.12.90	19	124 (255.2)	90.5 (194.9)	0.515	

* Bu okumalar cam düzenek ile yapılmıştır.
Tüm nem okumaları Şekil Ek.2.1 ve Ek 2.3'den yapılmıştır.

Çizelge 4.14 Adsorpsiyon yöntemi ile belirlenen nem değerleri

Deney tarihi	Deney no	DGH (Nm ³)	g.H ₂ O / g.gaz
21.12.90	1*	2.0218	0.17
21.12.90	2*	3.5175	0.09
26.12.90	3**	0.1618	50.674
26.12.90	4**	0.1256	6.745
26.12.90	5**	0.1247	2.403

* 1 nolu ölçümde pelliit formundaki silikajel, 2 nolu ölçümde ise indikatör şeklinde olan silikajel kullanılmış ve erlen / U-tüpü öncesi emniyet kabı konulmadığı için oldukça fazla miktarda is birikimi olmuştur.

** Bu ölçümlerde silikajel kabı yaş-kuru termometrelerden sonra, emniyet kabını takiben, soğuk su banyosu içinde muhafaza edilmiştir.

Çizelge 4.15 Hesaplama yoluyla bulunan baca gazı debileri

Deney Tarihi	Deney no	ΔP_{top}	ΔP_{kin}	W (lb / hr)	Q (m ³ /hr)	V (m / s)
15.11.90	1	0.0996	4.98x10 ⁻⁴	28.74	19.36	0.404
17.11.90	2	0.1042	5.21x10 ⁻⁴	29.29	19.76	0.413
22.11.90	3	0.1024	5.12x10 ⁻⁴	29.14	19.60	0.409
22.11.90	4	0.1024	5.12x10 ⁻⁴	29.14	19.60	0.409
22.11.90	5	0.1024	5.12x10 ⁻⁴	29.14	19.60	0.409
22.11.90	6	0.1024	5.12x10 ⁻⁴	29.14	19.60	0.409
24.11.90	7	0.1035	5.17x10 ⁻⁴	29.28	19.84	0.414
24.11.90	8	0.1007	5.03x10 ⁻⁴	28.88	19.57	0.408
24.11.90	9	0.1016	5.08x10 ⁻⁴	29.03	19.67	0.411
30.11.90	10	0.1058	5.29x10 ⁻⁴	29.62	20.25	0.423
30.11.90	11	0.1030	5.15x10 ⁻⁴	29.23	19.98	0.417
30.11.90	12	0.1030	5.15x10 ⁻⁴	29.23	19.98	0.417
30.11.90	13	0.1039	5.19x10 ⁻⁴	29.34	20.06	0.419
21.12.90	14	0.1089	5.44x10 ⁻⁴	29.93	20.25	0.4229
21.12.90	15	0.1065	5.33x10 ⁻⁴	29.73	20.11	0.420
21.12.90	16	0.1065	5.33x10 ⁻⁴	29.73	20.11	0.420
26.12.90	17	0.1095	5.47x10 ⁻⁴	30.12	20.26	0.423
26.12.90	18	0.1066	5.33x10 ⁻⁴	29.73	19.99	0.417
26.12.90	19	0.1065	5.33x10 ⁻⁴	29.73	19.99	0.417

Çizelge 4.16 Hesaplama yoluyla bulunan ısı verim değerleri

Deney Tarihi	QA	QB	QFr	ΣQK	Qh	QK	Qy	η_t
15.11.90 ¹	1346.02	490.32	1037.7	2874.04	2840.77	21060.96	38105.6	44.73
17.11.90 ²	1143.07	114.57	668.57	1926.21	7589.74	13396.8	36166	62.96
22.11.90 ³	1298.64	331.4	536.06	2166.1	5491.36	15682.56	37648	58.34
24.11.90 ⁴	1114.78	0	600.07	17148.85	8341.12	12312.62	37336	67.02
30.11.90 ⁵	1158.87	0	132.86	1291.73	8389.75	8318.74	33488	75.16
21.12.90 ⁶	1144.15	0	190.88	1335.03	8631.76	8944.7	34840	74.33
26.12.90 ⁷	1810.97	0	155.44	1966.41	4435.4	16183.55	42796	62.18

*Tüm hesaplamalarda baca gazı hacmi için Çizelge 4.15'deki hacimsel debi değerleri kullanılmıştır.

Baca gazı sıcaklığı tüm hesaplamalarda 200°C olarak alınmıştır.

- 1 Sobanın 6 hr yandığı varsayılmıştır.
- 2 Sobanın 3 hr yandığı varsayılmıştır.
Orsat analizi sonuçları Çizelge 4.7'den ortalama değer şeklinde alınmıştır.
- 3 Sobanın 4 hr yandığı varsayılmıştır.
Orsat analizi sonuçları Çizelge 4.7'den ortalama değer şeklinde alınmıştır.
- 4 Sobanın 3 hr yandığı varsayılmıştır.
Orsat analizi sonuçları Çizelge 4.7'den ortalama değer şeklinde alınmıştır.
- 5 Sobanın 3 hr yandığı varsayılmıştır.
- 6 Sobanın 3 hr yandığı varsayılmıştır.
Orsat analizi sonuçları Çizelge 4.7'den ortalama değer şeklinde alınmıştır.
- 7 Sobanın 6 hr yandığı varsayılmıştır.
Orsat analizi sonuçları Çizelge 4.7'den ortalama değer şeklinde alınmıştır.

5.SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Emisyon ve imisyon ortamlarında bulunan hava kirletici bileşenlerin derişimlerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesinde debi ve nem parametrelerinin doğru değerlerinin bilinmesi, ilgili prosesin etkin kontrolü ve uygun tasarım işlemleri açısından özel önem taşır.

Bu çalışmada, anılan iki parametrenin fiziksel temel işlemler ve kimyasal proseslerle ilişkileri kuramsal ve uygulama yönleriyle ele alınmış, dayandıkları teorik kavramlar (akışkanlar mekaniği, ısı ve kütle aktarımı, stokiyometri ve termodinamik prensipleri), ölçüm yöntemleri, gaz örnekleme / analiz süreçlerindeki önemi ve yasalarla bağlantıları kapsamlı bir literatür taramasına dayanılarak incelenmiştir.

Çalışmanın deneysel bölümünde, bir yakma sisteminden (soba) kaynaklanan hava kirletici gaz bileşenlerin (SO_2 , NO_2 , CO , CO_2) ve partiküllerin derişimleri ölçülmüş; kullanılan yakıtta, yakıt / hava oranına ve sisteme yüklenen yakıtın yanma süresine bağlı olarak yanma verimleri, hava fazlalık katsayıları, yanma sıcaklıkları ve ısılık durumları belirlenmiş; yağ / kuru termometre sıcaklıklarına ve adsorpsiyon prensiplerine dayanılarak nemlilik oranları, eğik manometre eşliğinde pitot tüpü ile de baca gazlarının akış hızları tespit edilmiş; deneysel bulgular, ilgili yakma prosesi için yapılan stokiyometrik ve termodinamik hesaplama sonuçları karşılaştırılarak yasalar eşliğinde irdelenmiş, kuramsal ve deneysel bulguların uyumlu olduğu görülmüştür.

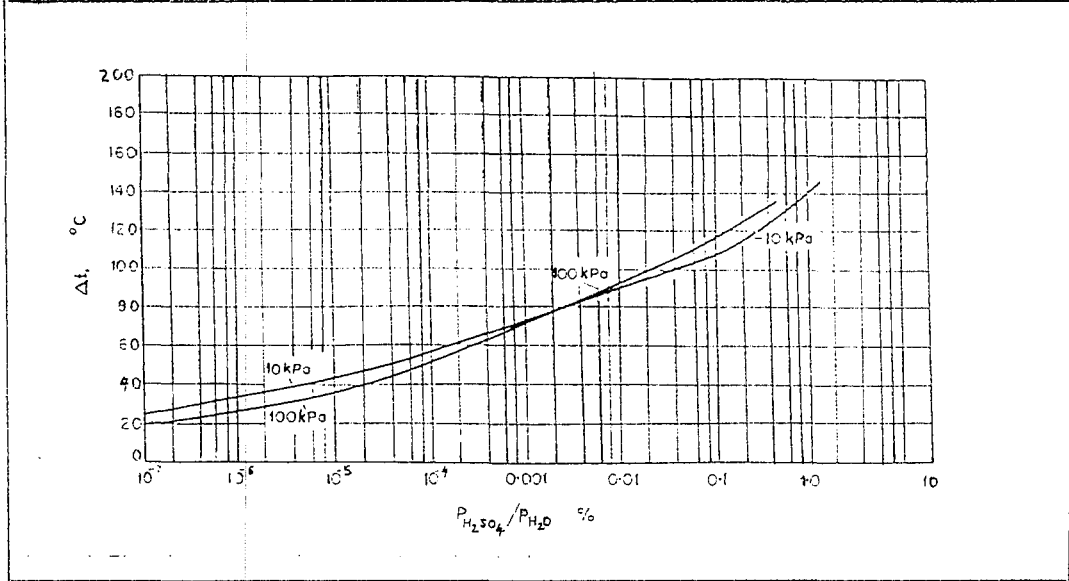
Endüstriyel deneyimlere de dayanan bu araştırmanın sonucunda

- a) debi ve nem değerlerinin ölçülmediği proseslerde, özellikle sıkıştırılabilen karaktere sahip akış koşullarında, hava kirletici bileşenlerin kontrolü ve değerlendirilmelerinin sağlıklı olamayacağı ve ilgili yasaların etkin tarzda uygulanamayacağı;
- b) ancak yakma prosesleri gibi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen işlemlerde debi ve nemin ölçümü için kullanılacak pek fazla alternatifin var olmadığı;
- c) Ülkemizde bu iki parametrenin yasal teknolojik değerlendirmelerde fazla önemsenmediği, çoğunlukla ölçülmediği ve teorik hesaplamalarla yetinildiği;
- d) debinin ve nemin ölçülmesiyle çevre kalitesinin korunmasına yapılan katkının, proses verimliliği ve ekonomisini de önemli ölçüde etkileyebileceği;

- e) ölçüm ve örneklemelede homojenliğin sağlanması önemli bir mühendislik sorunu olduğu ve
- f) bu yüksek lisans tezinin literatür tarama safhasında kapsanan diğer ölçüm yöntemlerinin de aynı deney düzeneğinde denenmesinin mümkün ve uygun olacağı kanısına varılmıştır.

' Ek Açıklamalar-A'

Kükürt Trioksit Nedeniyle Çiğ Noktasındaki Yükselme



Şekil A.1 Kükürt trioksit nedeniyle çığ noktasındaki yükselme (Sıcaklık yükselmesi ve $P_{H_2SO_4}/P_{H_2O}$ kısmi basınç oranı arasındaki korelasyon (Strauss, 1975).

Şekilde 10 ve 100 kPa basınçlar için sülfürik asit derişimine bağılı çığ noktası yükselmesi değerleri gösterilmiştir. Hava ve saf su buharının çığ noktası standart tablolardan bulunabilir ve karışımın çığ noktası bu değerlere ilave edilir. Örneğin % 10 subuharı ve hacimce % 0.01 SO_3 içeren bir baca gazı için,

$$\frac{P_{H_2SO_4}}{P_{H_2O}} = \frac{0.01}{10} \times 100 = \% 0.1 \quad (A.1)$$

oranı hesaplanabilir. Şekil A.1'den, bu oran için verilen çığ noktası yükselmesi 105 °C'dir. Suyun kısmi basıncının 10 kPa olduğu durum için çığ noktası 45 °C olduğundan gerçek çığ noktası sıcaklığı 150 °C olarak bulunur.

' Ek Açıklamalar-B '

Nemle İlgili Bazı Tanımlar

* Nem (Humidity, Moisture) : 1 kg. kuru havanın taşıdığı su miktarı (Y_A, W).

$$Y_A = W = \frac{M_A \bar{P}_A}{M_B (1 - \bar{P}_A)}$$

* Molar Nem : Bir mol kuru hava ile taşınan mol su miktarı (Y_A, H).

$$H = Y_A = \frac{18}{29} \tilde{Y}_A$$

* Doygun Hava : Belirli bir basınç ve sıcaklıkta mümkün olan maksimum miktarda subuharını taşıyan hava. Bu durum, havanın sıvı su ile dengede olduğu koşullarda gerçekleşir.

* Doygunluk Nemi : Belirli bir sıcaklıkta suyun buhar basıncına (P_A) eşit kısmi basınçtaki (P_A) havanın nemi (H, Y_{AS}).

* Bağlı Nem (Relative Humidity) : Belli bir sıcaklıkta gazın içindeki sıvı buharının kısmi basıncının, aynı sıcaklıktaki sıvının buhar basıncına oranı (RH, H_R).

$$H_R = RH = \frac{\bar{P}_A}{P_A} \times 100$$

* Yüzde Nem : Mol olarak buharın yoğunlaşma miktarının, yine mol olarak doygun buharın yoğunlaşma miktarına oranı ($\% RH, H_A$).

$$\% RH = \frac{H}{H_S}$$

* Nem Isısı (Humid Heat) : 1 lb kuru havayla taşınan nemli havanın sıcaklığının 1 °F yükselmesi için gereken ısı miktarı (C_{ph}).

$$C_{ph} = C_{pB} + Y_A C_{pA} \quad \left(\frac{\text{Btu}}{\text{lb kuru hava } F} \right)$$

$$= 0.24 + 0.46 Y_A$$

* Nemli Havanın Spesifik Hacmi : 1 lb kuru havayla taşınan nemli havanın kapladığı hacim.

$$V_H = V_B + Y_A V_A \quad \left(\frac{\text{ft}^3}{\text{lb kuru hava}} \right)$$

'Ek Açıklamalar-C'

Soba Deneyleri İle İlgili Hesaplamalar

Ek-C.1 Doğal Çekişli Bacalarda Baca Gazı Debisi Hesabı

Burada 21.12.1990 günü alınan deney verileriyle örnek bir hesaplama yapılmıştır (Perry and Green, 1984).

$$\Delta P_{top} = 0.256 H.P \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (\text{Ek-C.1})$$

Sobanın dirsek çıkışından itibaren bacanın çıkış noktasına kadar olan yükseklik,
H=6.38 m.=20.932 ft.

Çizelge 4.11'den 21.12.1990 günü barometrik basınç değeri,

P=927.7 mbar.=26.87 inHg

Deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı,

T= 15 °C=519 °R

Baca ağzı civarındaki ortalama sıcaklık,

T₁ (150-250 °C arasında değişmektedir) = 200 °C=852 °R

Tüm veriler yerine konulduğunda,

$$\Delta P_{top} = 0.108 \text{ inH}_2\text{O}$$

Doğal çekişli bacalardaki gaz akışlarında kinetik enerji değişimi, toplam enerji değişiminin % 1'i ile %0.1'i arasında değişir.

$$\Delta P_{kin} = 0.005 (\Delta P_{top}) \quad (\text{Ek-C.2})$$

$$\Delta P_{kin} = 5.4 \times 10^{-4} \text{ inH}_2\text{O}$$

Baca gazı kütleli debisi (lb / hr);

D_i=13 cm.=0.426 ft; f (sürtünme faktörü):0.03 olarak alındığında,

$$W = \left[\frac{\Delta P_{kin}}{0.0942} \left(\frac{D_i^4}{T_1} \right) \left(\frac{10^{10}}{1 + \frac{f.H}{D_i}} \right)^{1/2} \right] \quad (\text{Ek-C.3})$$

$$W = 29.93 \text{ lb / hr}$$

Baca gazı lineer hızı (m / s); ρ= 0.671 kg / m³; A=0.0133 m²; v=0.4229 m / s

$$v = W (0.454) \left(\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{1}{3600} \right) \left(\frac{1}{A} \right) \quad (\text{Ek-C.4})$$

Pitot tüpüyle okunan basınç farkı değeri : 0.15 mbar.

$$\Delta P_{kin} = 0.00434 \text{ inHg}; W = 84.84 \text{ lb / hr}; v = 1.296 \text{ m / s}$$

Ek-C.2 Isıl Verim Hesabı

Sobanın ısıl verimi TS 4900 / Mayıs 1986, UDK 621.181.327 no'lu "Sobalar (Katı Yakıt Yakan)" isimli standarda göre hesaplanmıştır.

Ek-C.2.1 Baca gazları duyulur ısı kaybı (Q_A) hesabı

$$Q_A = [C_{pm} \frac{C - C_r}{0.536(CO_2 + CO)} + C_p \frac{9H + H_2O}{100}] a \cdot t_1 \quad (\text{Ek-C.5})$$

$$C_r = \frac{b \cdot R}{100} \quad (\text{Ek-C.6})$$

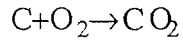
Burada 15.11.1990 günü alınan deney verileri ile örnek hesaplama yapılmıştır;

Çizelge 4.6'dan, Baş yakıt miktarı : 7.328 kg.; Bit.yakıt miktarı : 1.690 kg.

Çizelge 4.7'den, Orsat analizi sonuçları % 4.0 CO₂, % 4.8 O₂, % 0.7 CO

Bu verilere göre ağırlık cinsinden küldeki karbon oranını bulmak üzere,

$$\frac{71.4 \text{ kg.C}}{100 \text{ kg.kömür}} \times 7.328 \text{ kg.kömür} = 5.232 \text{ kg.C}$$



$$\frac{22.4 \text{ m}^3 CO_2}{12 \text{ kg.C}} \times 5.232 \text{ kg.C}$$

$$Q = 20.25 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times 6 \text{ hr} = 121.5 \text{ m}^3 \text{ baca gazı}$$

Çizelge 4.7'den Orsat analizi sonuçları % 4.0 CO₂, % 4.8 O₂ ve % 0.7 CO

$$121.5 \text{ m}^3 \text{ baca gazı} (0.04) = 4.86 \text{ m}^3 CO_2$$

$$9.76 - 4.86 = 4.9 \text{ m}^3 CO_2 \text{ baca gazıyla çıkmayan miktar}$$

Küldeki CO₂ miktarını bulmak için,

$$\frac{44 \text{ kg. CO}_2}{22.4 \text{ m}^3} \times 4.9 \text{ m}^3 CO_2 = 9.625 \text{ kg. CO}_2$$

$$\frac{12 \text{ kg.C}}{44 \text{ kg.CO}_2} \times 9.625 \text{ kg.CO}_2 = 2.625 \text{ kg.C}$$

Uçucu bileşenin C₂H₆ 'dan meydana geldiği ve bu oranın % 40 olduğu varsayımı ile,

$$7.328 \text{ kg.kömür} (0.40) = 2.93 \text{ kg. C}_2\text{H}_6$$

5.232 kg.C (0.40) = 2.093 kg. C (uçucu bileşenle ayrılan)

$$\text{C}_2\text{H}_6 \text{ (30 kg / kgmol)} \\ \frac{30 \text{ kg. uçucu bileşen}}{24 \text{ kg. C}} \times 2.093 \text{ kg. C}$$

Küldeki C miktarı : 2.625 - 1.6744 = 0.9506 kg.C

Kül miktarı : 1.690 kg.

Ağırlık cinsinden küldeki C oranı,

$$b = \frac{0.9506}{1.690} \times 100 = \% 56.25$$

Ağırlık cinsinden kül miktarının yüklenen yakıt miktarına oranı,

$$R = \frac{1.690}{7.328} \times 100 = \% 23.06$$

Tüm veriler Denk.Ek-C.5'de yerine konulduğunda, baca gazı duyulur ısı kaybı,

Baca gazı sıcaklığı (t_a) = 200 °C

Ortam sıcaklığı (t_1) = 25 °C

Su buharı özgül ısısı $C_p = 0.46$ (kcal / kg °C)

Şekil Ek-C.1'den, 200 °C için $C_{pm} = 0.3175$ kcal / Nm³ °C

Çizelge 4.4 (b)'den, Tunçbilek kömürü için, nem % 10, C % 71.4, H % 6.8

Denk Ek 3.6 'da gerekli veriler yerine konulduğunda, $C_r = 12.97$

Denk Ek-C.5'den $Q_A = 1346.02$ kcal / kg

Ek-C.2.2 Baca gazlarındaki eksik yanma kaybı (Q_B) hesabı

Baca gazları ile birlikte yanmamış durumda dışarıya atılan (CO+H₂) oranına bağlı olarak eksik yanma kaybı,

$$Q_B = 3020 (\text{CO}+\text{H}_2) \frac{C-C_r}{0.536 (\text{CO}_2+\text{CO}) 100} \quad (\text{Ek-C.7})$$

gerekli değerler yerine konulduğunda,

$$Q_B = 490.32 \text{ kcal / kg}$$

Ek-C.2.3 Kül ve diğer artıklarda yanmamış yakıt kaybı (Q_{Fr}) hesabı

$$Q_{Fr} = \frac{b.R.80}{100} \quad (\text{Ek-C.8})$$

$$Q_{Fr} = 1037.7 \text{ kcal / kg}$$

Ek-C.2.4 Toplam ısı kaybı

$$\Sigma Q_K = Q_A + Q_B + Q_{Fr} \quad (\text{Ek-C.9})$$

$$\Sigma Q_K = 2874.04 \text{ kcal / kg}$$

Ek-C.2.5 Anma ısı gücü (Q_h)

$$Q_h = \frac{(H_u - \Sigma Q_K) G_y}{\text{deney süresi}} \quad (\text{Ek-C.10})$$

Çizelge 4.4 (b)'den yakıtın alt ısı değeri 5200 kcal / kg

Sobaya yüklenen yakıt miktarı 7.328 kg.

Sonuçta

$$Q_h = 2840.77 \text{ kcal / kg}$$

Ek-C.2.6 Isıl verim (η)

$$Q_K = (Q_A + Q_B + Q_{Fr}) G_y \quad (\text{Ek-C.11})$$

$$Q_K = 21060.96 \text{ kcal / deney süresi}$$

Deney süresince sobaya verilen ısı,

$$Q_y = G_y H_u \quad (\text{Ek-C.12})$$

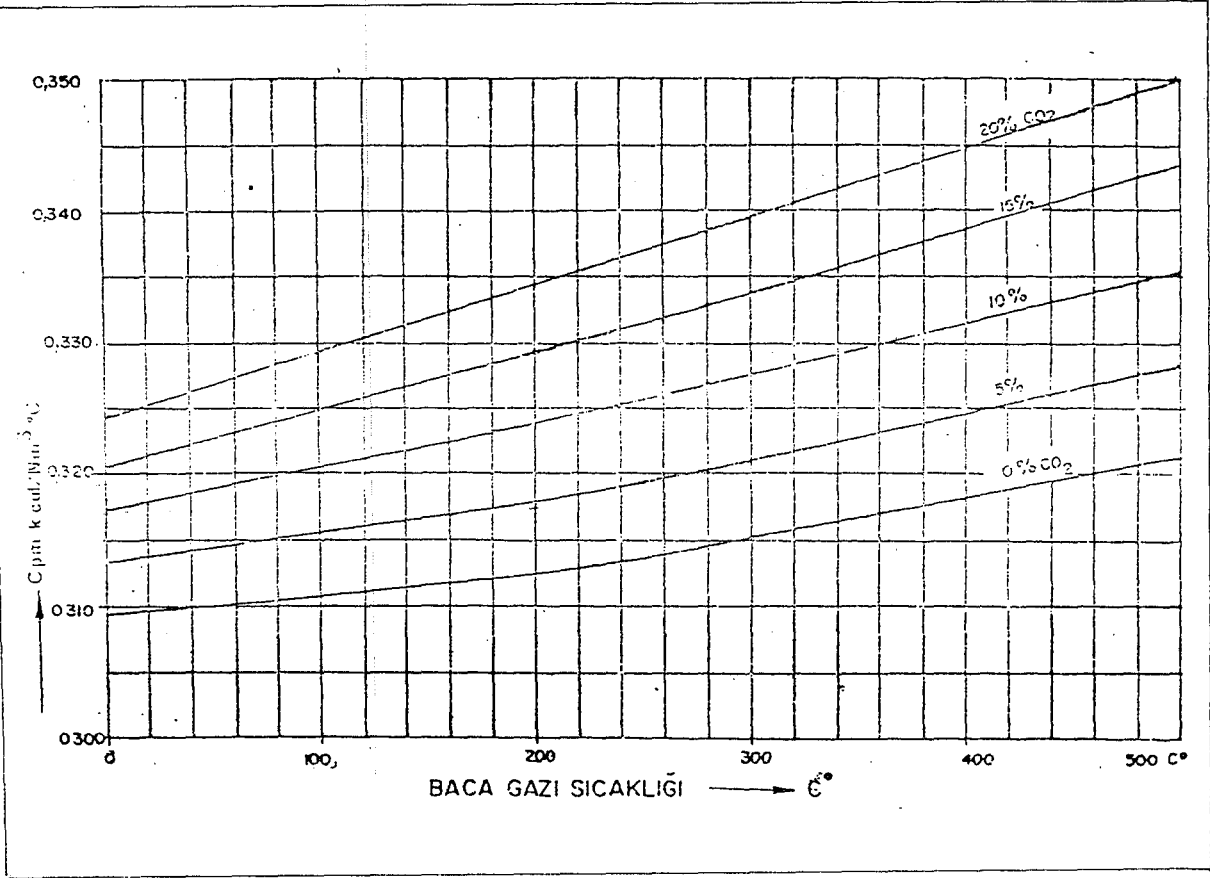
$$Q_y = 38105.6 \text{ kcal / deney süresi}$$

Isıl verim,

$$\eta_t = \frac{Q_y - Q_K}{Q_y} \times 100 \quad (\text{Ek-C.13})$$

Sonuç olarak ısı verim,

$$\eta_t = \% 44.73$$



Şekil Ek-C.1 Kuru baca gazının (normal koşullarda) ortalama özgül ısısı (kcal / Nm³ °C).

Ek-C.3 Hava / yakıt Oranı Hesabı

Çizelge 4.7'deki Orsat analizi verilerine göre,

Deney no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----

λ	1.29	2.33	2.31	2.8	2.5	4.2	1.81	2.4	45.0	2.2	1.5	23.18	2.91	4.37	3.9
-----------	------	------	------	-----	-----	-----	------	-----	------	-----	-----	-------	------	------	-----

$$\lambda = \frac{21}{21\text{-ölçülen } O_2 \text{ değeri}} \quad (\text{Ek-C.14})$$

Bu formüle göre hesaplanan min.değer: 1.296; max.değer: 5.000; ort.değer:2.857

Ek-C.4 Baca Gazındaki Su Buharı Hacmi Hesabı

21.12.1990 günü alınan deney verileriyle yapılan örnek hesaplama;
Çizelge 4.7'den, Orsat analizi sonuçlarına göre,

	mol	mol C	mol O ₂
CO ₂	10.8	10.8	10.8
CO	0.0	0.0	0.0
O ₂	7.2		7.2
N ₂	82.0		
Toplam	100.0	10.8	18.0

Temel : 100 mol kuru baca gazı (Standart koşullarda (0 °C ve 1 atm basınçta))

Havayla giren oksijen miktarı : 82 mol N₂(20.9 mol O₂/79.1 mol N₂)= 21.66 mol O₂

Çıkan oksijen miktarı : 21.66-18.0= 3.66 mol O₂ (çıkan)

Net H₂ veya su buharı miktarı ; (3.66)(7.2)= 26.352 mol

Hidrojen-karbon oranı,

H / C= 26.352 / 10.8= 2.44

Yanma için verilen fazla hava miktarı, (100)(7.2 / 21.66-7.2)= % 49.8

Baca gazındaki HC miktarları,

C : (10.8) (12)= 129.6 lb

H₂ : (26.352)(2.02)= 53.23 lb

Toplam : 182.83 lb (C+H)

Her lb yakıt için hava miktarı,

Giren hava : ((82x100) / 79.1) / 182.83= 0.567 mol

(0.567)(29)= 16.44 lb hava / lb yakıt

Giren hava (ortam) sıcaklığı : 20 °C= 68 °F

Giren hava basıncı : 682.5 mmHg 'da (Çizelge 4.11'den)

$$\frac{(0.567)(359)(460+68)(760)}{(492)(682.5)} = 243.25 \text{ ft}^3 \text{ hava / lb yakıt}$$

Kuru baca gazının hacmi (200 °C= 392 °F, 682.5 mmHg)

$$\frac{(100)(359)(460+392)(760)}{(182.83)(492)(682.5)} = 378.64 \text{ ft}^3 \text{ /lb yakıt}$$

Yakılan yakıt miktarına göre baca gazındaki su buharı hacmi,

$$\frac{(26.352)(359)(460+392)(760)}{(182.83)(492)(682.5)} = 99.78 \text{ ft}^3/\text{lb yakıt}$$

Çizelge Ek-C.1'den, 68 °F 'da $P_w = 17.5 \text{ mmHg}$

Çizelge 4.11'den, havanın bağıl nemi % 70

Hava içindeki suyun kısmi basıncı = $(17.5 \text{ mmHg})(0.70) = 12.25 \text{ mmHg}$.

$$\frac{(0.567)(12.25)}{682.5-12.25} = 0.01 \frac{\text{mol su buharı havayla giren}}{\text{lb yakıt}}$$

Çizelge Ek-C.1 Suyun buhar basıncı değerleri (Griswold, 1946)

Suyun buhar basıncı, 30 - 219 °F										
t°F	mm Hg									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.1
40	6.3	6.5	6.8	7.1	7.3	7.6	7.9	8.2	8.5	8.9
50	9.2	9.6	9.9	10.3	10.7	11.1	11.5	11.9	12.3	12.8
60	13.2	13.7	14.2	14.7	15.3	15.8	16.4	16.9	17.5	18.2
70	18.8	19.5	20.1	20.8	21.5	22.3	23.0	23.7	24.5	25.3
80	26.2	27.1	28.0	28.9	29.9	30.8	31.8	32.9	33.9	35.1
90	36.1	37.3	38.4	39.6	40.9	42.2	43.5	44.8	46.2	47.6
100	49.1	50.6	52.1	53.7	55.3	56.9	58.6	60.3	62.2	64.0
110	65.9	67.8	69.8	71.8	73.9	76.0	78.2	80.4	82.7	85.0
120	87.5	90.0	92.5	95.1	97.7	100	103	106	109	112
130	115	118	121	124	128	131	135	138	142	145
140	149	153	157	161	165	170	174	178	183	188
150	192	197	202	207	212	218	223	228	234	239
160	245	251	257	263	269	276	282	289	296	303
170	310	317	324	332	339	347	355	363	371	380
180	388	397	406	415	424	433	443	453	463	473
190	483	494	504	515	526	537	548	560	572	584
200	596	608	621	634	647	660	674	688	702	716
210	730	745	760	775	791	806	822	838	855	872

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Anderson, J., 1982, Modern compressible fluids, McGraw-Hill, USA, 466p.
- Annual book of ASTM Standards, 1985, Gaseous fuels and coke; atmosferic analysis part 26, 936p.
- Arı, M. ve Kul, İ., 1988, Bazı halojenli inorganik ve organik maddelerin hava kalitesine etkileri ve tayin yöntemleri, Bitirme Ödevi, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 71s (Yayınlanmamış).
- Atamer, B., Mart 1989, Laser velosimetresi, Bilim ve Teknik, 22(256), ss 24-25.
- Balzshiser, R.E., Chemical engineering thermodynamics, Prentice-Hall, New Jersey, 1972, pp.299.
- Bennett, C.O. and Myers, J.E., 1974, Momentum, heat and mass transfer, McGraw-Hill, USA, 810P.
- Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N., 1960, Transport phenomena, John Wiley and sons, Singapur, 780p.
- Best Practible Means (BPM), 1988, Best practible means: general princisles and practice, Printed and published by the Department of Environment 1988, Middlesex.
- Brenchley, D.L., Turley, C.D. and Yarmac, R.F., 1973, Industrial source sampling, Ann Arbor Science, Ann Arbor.
- Cheremisnoff, P.N. and Morresi, A.C., 1983, Air pollution sampling and analysis deskbook, Ann Arbor Science, Michigan, 489p.
- Considine, D., 1985, Process instruments and control handbook, Third edition, McGraw-Hill, USA, section 10.
- Çakallı, A.(çeviren), Dünyayı değiştirecek 3 derece, 1988, Bilim ve Teknik, sayı 244, ss. 30-33.
- Çataltaş, İ., 1972, Kimya mühendisliğine giriş I, İnkılap ve Aka Basımevi, İstanbul, ss. 422-483.
- Çataltaş, İ., 1982, Sınai stokiometri, İkinci baskı, İnkılap ve Aka Kitabevleri, Ankara, ss. 209-212.
- Danckwerts, F.R.S., 1970, Gas-liquid reactions, McGraw-Hill, USA, 86p.
- Dorman, R.G., 1974, Dust control and air cleaning, Pergamon Press, Germany, 615p.
- Doebelin, E.O., 1983, Measurement systems, Third edition, McGraw-Hill, Singapur, 876p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Döğeroğlu, T., 1988, Azot oksitlerinin hava kalitesine etkileri, uzaklaştırılma ve değerlendirilebilme seçenekleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 212s (Yayımlanmamış).
- Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü(EİE), 1988, Ölçme aletleri ve ölçüm teknikleri, Sanayide Enerji Tasarrufu Serisi, No.8, Ankara.
- Erkan, N., 1979, Ulusal endüstrileşme sürecinde insan-makina-çevre etkenlerine ergonomi yaklaşımının temelleri, KMO Dergisi, Sayı 93-94, Mart-Haziran 1979, ss. 68-75.
- Francis, J.R.D., 1975, Fluid mechanics for engineering students, Fourth edition, Edward Arnold, Great Britain, 370p.
- Gedik, Ü. ve Yeşilören, A., 1989, Sıkıştırılabilen akışkanların akış debilerinin ölçümü, Bitirme Ödevi, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 34s (Yayımlanmamış).
- Genç,S.,1988, Nemlendirme ve nem giderme, İleri Kimya Müh.Termodinamiği Proje Raporu, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 59s (Yayımlanmamış).
- Goldstein, R.J., 1974, Measurement of fluid velocity by Laser-Doppler techniques, applied mechanics reviews, Minnesota,pp.753-760.
- Griswold, J.,1946, Fuels, combustion and furnaces, McGraw-Hill, New York, pp.102-113.
- Gülbaran, E.,1981, Kimya mühendisliği unit operasyonları, Matbaa teknisyenleri koll.şti., İstanbul, ss. 226-251.
- Gürüz, K., 1986, Kimya mühendisliği termodinamiği, Ankara Üniversitesi Fen Fak.yayımları, Ankara, 904s.
- Hannes, K.W., 1989, District heating a contribution to the environmentally acceptable utilization of domestic energy reserves, Second German Industry Exhibition in Turkey'89, 25-30 May, İstanbul, 14p.
- Harrison, P., 1967, Air flow measurement by the soap film method, Ministry of Technology National Engineering Laboratory, Glasgow, 22p.
- Harrison, R.M. and Perry, R., 1986, Handbook of air pollution analysis, Second edition, Chapman and Hall, Cambridge, 633p.
- Hayward, A.T.J., 1979, Flowmeters, The Mcmillan Press, Hong Kong, 197p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Holman, J.P., 1978, Experimental methods for engineers, Third edition, McGraw-Hill, USA, 493p.
- International Labour Office (ILO), 1983, Encyclopedia of occupational health and safety, Italy, 2538 p.
- Intersociety Committee, 1972, Methods of air sampling and analysis, American Public Health Association, Washington, 480p.
- Kara, S., 1988, Baca gazı analizi ile kazanlarda yakıt ekonomisi sağlanması, Hava kalitesinin korunması yönetmeliğinin getirdiği yükümlülükler ve baca gazı analizi yardımıyla kazanlarda yakıt ekonomisi sağlanması semineri, 20 Ekim, Bursa,(Basılmadı).
- Karpuzcu, M., 1988, Çevre mühendisliğine giriş, İkinci baskı, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 345s.
- Kaytakoğlu, S., 1991, Azot oksitlerinin iki ve üç fazlı sistemlerde fiziksel ve kimyasal yolla giderilmesi ve giderme yöntemlerinin karşılaştırılması, Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir (Yayımlanmamış).
- Kern, D.Q., 1950, Process heat transfer, McGraw-Hill, Japan, 871p.
- Kirk-Othmer, 1978, Encyclopedia of chemical technology, Vol.1, John Wiley and sons, New York, ss. 616-619.
- Kirk-Othmer, 1978, Encyclopedia of chemical technology, Vol.8, John Wiley and sons, New York, ss. 78-81.
- Kirk-Othmer, 1978, Encyclopedia of chemical technology, Vol.9, John Wiley and sons, New York.
- Kirk-Othmer, 1978, Encyclopedia of chemical technology, Vol.10, John Wiley and sons, New York, ss. 624-627.
- Kirk-Othmer, 1978, Encyclopedia of chemical technology, Vol.21, John Wiley and sons, New York, ss. 59-75.
- Kirk-Othmer, 1978, Encyclopedia of chemical technology, Supplement, John Wiley and sons, New York, ss. 466-493.
- Kul, İ., 1991, Partikül madde özelliklerinin ve dağılımının hava kalitesinin kontrolunda yeri ve önemi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir (Yayımlanmamış).
- Kurz, J.L., 1987, Applications of thermal mass flow meters to air sampling, Kurz product catalog, USA.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lansford, W.M., 1936, The use of an elbow in a pipe line for determining the rate of flow in the pipe, University of Illinois Bulletin No.33, Urbana, 36p.
- Lazaridis, A., 1978, Moisture content of air, Calculation and shortcut deskbook, McGraw-Hill, USA, 105p.
- Madill, W., 1983, Fluid mechanics level III, Macdonald und Evans, Great Britain, 72p.
- Massey, B.S., 1987, Mechanics of fluids, Fifth edition, Van Nostrand Reinhold, United Kingdom, 582p.
- May, D.L., 1978, First step in cutting steam costs, Calculation shortcut deskbook, McGraw-Hill, USA, 125-129.
- McCabe, W.L. and Smith, J.C., 1976, Unit operations of chemical engineering, Third edition, McGraw-Hill, Japan, 1028p.
- McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, 1982, Fifth edition, Vol.1, McGraw-Hill, USA, pp. 199-204, pp. 242-243, pp. 507-508.
- McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, 1982, Fifth edition, Vol.4, McGraw-Hill, USA, pp. 72-74, pp. 404-410.
- McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, 1982, Fifth edition, Vol.5, McGraw-Hill, USA, pp. 464-475.
- McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, 1982, Fifth edition, Vol.6, McGraw-Hill, USA, pp. 696-698.
- McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, 1982, Fifth edition, Vol.10, McGraw-Hill, USA, pp. 342-343.
- McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, 1982, Fifth edition, Vol.11, McGraw-Hill, USA, pp. 80-82.
- Mehmetoğlu, M.T., 1983, Yüksek sıcaklıklardaki gazlarda sıcaklık ve hız ölçümü, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 6(2), ss. 29-34.
- Miller, R.W., 1983, Flow measurement engineering handbook, McGraw-Hill, USA,
- Müezzinoğlu, A., 1987, Hava kirliliğinin ve kontrolünün esasları, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 293s.
- Ower, E. und Danksurst, R.C., 1977, The measurement of air flow, Fifth edition, Pergamon Press, Great Britain, 363p.
- Özcan, A.N. ve Kural, O., 1979, Dumansız bir linyit sobasının geliştirilmesi, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, Isı Tekniği Desteklenen Araştırma Ünitesi, ISITEK 23, Ankara, 20s.

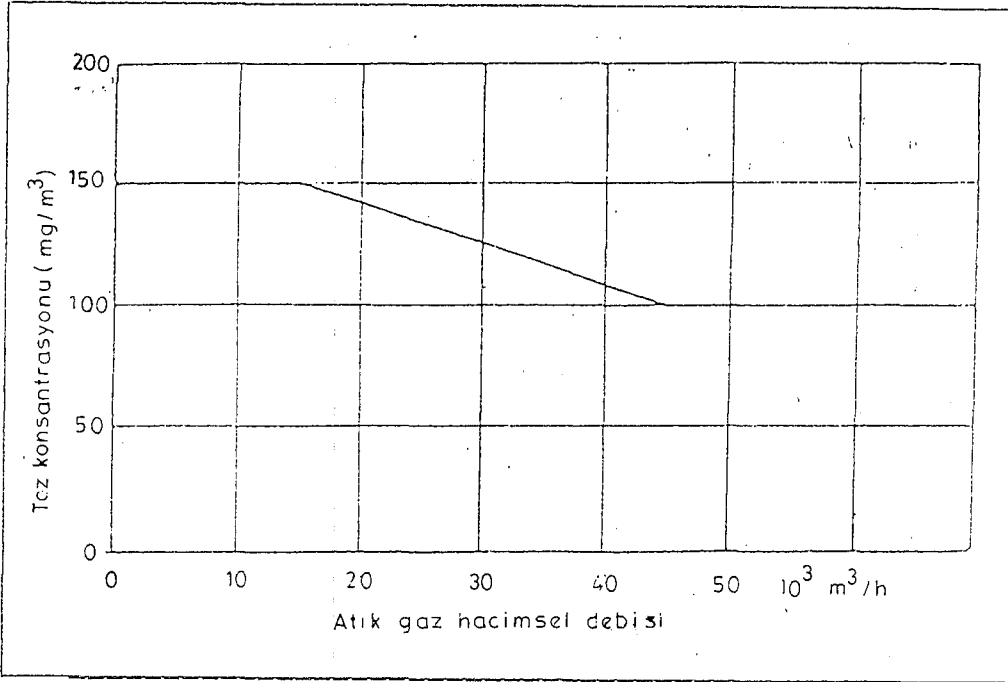
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Perry, R. and Green, D., 1984, Perry's chemical engineers'handbook, Sixth edition, McGraw-Hill, Japan.
- Resmi Gazete, 1986, 2 Kasım, Sayı: 19269, 169s.
- Rousseau, R.W.and Felder, M.R., 1986, Elementary principles of chemical processes, second edition, John Wiley and Sons, USA, 668 p.
- Seinfeld, J.H., 1986, Atmospheric chemistry and physics of air pollution, John-Willey and sons., Canada, 738 p
- Schmidt,M., 1989, Gaz ölçüm prensipleri hakkında temel bilgiler, Doğal gaz uluslararası enerji teknoloji ve tesisat dergisi, Sayı 2, İstanbul, ss.21-27.
- Smith, J.M. and Van Ness, H.C., 1987, Introduction to chemical engineering thermodynamics, Fourth edition, McGraw-Hill, Singapur, 698p.
- Smith, J.R., 1978, Measuring flows through vents, Calculation and shortcut deskbook, McGraw-Hill, USA, pp. 22.
- Stern, C.A., 1976, Air pollution, air pollutants, their transformation and transport, Vol.1, Third edition, Academic Press, New York, 715p.
- Stern, C.A., 1976, Air pollution, air pollutants, their transformation and transport, Vol.2, Third edition, Academic Press, New York,684p.
- Strauss, W., 1975, Industrial gas cleaning, Second edition, Pergamon Press, Hungary, 621p.
- Theodore, L. and Buonicore, A.J., 1982, Air pollution control equipment, Prentice-Hall, USA, 429p.
- Timellini, G., 1979, Metodi di preievo, Il Controllo Delle Emisioni Dagli Impianti Ceramici, Cap.3, Centro Ceramico, Bologna, pp. 39-69.
- Timellini, G.,1979, Caratteristiche fisiche e chimiche delle emissioni, Il Controllo Delle Emisioni Dagli Impianti Ceramici, Cap.2, Centro Ceramico, Bologna, pp. 31-38.
- Threlkeld, J.L., 1986, Thermal environmental engineering, Second edition, Prentice-Hall, New Jersey, 495p.
- Türkoğlu, M., 1989, Baca ve egzost gazı emisyonları, Çevre-89 Beşinci bilimsel ve teknik çevre kongresi, Çukurova Üniv. Basımevi, Adana, ss. 88-103.
- Treybal, R.E., 1986, Mass transfer operations, Third edition, McGraw-Hill, Singapur, 784p.
- Var, F., 1990, Bazı hava kirletici bileşenler için örnek toplama deneysel analiz ve değerlendirme yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 224s (Yayımlanmamış).

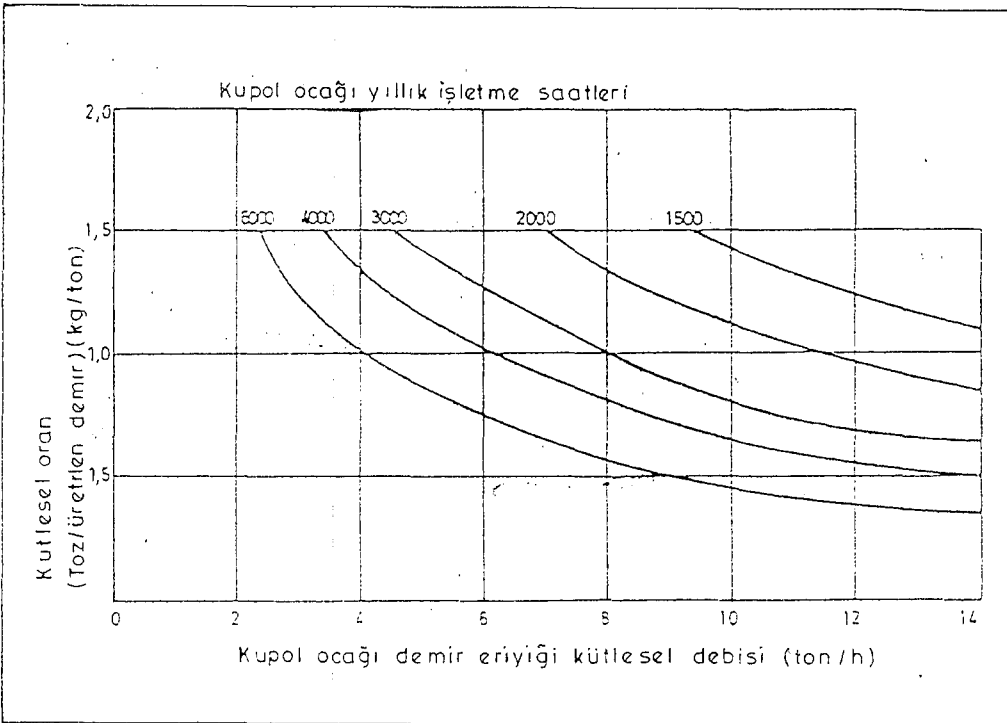
KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Velicangil, S. ve Velicangil, Ö., 1987, Endüstri sağlığı işçi sağlığı-iş hijyeni ve meslek hastalıkları, İsgüm Basımevi, Ankara, 464 s.
- Yıldırım, M.E, 1985, Bazı türk linyit kömürlerinin katalizörlü hidrojenleme ile sıvılaştırma, Anadolu Üniv., Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt II, sayı 1, Eskişehir 159-168 ss.
- Yılmaz, B., 1990, Yanmadan kaynaklanan hava kirliliğinin kontrolunda debi ve nem ölçümünün yeri ve önemi, Bitirme Ödevi, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 42s.
- Yücel, Ü. ve İçer, O., 1989, Nem, nemlendirme ve nem giderme, Bitirme Ödevi, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 110s.

**EK 1. Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği'nde Yer Alan Kirlotici
Vasfı Yüksek Tesisler İçin Emisyon Sınır Değerlerinin Debiye
Bağımlılığını Götteren Diyagramlar**



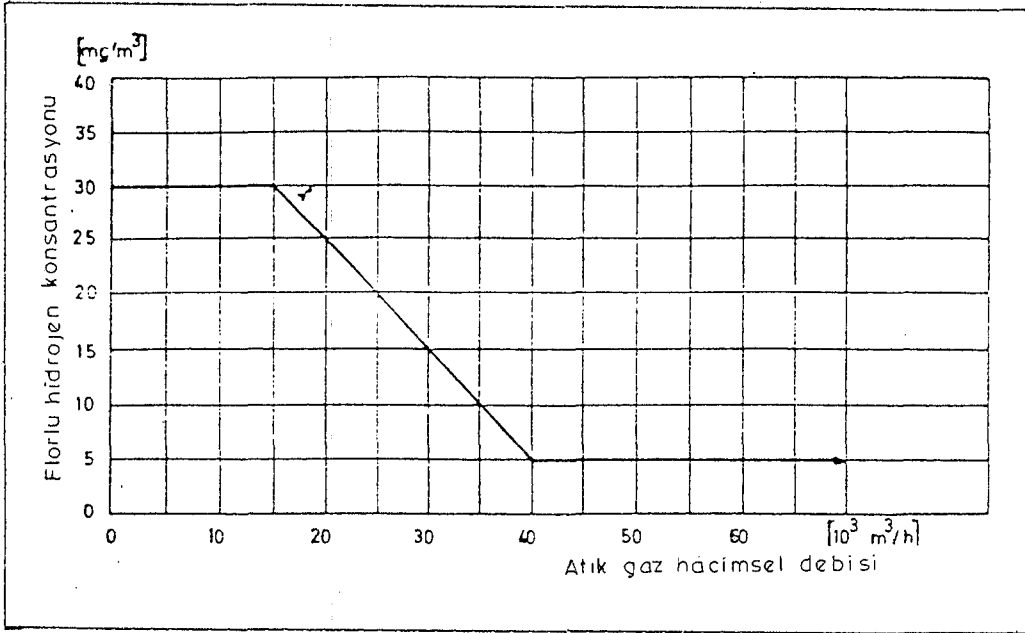
Şekil Ek 1.1 Atık gazlarda bulunan toz emisyon sınırları *.



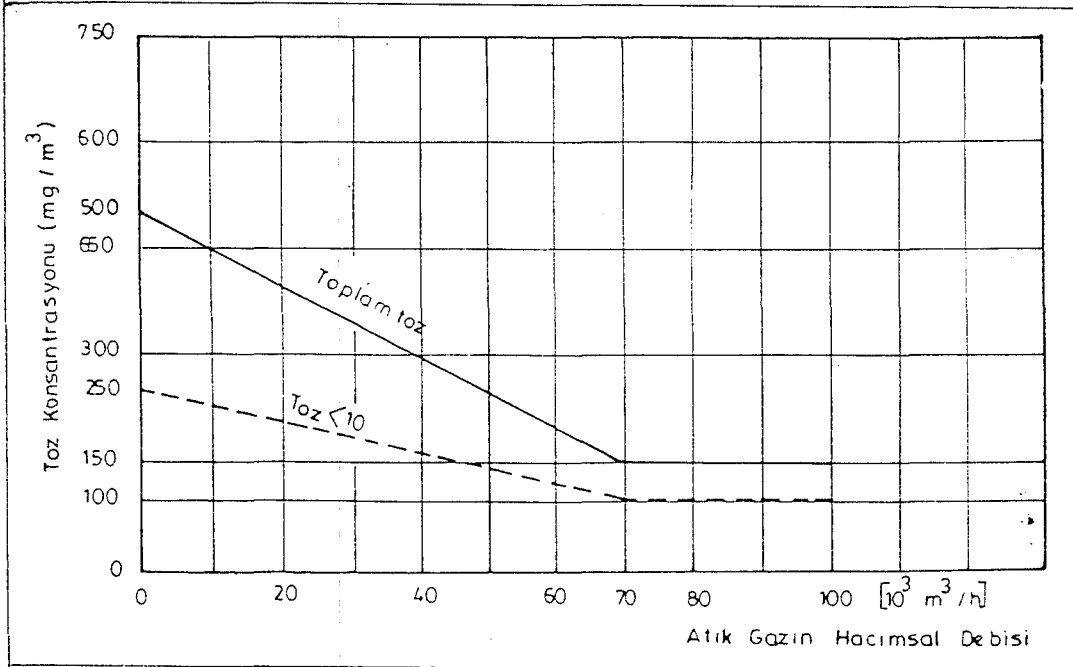
Şekil Ek 1.2 Kupol ocakları için toz emisyon sınırları **.

* Anılan şekil HKKY 'de Diyagram 1 olarak isimlendirilmiştir.

** Anılan şekil HKKY 'de Diyagram 2 olarak isimlendirilmiştir.



Şekil Ek 1.3 Hidrojen florür üreten tesisler için atık gaz hacimsel debisi ve HF konsantrasyonu arasındaki ilişki ***.

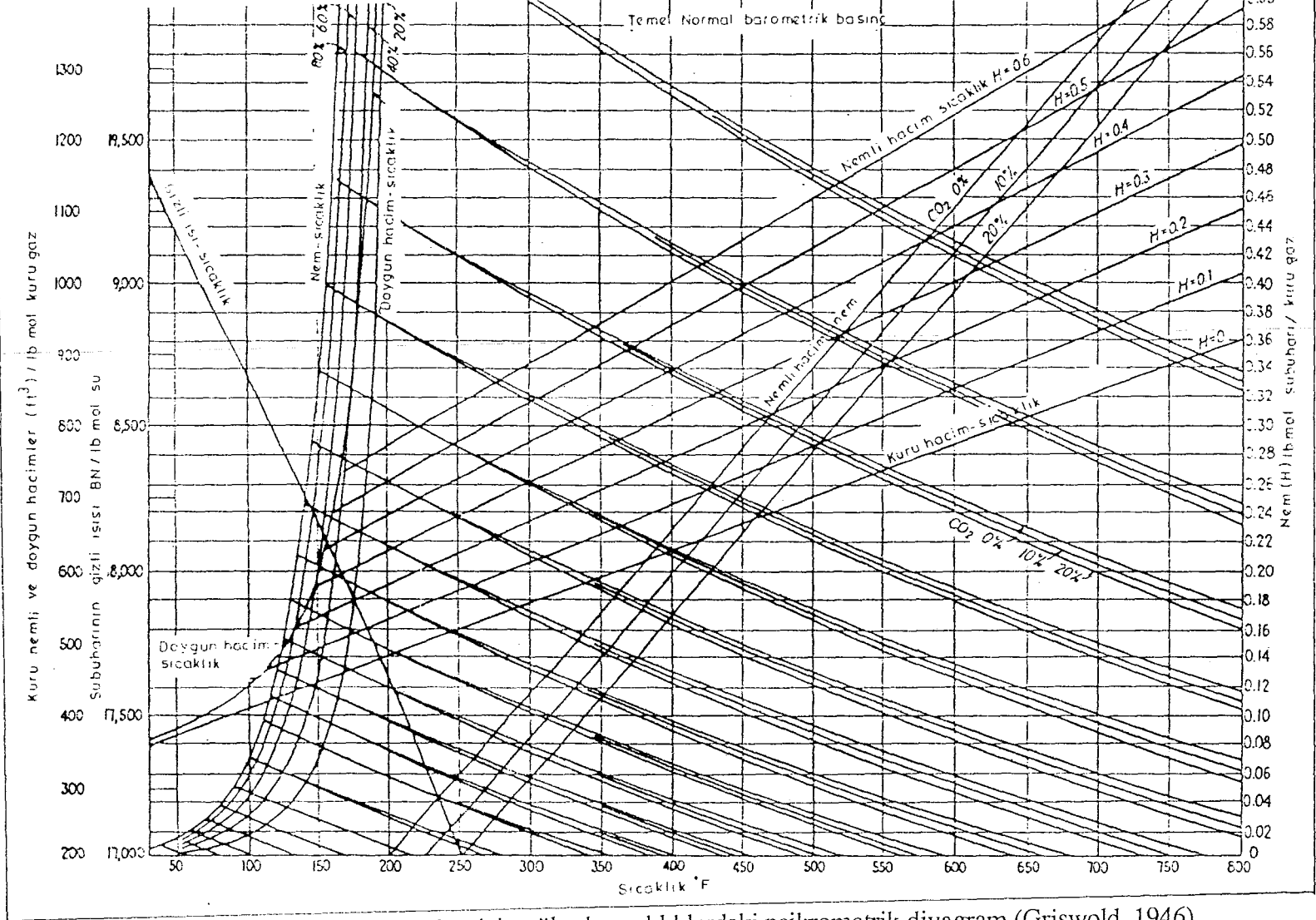


Şekil Ek 1.4 Sunta ve benzeri ağaç ürünleri üretim tesisleri için atık gaz hacimsel debisi ve toz konsantrasyonu arasındaki ilişki ****.

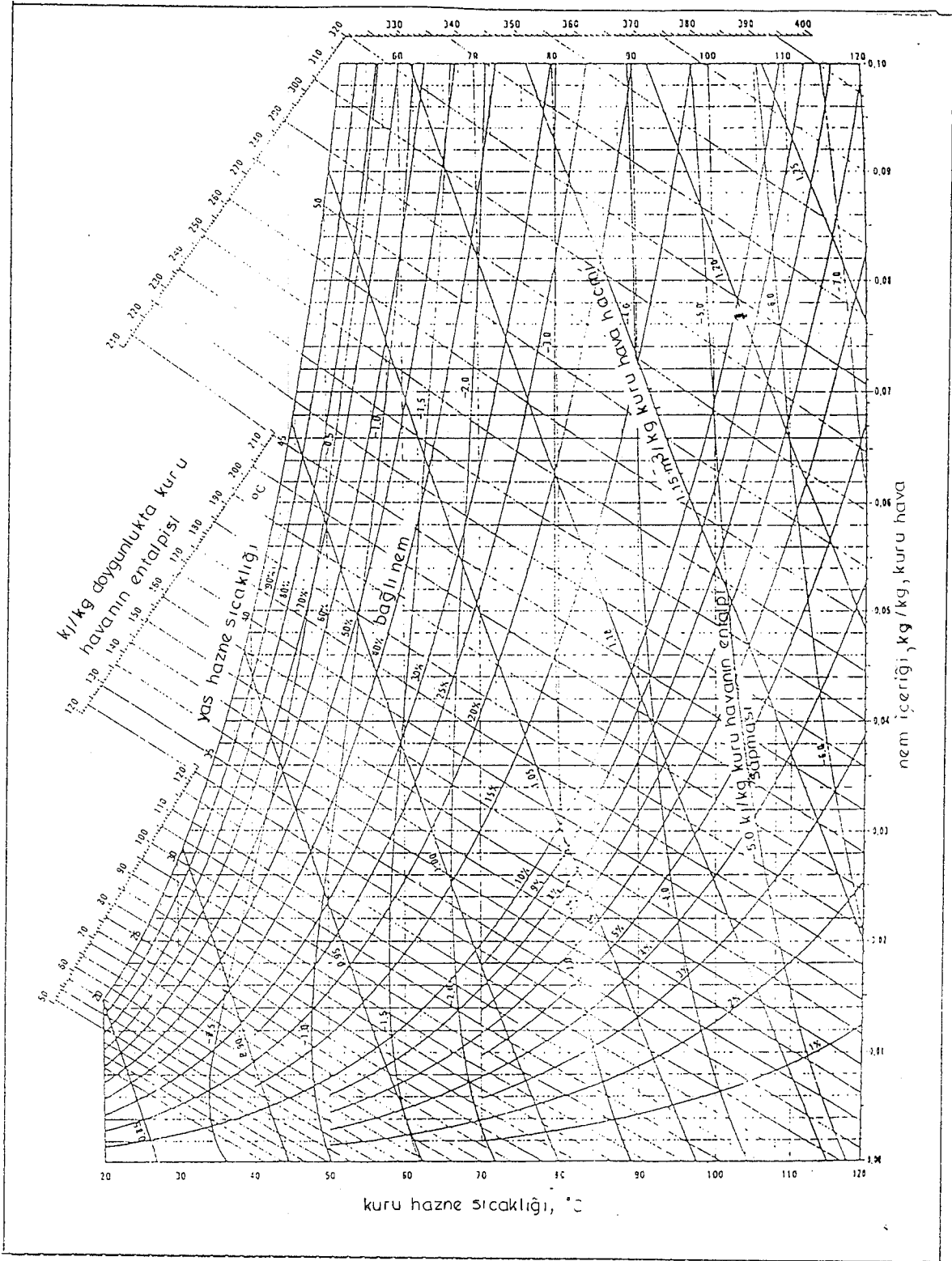
Anılan şekil HKKY 'de Diyagram 5 olarak isimlendirilmiştir.

Anılan şekil HKKY 'de Diyagram 6 olarak isimlendirilmiştir.

EK 2. Psikrometrik Diyagramlar

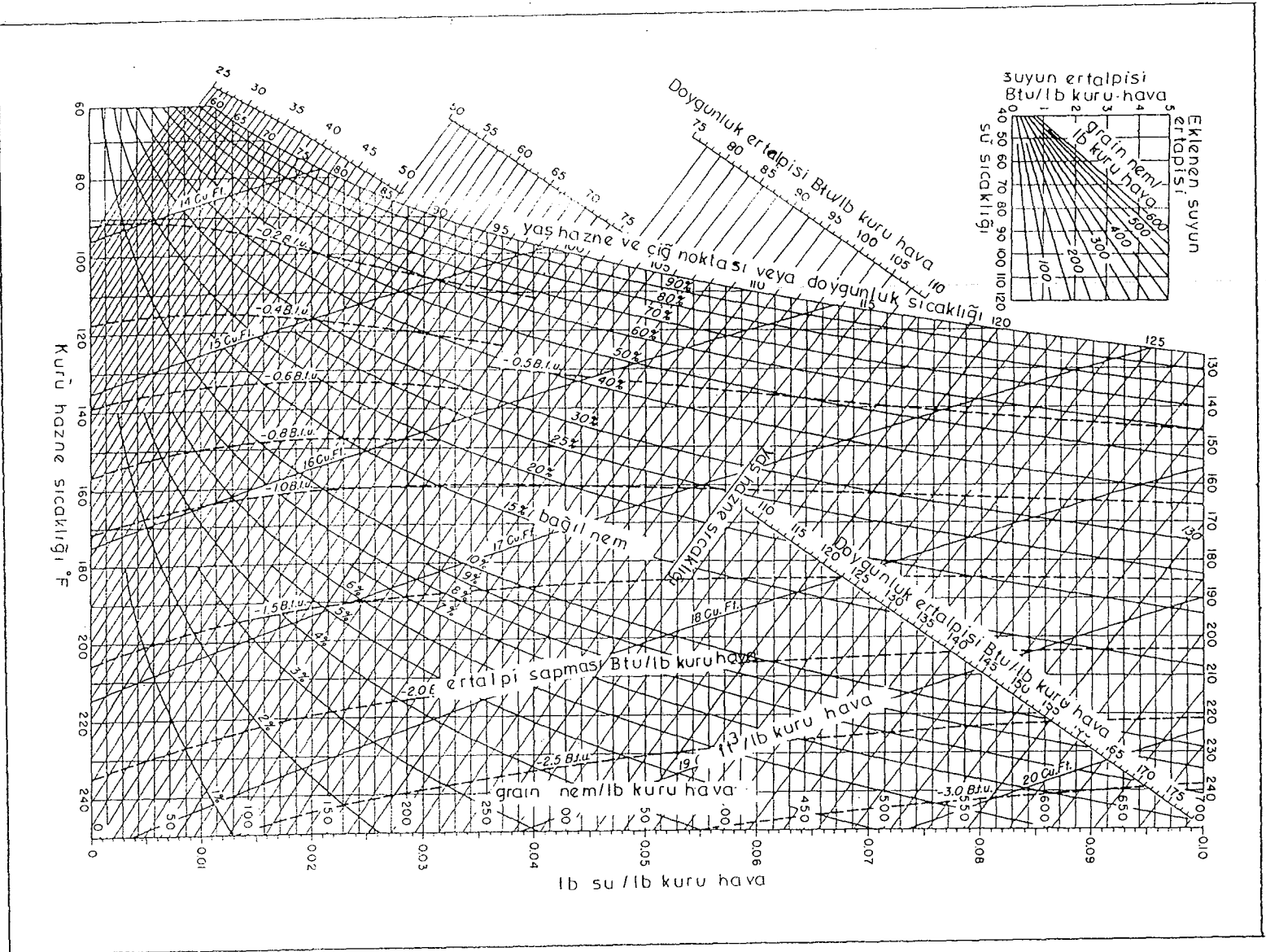


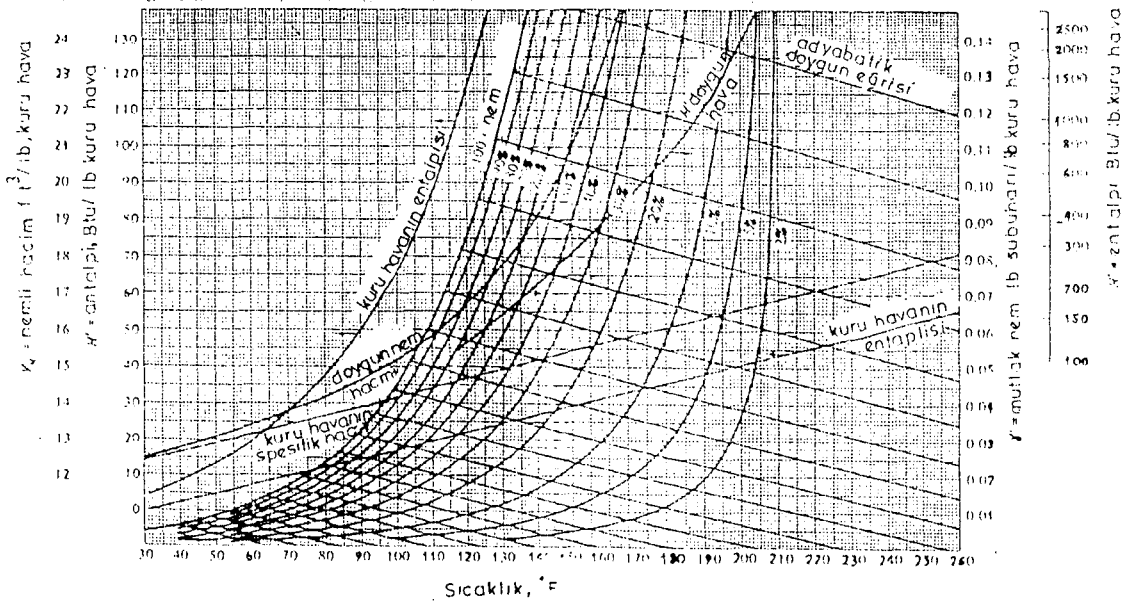
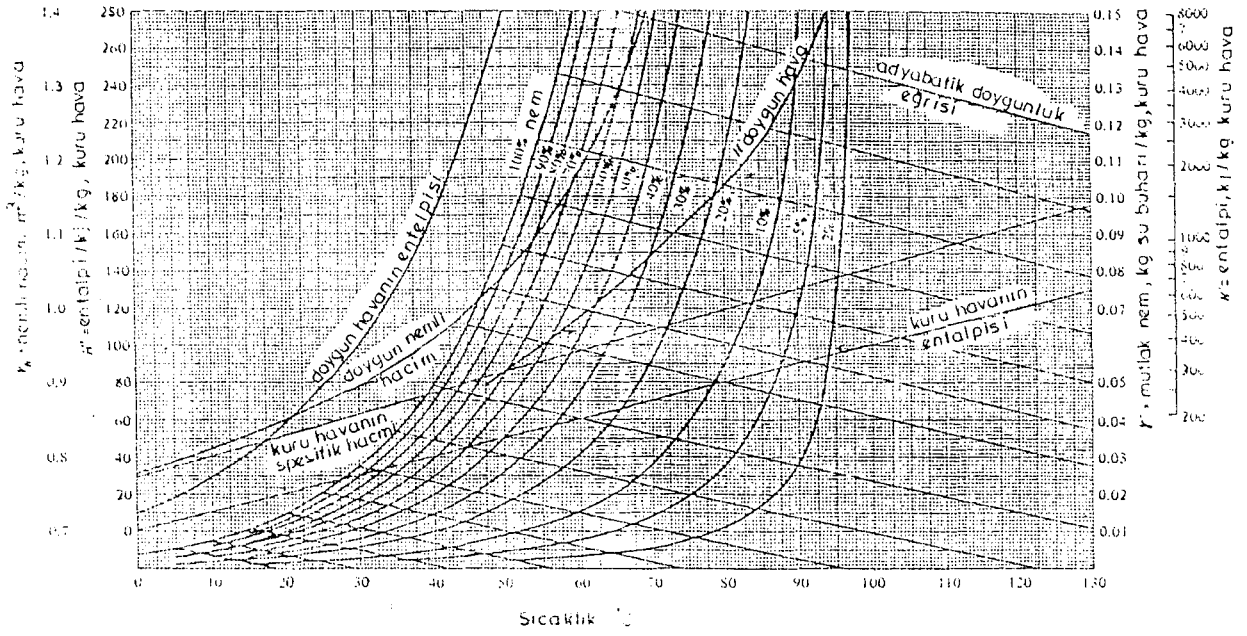
Şekil Ek 2.1 Hava ve yanma gazları için yüksek sıcaklıklardaki psikrometrik diyagram (Griswold, 1946).



Şekil Ek 2.2 Ortalama sıcaklıklarda psikrometrik diyagram (SI birim sisteminde) (Perry and Green, 1984).

Şekil Ek 2.3 Ortalama sıcaklıklarda psikrometrik diyagram (İngiliz birim sisteminde) (Perry and Green, 1984).





Şekil Ek 2.4 İki ayrı birim sisteminde psikrometrik diyagram (Treybal, 1986).

