

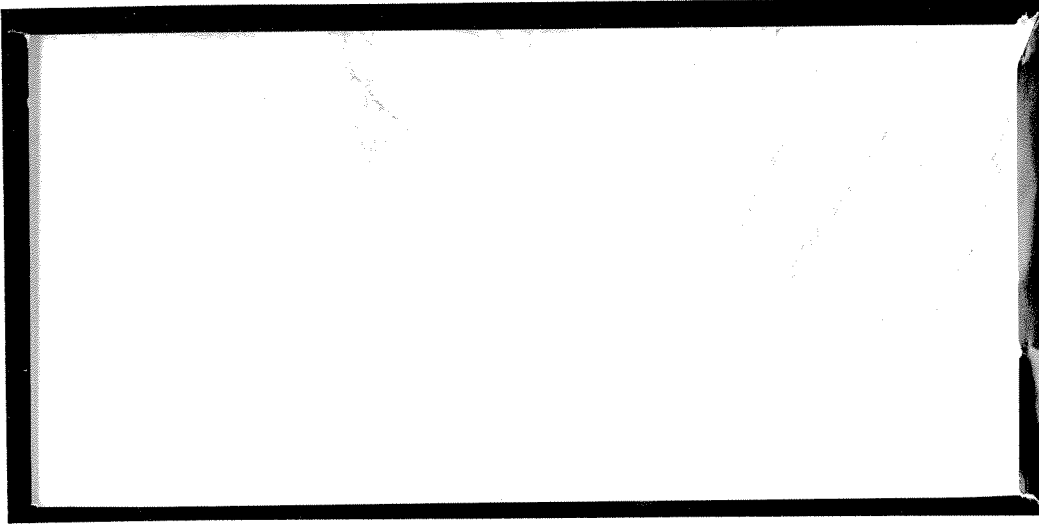
1997-193

DUP



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY



**Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu**

**Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee**



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

LİNYİTLE YAKILAN
AKIŞKAN YATAKLI YAKICILARDA
AZOT OKSİT (NO_x)
EMİSYONLARININ BELİRLENMESİ

PROJE NO: MİSAG-89

Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu

Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee

**LİNYİTLE YAKILAN AKIŞKAN YATAKLI YAKICILARDA
AZOT OKSİT (NO_x) EMİSYONLARININ BELİRLENMESİ**

PROJE NO: MİSAG-89

**PROF. DR. NEVİN SELÇUK
ENGİN DEĞİRMENCİ
OLCAY OYMAK
LEVENT ORGAN**

**ŞUBAT 1998
ANKARA**

ÖNSÖZ

Bu araştırma, Orta Doğu Teknik Üniversitesi tarafından 96-03-04-03 kodlu Araştırma Fonu Projesi kapsamında ve kısmen Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu tarafından MİSAG-89 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Raporda sonuçları verilen deneyler ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde kurulu 0.3 MW akışkan yataklı yakıcı test ünitesinde yapılmıştır. Deneylerde kullanılan Beypazarı linyiti, Türkiye Kömür İşletmeleri Çayırhan Tesislerinden, Bartın kireçtaşı Işıklar Holding'e bağlı Barkisan İşletmesinden temin edilmiştir. Linyit TEAŞ Çayırhan İşletmesinde proje ekibinin denetim ve yardımlarıyla, kireçtaşı ise proje ekibi tarafından kırılıp elenmiştir.

Deneylerden çıkan katı akımlarından alınan örneklerin analizlerinin bir kısmı Kimya Mühendisliği Bölümü'nde bir kısmı da TÜBİTAK-EAL laboratuvarlarında yapılmıştır.

Bu projenin gerçekleşmesini sağlayan tüm kuruluşlara ve bu kuruluşların yardımlarını esirgemeyen elemanlarına katkıları için teşekkür ederiz.

2.Şubat.1998

Prof.Dr. Nevin Selçuk

Proje yöneticisi

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
ÖZ.....	1
ABSTRACT.....	2
1. GİRİŞ.....	3
2. PROJEDEKİ BİLİMSEL GELİŞMELER.....	4
2.1 0.3 MW Akışkan Yataklı Yakıcı Test Ünitesi.....	4
2.2 Deneyler ve Sonuçlar.....	6
2.3 NO _x Dağılımları.....	9
2.4 Hava Fazlasının NO _x Emisyonu Üzerine Etkisi.....	14
2.5 Kireçtaşı Katkısının NO _x Emisyonu Üzerine Etkisi.....	14
2.6 Serbest Bölgede NO _x İndirgenmesi.....	17
2.7 NO _x Emisyonları.....	17
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	18
3.1 Sonuçlar.....	18
3.2 Öneriler.....	19
4. KAYNAKLAR.....	19
EK 1: RAPOR SONUÇLARININ UYGULAMAYA DÖNÜŞTÜRÜLMESİ İÇİN GEREKLİ ÖNERİLER.....	21
EK 2: ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ARAŞTIRMA FONU PROJESİNİN KATKISI.....	22
BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU.....	24

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Akışkan yataklı yakıcıda NO _x ve N ₂ O oluşum ve indirgenme reaksiyonları.....	3
Şekil 2. 0.3 MW akışkan yataklı test ünitesinin P&I resmi.....	5
Şekil 3. O ₂ , CO ve CO ₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değişimi (kuru baz).....	10
Şekil 4. Yakıcı boyunca sıcaklık dağılımları.....	11
Şekil 5. Deney 1 için yakıcı boyunca ölçülen NO _x ve O ₂ miktarları (kuru baz).....	12
Şekil 6. Deney 3 için yakıcı boyunca ölçülen NO _x ve O ₂ miktarları (kuru baz).....	13
Şekil 7. Deney 1 ve 2 için yakıcı boyunca ölçülen NO _x miktarları (kuru baz).....	15
Şekil 8. Deney 1, 3 ve 4 için yakıcı boyunca ölçülen NO _x miktarları (kuru baz).....	16

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 . Deneylerde kullanılan kömürün fiziko-kimyasal özellikleri.....	7
Tablo 2 . Deneylerde kullanılan kömürün kül analizi.....	2
Tablo 3 . Deneylerde kullanılan kireçtaşının fiziko-kimyasal özellikleri.....	8
Tablo 4 . İşletme koşulları ve deney sonuçları.....	8
Tablo 5 . Bacagazi emisyonları (kuru baz).....	9
Tablo 6. Yakıt azotunun NO _x 'e dönüşen yüzdesi.....	14
Tablo 7. Deneylerde ölçülen NO _x emisyonları (mgNO ₂ /m ³).....	17
Tablo 8. Deneylerde ölçülen NO _x emisyonları (mgNO ₂ /MJ).....	18

ÖZ

Bu çalışmada ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde kurulu olan 0.3 MW ısı gücündeki akışkan yataklı yakıcı üzerinde tipik bir Türk linyitini temsil eden kül, uçucu madde ve kükürt içeriği kaliteli kömürlere göre yüksek olan Beypazarı linyitinin yakılmasıyla ortaya çıkan NO_x ve diğer baca gazlarının (CO_2 , CO , O_2 ve SO_2) emisyonları on-line ölçümlerle belirlenmiştir. NO_x 'in yakıcı boyunca dağılımının ve baca gazındaki emisyonunun fazla hava ve kireçtaşı katkısı ile değişimi incelenmiştir. Bulgular, NO_x 'in daha ziyade linyitin uçucu madde içeriğinden kaynaklandığını ve bu nedenle NO_x oluşumunun çalışılan sıcaklık aralığında (857-918°C) sıcaklıktan etkilenmediğini göstermiştir. Baca gazındaki NO_x emisyonunun hava fazlasıyla arttığı, kireçtaşı katkısıyla da azaldığı tesbit edilmiştir. Ölçümlerle belirlenen baca gazı emisyonları, günümüzdeki ulusal ve uluslararası standart aralıklarıyla karşılaştırılmış ve izin verilebilir değerlerin altında kaldığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: NO_x emisyonu, akışkan yataklı yakıcı, linyit.

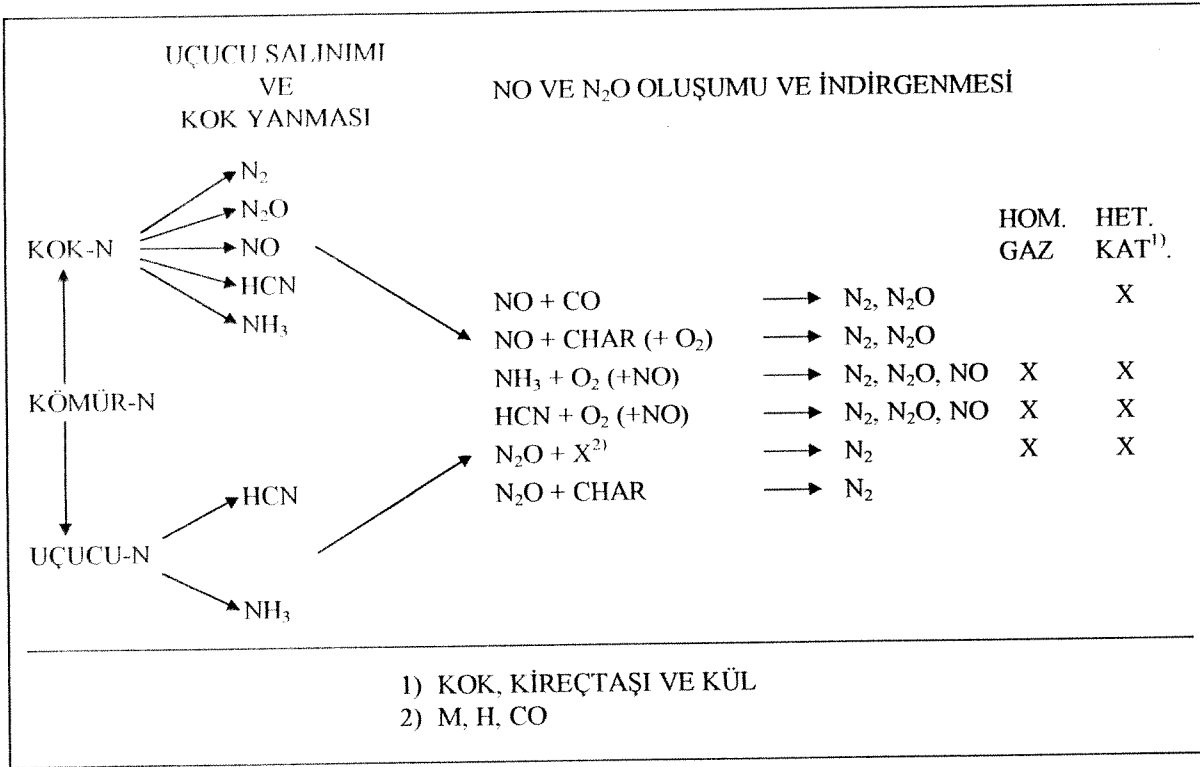
ABSTRACT

In this study, on-line measurements of NO_x and other species (CO₂, CO, O₂, SO₂) present in the gaseous combustion products released from the combustion of a typical Turkish lignite, Beypazari, with high ash, volatile matter and sulfur contents in a 0.3 MW Atmospheric Fluidized Bed Combustor have been carried out. Effects of excess air and limestone addition on the concentration of NO_x along the combustor together with NO_x emission have been investigated. Results show that NO_x formation is primarily due to the high volatile matter content of lignite and hence is not affected by temperature in the range (857-918°C) studied. It was found that NO_x emission increases with excess air and decreases with the addition of limestone. Measured NO_x emissions have been compared with the existing national and international standard ranges and were found to be lower than the allowable limits.

Keywords: NO_x emission, fluidized bed combustion, lignite.

1. GİRİŞ

NO_x (NO ve NO_2) ve N_2O 'in çevre etkileri asit yağmurları, sera etkisinin artması ve ozon tabakasının incelmesi şeklinde ortaya çıkar. Emisyonlar, bu gazların yanma odasındaki oluşum ve indirgenme reaksiyonlarının farkından kaynaklanır. Şekil 1 bir akışkan yataklı yakıcıdaki NO_x ve N_2O oluşum ve indirgenme reaksiyonlarını özetlemektedir.



Şekil 1. Akışkan yataklı yakıcıda NO_x ve N_2O oluşum ve indirgenme reaksiyonları.

Azot ve kükürt oksit emisyonlarından kaynaklanan asit yağmurlarına azot oksitlerin katkısı %30 olarak tahmin edilmektedir (Badr ve Probert, 1993). Sera etkisi, atmosferdeki sera gazlarının (CO_2 , H_2O , CH_4) dünyadan yansıyan radyasyonu soğurması ve tekrar dünyaya yayımını ile gerçekleşir. Sera etkisi dünyadaki yaşamın sürmesi için gerekli koşullardan bir tanesidir. Şöyleki, dünyayı saran atmosferde sera gazları olmasaydı, ortalama sıcaklık 15°C yerine -18°C olacaktı. Bu nedenle, problem sera etkisinin varlığı değil, ortalama sıcaklığın son yüzyılda 0.5 K artmasıyla kendini gösteren sera etkisinin varlığıdır. Azot oksitler arasında, sera etkisine neden olan gaz N_2O olup, CO_2 'e kıyasla ısıtma etkisi 200-300 kat daha fazladır (Smith ve Thambimuthu, 1993). Azot oksitler aynı zamanda ozon tabakasının incelmesine neden olur. Bu incelemede en önemli katkı, troposferde yaşam süresi 150 yıl olan ve bu nedenle stratosfere taşınabilme şansı olan N_2O 'den gelir.

Azot oksitlerin neden olduğu ve insan sağlığını etkileyen diğer bir çevresel etki de fotokimyasal dumanlı sistir.

Azot oksitlerden yukarıda sözü edilen nedenlerden kaynaklanan çevresel etkiler konusunda gittikçe artan çevre duyarlılığı, fosil yakıtlardan kaynaklanan NO_x emisyonlarının sınır değerlerinin yönetmeliklerle daha düşük seviyelere indirilmesine neden olmaktadır. Bu da yakın gelecekte, düşük NO_x emisyonlu yakma teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu hale sokacaktır. Nitekim, akışkan yatakta kömür yakma teknolojisi bu ihtiyaca cevap verebilecek bir alternatif çözüm olarak öngörölmüş, ve daha ziyade Kuzey Amerika ve Avrupa'nın kaliteli kömürleri için sanayi uygulamalarına girmiştir. Uygulamalara paralel olarak akışkan yatakta NO_x emisyon araştırmaları gerek laboratuvar ve gerekse pilot ölçekli akışkan yataklı yakıcılarda sürdürölmüş ve işletme koşullarının NO_x emisyonu üzerine etkisi belirlenmiştir (Hampartsoumian ve Gibbs, 1984, Pereria, 1975). Bu çalışmalar, son yıllarda akışkan yataklı yakıcılarda kireçtaşı katkısının NO_x emisyonu üzerine etkisinin incelenmesiyle devam etmiştir (Johnson, 1994, Leckner ve Amand, 1987, Shimizu ve diğer., 1993, 1995). Ancak yukarıda değinilen çalışmalar, Türk linyiti gibi düşük kaliteli kömürleri kapsamamaktadır. 8 milyar ton bilinen rezervleri ile ölkemizin enerji kaynakları arasında ikinci sırayı alan kükürtçe, külce ve nemce zengin linyitlerimiz için düşük NO_x emisyonlu yakma teknolojisi akışkan yatakta yakma teknolojisidir. Külce zengin olduğu için kendi külü içinde yakılan Türk linyitlerinden akışkan yataklı yakıcı boyunca oluşan azot oksitlerin derişimi hakkında řu ana kadar herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle, önerilen çalışmanın amacı, temiz ve verimli yanma için en uygun işletme koşullarında Beypazarı linyitinin yakılması ile oluşan azot oksitlerin derişimlerinin gerek yatak, gerekse serbest bölgeye yerleştirilen gaz sondaları aracılığıyla on-line ölçümlerle belirlenmesidir. Bu amaç çerçevesinde akışkan yataklı yakıcı içindeki NO_x dağılımının ve baca gazındaki NO_x emisyonunun fazla hava ve SO₂ emisyonunu azaltmak için gerekli olan kireçtaşı katkısıyla değişiminin incelenmesi planlanmıştır. SO₂'in yanma odasında optimum tutulma koşulu %20-25 fazla hava olduğundan ve ayrıca buna ilaveten havanın tamamının akışkan yataklı yakıcıya aşamasız beslenmesinden dolayı, yatakta oluşan oksitleyici ortamda azot oksit emisyonlarına N₂O'in katkısı, NO_x katkısına kıyasla ihmal edilmiştir.

2. PROJEDEKİ BİLİMSEL GELİŞMELER

2.1 0.3 MW Akışkan Yataklı Yakıcı Test Ünitesi

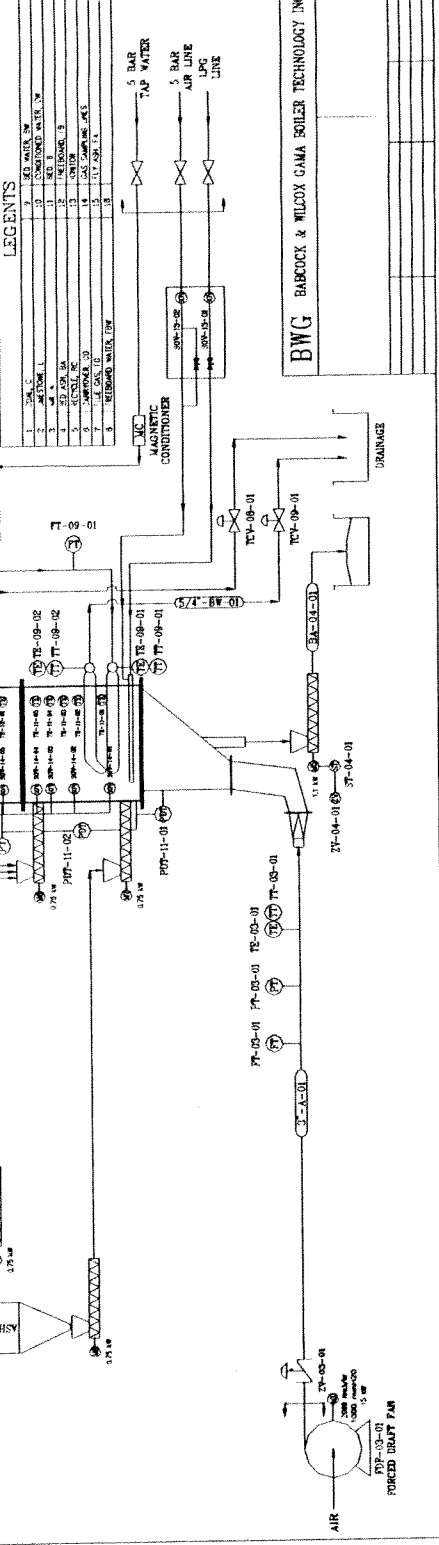
Şekil 2'de proses tasarımı ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde yapılmış olan 0.3 MW akışkan yataklı test ünitesinin P&I diagramı görünmektedir. Değişik linyitlerin yakılabilmesi için modüler ve esnek bir yapıda tasarlanmış, birer metrelik beş modülden oluşmuştur. İç kesit alanı 0.45 m x 0.45 m olan bu modüllerin ilki yatak bölgesini, onu takip eden üçü serbest bölgeyi sonuncusu ise

REVISIONS

NO.	DESCRIPTION	DATE	BY	APP.
1	ISSUED FOR CONSTRUCTION	20.01.2011	...	...
2	...	...	...	...
3	...	...	...	...
4	...	...	...	...

INSTRUMENT LIST

ITEM TAG NO	DESCRIPTION	PLACE	RANGE	UNIT
1	TEMPERATURE	...	...	...
2	TEMPERATURE	...	...	...
3	TEMPERATURE	...	...	...
4	TEMPERATURE	...	...	...
5	TEMPERATURE	...	...	...
6	TEMPERATURE	...	...	...
7	TEMPERATURE	...	...	...
8	TEMPERATURE	...	...	...
9	TEMPERATURE	...	...	...
10	TEMPERATURE	...	...	...
11	TEMPERATURE	...	...	...
12	TEMPERATURE	...	...	...
13	TEMPERATURE	...	...	...
14	TEMPERATURE	...	...	...
15	TEMPERATURE	...	...	...
16	TEMPERATURE	...	...	...
17	TEMPERATURE	...	...	...
18	TEMPERATURE	...	...	...
19	TEMPERATURE	...	...	...
20	TEMPERATURE	...	...	...
21	TEMPERATURE	...	...	...
22	TEMPERATURE	...	...	...
23	TEMPERATURE	...	...	...
24	TEMPERATURE	...	...	...
25	TEMPERATURE	...	...	...
26	TEMPERATURE	...	...	...
27	TEMPERATURE	...	...	...
28	TEMPERATURE	...	...	...
29	TEMPERATURE	...	...	...
30	TEMPERATURE	...	...	...
31	TEMPERATURE	...	...	...
32	TEMPERATURE	...	...	...
33	TEMPERATURE	...	...	...
34	TEMPERATURE	...	...	...
35	TEMPERATURE	...	...	...
36	TEMPERATURE	...	...	...
37	TEMPERATURE	...	...	...
38	TEMPERATURE	...	...	...
39	TEMPERATURE	...	...	...
40	TEMPERATURE	...	...	...
41	TEMPERATURE	...	...	...
42	TEMPERATURE	...	...	...
43	TEMPERATURE	...	...	...
44	TEMPERATURE	...	...	...
45	TEMPERATURE	...	...	...
46	TEMPERATURE	...	...	...
47	TEMPERATURE	...	...	...
48	TEMPERATURE	...	...	...
49	TEMPERATURE	...	...	...
50	TEMPERATURE	...	...	...
51	TEMPERATURE	...	...	...
52	TEMPERATURE	...	...	...
53	TEMPERATURE	...	...	...
54	TEMPERATURE	...	...	...
55	TEMPERATURE	...	...	...
56	TEMPERATURE	...	...	...
57	TEMPERATURE	...	...	...
58	TEMPERATURE	...	...	...
59	TEMPERATURE	...	...	...
60	TEMPERATURE	...	...	...
61	TEMPERATURE	...	...	...
62	TEMPERATURE	...	...	...
63	TEMPERATURE	...	...	...
64	TEMPERATURE	...	...	...
65	TEMPERATURE	...	...	...
66	TEMPERATURE	...	...	...
67	TEMPERATURE	...	...	...
68	TEMPERATURE	...	...	...
69	TEMPERATURE	...	...	...
70	TEMPERATURE	...	...	...
71	TEMPERATURE	...	...	...
72	TEMPERATURE	...	...	...
73	TEMPERATURE	...	...	...
74	TEMPERATURE	...	...	...
75	TEMPERATURE	...	...	...
76	TEMPERATURE	...	...	...
77	TEMPERATURE	...	...	...
78	TEMPERATURE	...	...	...
79	TEMPERATURE	...	...	...
80	TEMPERATURE	...	...	...
81	TEMPERATURE	...	...	...
82	TEMPERATURE	...	...	...
83	TEMPERATURE	...	...	...
84	TEMPERATURE	...	...	...
85	TEMPERATURE	...	...	...
86	TEMPERATURE	...	...	...
87	TEMPERATURE	...	...	...
88	TEMPERATURE	...	...	...
89	TEMPERATURE	...	...	...
90	TEMPERATURE	...	...	...
91	TEMPERATURE	...	...	...
92	TEMPERATURE	...	...	...
93	TEMPERATURE	...	...	...
94	TEMPERATURE	...	...	...
95	TEMPERATURE	...	...	...
96	TEMPERATURE	...	...	...
97	TEMPERATURE	...	...	...
98	TEMPERATURE	...	...	...
99	TEMPERATURE	...	...	...
100	TEMPERATURE	...	...	...



Şekil 2. 0.3 MW akışkan yataklı yakıcı test ünitesinin P&I resmi.

soğutucuyu temsil etmektedir. Ünitenin iç yüzeyi ateş tuğlası ile kaplı olup dış yüzeyi yalıtılmıştır. Ünite de iki soğutma yüzeyi bulunmaktadır.

Bunlardan birincisi yatağı, diğeri de serbest bölgeden çıkan gazı soğutmaktadır. Yataktaki soğutma yüzeyi istenen ısı çekişine göre değiştirilebilecektir. Gerekğinde serbest bölgedeki ateş tuğlalı modüller yerine su duvarlı modüller kullanılabilir. Basma fanından sağlanan akışkanlaştırma havası sırasıyla kalibre edilmiş bir vorteks akış ölçer, hava kutusu ve dağıtıcı plakadan geçtikten sonra yatağa gider. Yakıcıdan çıkan yanma gazları içerdiği uçucu külü siklonda bırakarak emme fanı aracılığı ile bacaya verilir. Kömür ve kireçtaşı, kendi silolarını altındaki hızı ayarlanabilen burgulu besleyicilerden geçerek tek bir noktadan yatağa beslenir.

Denemelere olanak verebilmesi için yatakta biri yatak seviyesi altı diğeri dağıtıcı plaka üstü olmak üzere iki besleme noktası mevcuttur. Yatak külü dağıtıcı plakaya bağlı olan drenaj borusu ile boşaltıcıya verilir. Yatak seviyesi bu boşaltıcı ile değiştirilebilir.

Siklonda toplanan uçucu kül hava kilidi ile siklondan çekilir. Sistem, siklonda toplanan külün değişik oranlarda yatağa dönmesine olanak verecek şekilde tasarlanmıştır. Devreye alma sırasında yatağın ön ısıtması LPG ile sağlanmaktadır.

Gaz konsantrasyon ve sıcaklık profillerini çıkartmak amacıyla yakıcı boyunca onar tane ısı çift ve gaz örnekleme sondası yerleştirilmiştir. Bunlardan dörder tanesi yatakta diğeri ise serbest bölgededir.

Gaz örnekleme sondalarından çekilen gazlar (CO_2 , CO , O_2 , SO_2 , NO_x) şartlandırıldıktan sonra analizörlere gönderilmektedir. CO_2 , CO ve SO_2 için infrared, O_2 için termo-manyetik, NO_x için ise kimyasal ışımaya (chemi-luminescent) analizörleri kullanılmaktadır. Yatak ve serbest bölge serpantinlerinden çıkan suyun sıcaklıkları rezistans termometreleriyle, serpantinlere giren suyun debileri ise orifis metrelerle ölçülmektedir. Tüm ölçüm cihazlarından gelen elektrik sinyalleri Bailey Infi 90 proses kontrol ve veri toplama sistemine iletilmekte ve gerçek değerler bilgisayardan izlenebilmektedir.

2.2 Deneyler ve Sonuçlar

Türk linyitini kaliteli kömürlerden ayıran unsurlar yüksek kül, uçucu madde ve kükürt içeriğidir. Türk linyitini, kaliteli kömürlerden ayıran yüksek kül oranı kömürün kendi külü içinde yakılmasını gerektirdiğinden ön deneyler yatak malzemesi olan külü üretmek için yapılmıştır. Ayrıca, linyitlerimizdeki yüksek yanabilir kükürt deneylerin kireçtaşı katkılı gerçekleştirilmesini ve kömürün yatağa alttan beslenmesini gerektirmektedir. Buna ek olarak, kömürün kendi külündeki yüksek kalsiyum miktarı, kömürün kendi külünün kükürt tutmadaki payının saptanmasını gerektirmektedir. Bu nedenle deneyler, alttan beslemeli, kireçtaşı katkısız ve katkılı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Hava fazlasının

NO_x emisyonuna etkisinin görülebilmesi için diğer işletme koşulları sabit tutulmak üzere deneyler iki hava fazlasında kireçtaşı katkısız koşullarda da yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan Beypazarı linyitinin fiziko-kimyasal özellikleri; kül analizi ve kireçtaşının fiziko kimyasal özellikleri sırasıyla Tablo 1, 2 ve 3'te verilmiştir.

Tablo 1 . Deneylerde kullanılan kömürün fiziko-kimyasal özellikleri.

Boyut Analizi		Kısa Analiz (özgün örnek)		Element Analizi (kuru örnek)	
Boyut (mm)	Ağırlık (%)	Bileşen	Ağırlık (%)	Bileşen	Ağırlık (%)
4.00-2.36	27.18	Nem	9.00	C	31.35
2.36-1.70	34.35	Kül	45.36	H	2.23
1.70-1.40	9.08	UM [†]	40.32	O	12.96
1.40-1.18	9.66	SK [×]	5.32	N	1.22
1.18-0.85	11.86	ÜID [†] : 2526.23 cal/g d _p ort: 1.26 mm yoğunluk: 1.92 g/cm ³		S (org)	1.39
0.85-0.60	3.07			S (prt)	1.00
0.60-0.43	1.14			S (slf)	0.74
0.43-0.00	3.64			Kül	49.85

[†]Üst Isıl Değer [×]Sabit Karbon [†]Uçucu Madde

Tablo 2 . Deneylerde kullanılan kömürün kül analizi.

Bileşen	Ağırlık (%) (kuru örnek)
SiO ₂	37.19
Al ₂ O ₃	19.31
Fe ₂ O ₃	7.24
CaO	16.71
MgO	4.98
SO ₃	13.83
Na ₂ O	3.05
K ₂ O	1.25

Tablo 3 . Deneylerde kullanılan kireçtaşının fiziko-kimyasal özellikleri.

Boyut Analizi		Kimyasal Analizi (kuru örnek)	
Boyut (mm)	Ağırlık (%)	Bileşen	Ağırlık (%)
1.40-1.00	7.39	CaCO ₃	94.54
1.00-0.85	23.71	MgCO ₃	2.89
0.85-0.71	25.73	SiO ₂	2.27
0.71-0.60	19.33	Na ₂ O	0.07
0.60-0.50	13.71	K ₂ O	0.09
0.50-0.00	10.12	R ₂ O ₃	0.21

Ortalama boyut: 0.64 mm

Tablo 4 deneylerin işletme koşullarını ve sonuçlarını göstermektedir. Deney 1 ve 2 sırasıyla %22 ve %8 hava fazlası koşullarındaki sonuçları; Deney 3 ve 4 ise kireçtaşı katkılı deneylerin sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 4 . İşletme koşulları ve deney sonuçları.

İşletme Koşulları	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4
Kömür debisi, kg/h	116	131	116	116
Kireçtaşı debisi, kg/h	0	0	15	32
Yatak çekişi, kg/h	27	34	27	27
Uçucu kül debisi, kg/h	25	35	34	38
Hava debisi, kmol/h	18	18	18	18
% Hava fazlası	22	8	22	22
Akışkanlaştırma hızı, m/s	2.4	2.5	2.4	2.3
Ortalama yatak sıcaklığı, °C	857	918	862	813
Ortalama serbest bölge sıcaklığı, °C	828	894	843	800
Yanma verimi, %	97	97	97	96
Ca/S mol oranı*	2	2	4	6
Kükürt tutma verimi, %	55	50	74	79
Yatak yüksekliği, m	1	1	1	1
Kalsiyum kullanımı, %	28	19	19	14

*Kömürden gelen Ca/S dahil

Tüm deneylerde yakıcı boyunca ölçülen CO₂, CO ve O₂'nin mol yüzdeleri Şekil 3'de verilmiştir.

Tablo 5 ise gerçekleştirilen deneylerde ölçülen baca gazı emisyonlarını özetlemektedir.

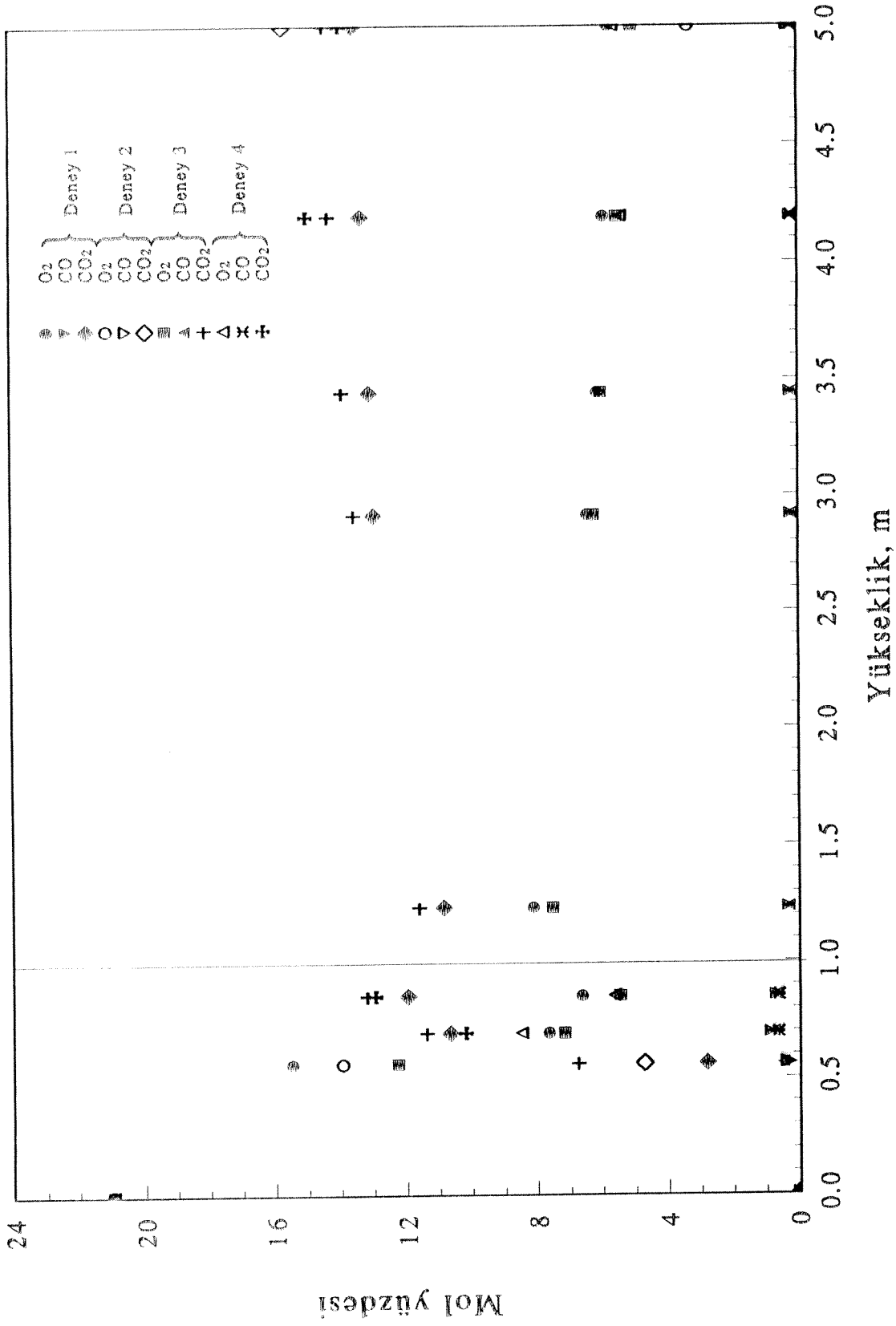
Tablo 5 . Bacagazı emisyonları (kuru baz).

	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4
O ₂ , %	5.7	3.3	5.0	5.6
CO, %	0.21	0.26	0.21	0.18
CO ₂ , %	13.5	15.7	14.4	13.9
SO ₂ , ppm	1794	2340	1054	790
NO _x , ppm	399	341	364	360

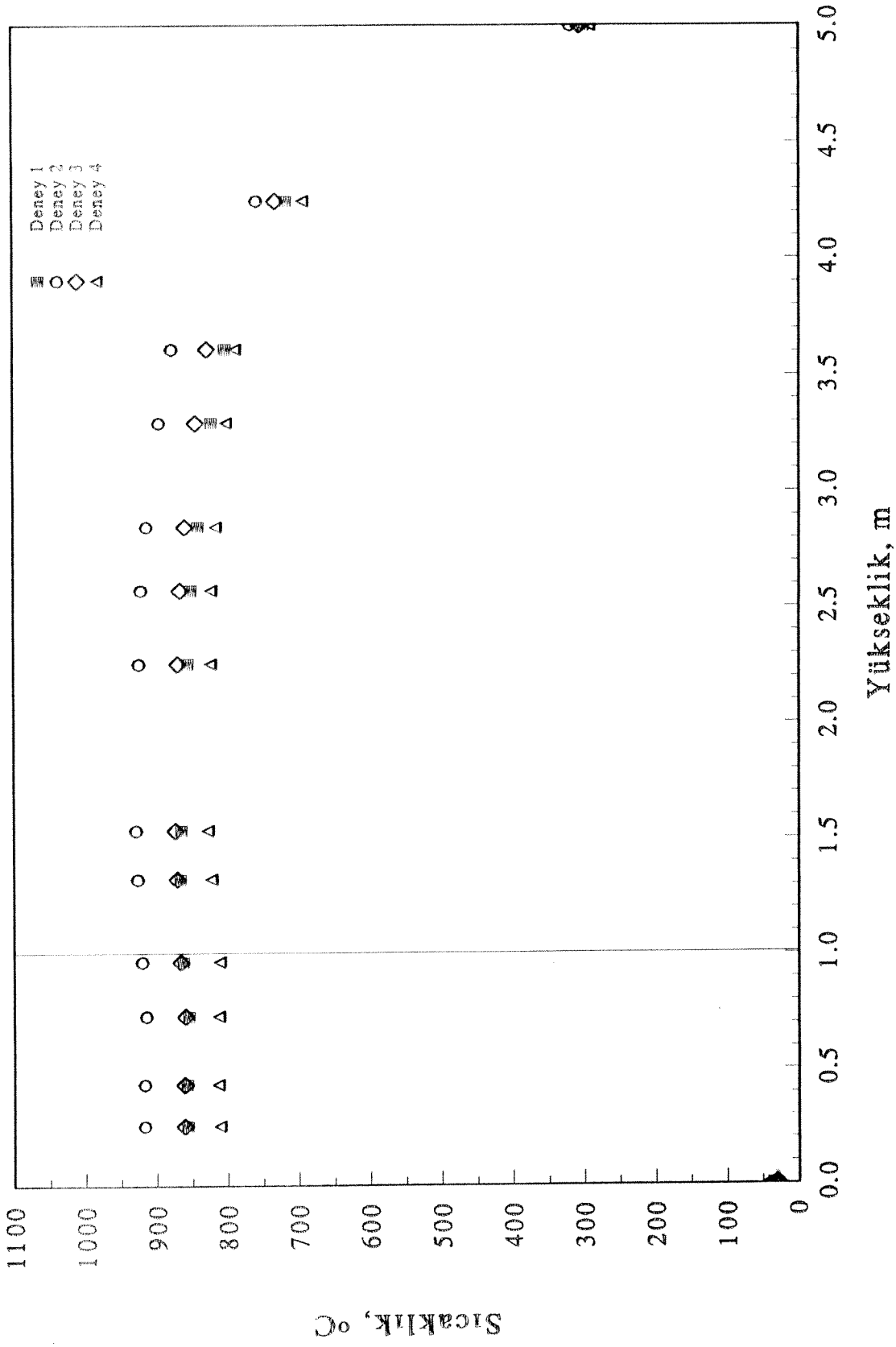
Şekil 4 ise tüm deneylerde ölçülen sıcaklık dağılımlarını göstermektedir.

2.3 NO_x Dağılımları

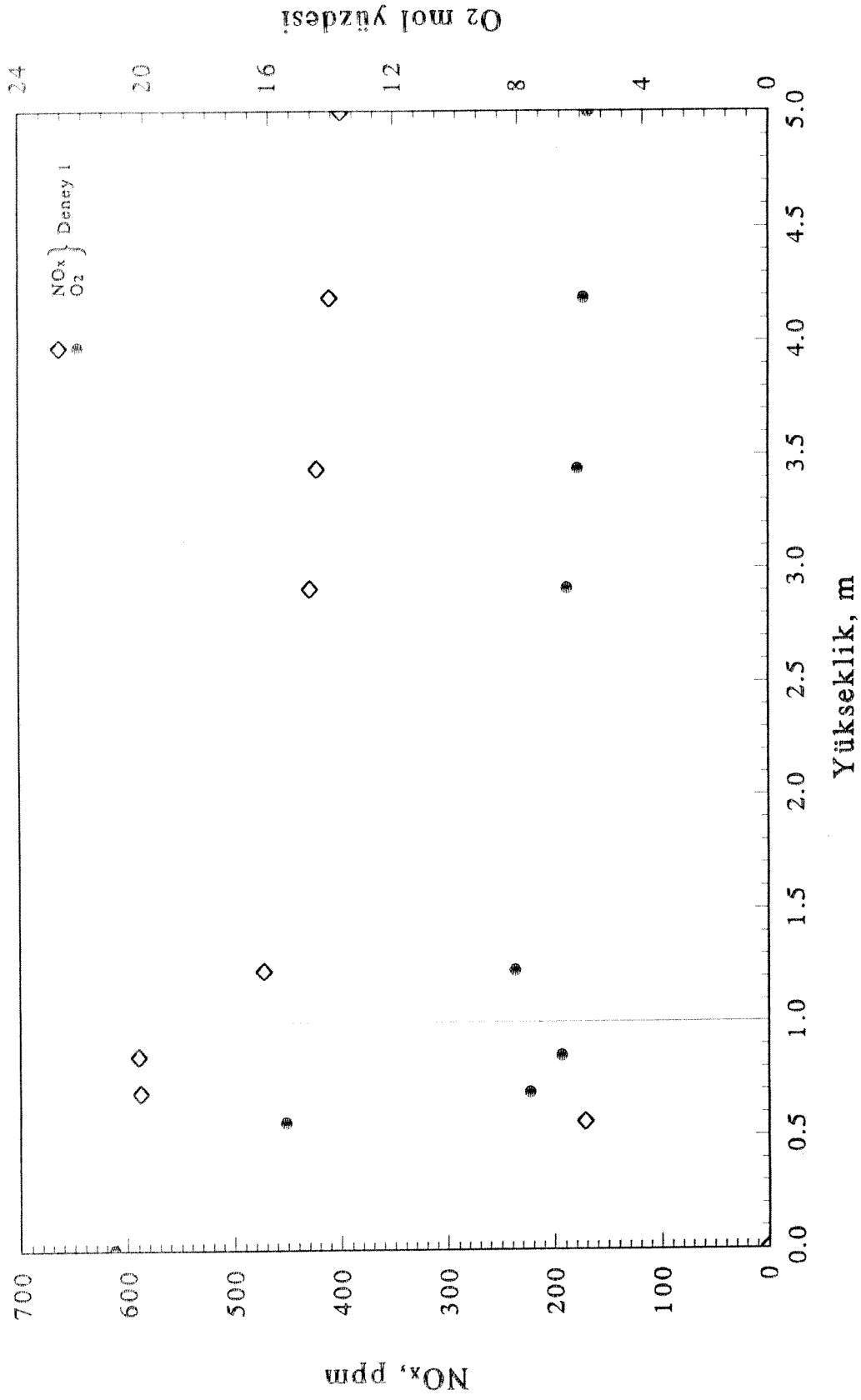
Şekil 5 ve 6 sırasıyla Deney 1 ve 3 için yakıcı boyunca NO_x ve O₂ dağılımlarını göstermektedir. Bu dağılımları yorumlamadan önce özellikle yatak bölgesinden alınan ölçümlerin kabarcıklı akışkan yataktan nasıl etkilendiğini açıklığa kavuşturmakta yarar görülmektedir. Geçmiş tecrübeler (Selçuk ve Kırmızıgül, 1991) yataktan çekilen gaz örneklerinin kabarcık ve tanecik yoğun olmak üzere iki fazdan örnekleme sonucunu göstermiştir. Yataktan çekilen gaz örneklerindeki konsantrasyonları belirleyen en önemli iki faktör kabarcık boyutu ve yatak boşluğudur. Yatak yüksekliği boyunca değişen kabarcık boyutu; iki faz arasındaki kütle transferini ve kabarcık yükselme hızı ve dolayısıyla kabarcığın yataktaki sonda ile temas süresini etkiler. Örneğin, dağıtıcı plakasının hemen üzerinde kabarcık boyutu küçük olduğundan, iki faz arasındaki gaz değişimi hızlı ve kabarcık yatakta kalma süresi uzundur. Bu nedenle yatağın alt bölgelerine yerleştirilmiş olan bir sondanın her iki faz gazının mükemmel karışmış örneğini çekme olasılığı yüksektir. Kabarcık yükselirken boyutu artacağından kabarcığın yatakta kalma süresi ve dolayısıyla sonda temas süresi azalır. Ayrıca, kabarcık boyutunun artması fazlar arası gaz değişimini de azaltır. Bu nedenle, yatağın yukarıdaki sondalardan alınan örneklerde tanecik yoğun fazın katkısı artar. Linyit taneciklerinin yanması tanecik yoğun fazda gerçekleştiği için yatak yüksekliği ile NO_x'in arttığı oksijenin ise azaldığı gözlenmiştir. Yatak çıkışında patlayan kabarcıklarla her iki fazın birbirine karışması, ölçülen NO_x değerlerinde azalmaya, O₂ değerlerinde ise artmaya neden olmaktadır. Bu da NO_x'in daha ziyade tanecik yoğun fazda oluştuğunu göstermektedir. Bu bulgu da geçmiş çalışmalarla uyum içindedir (Gibbs ve diğ., 1975).



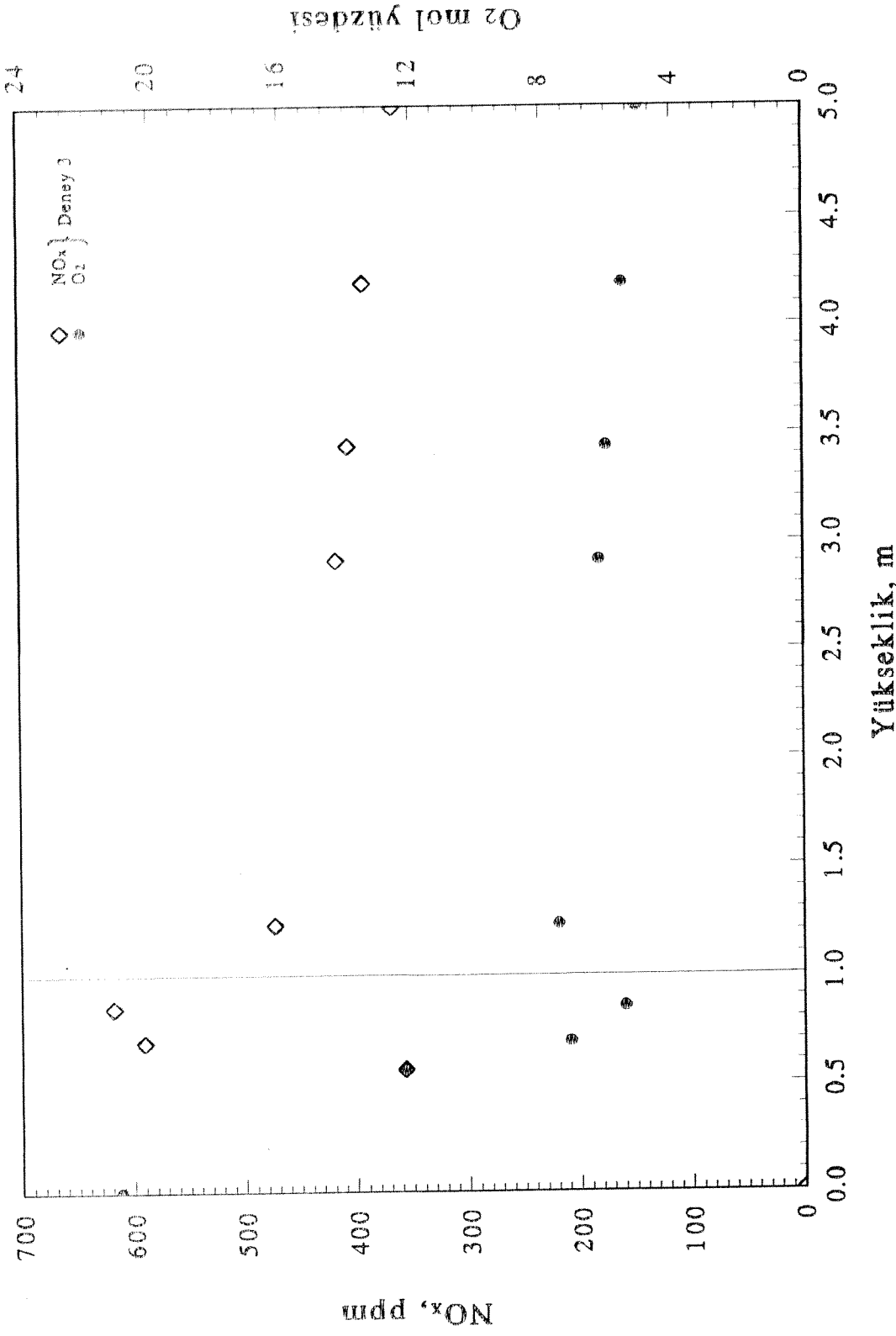
Şekil 3. O₂, CO ve CO₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değışimi (kuru baz).



Şekil 4. Yakıcı boyunca sıcaklık dağılımları.



Şekil 5. Deney 1 için yakıcı boyunca ölçülen NO_x ve O₂ miktarları (kuru baz)..



Şekil 6. Deney 3 için yakıcı boyunca ölçülen NO_x ve O₂ miktarları (kuru baz).

2.4 Hava Fazlasının NO_x Emisyonu Üzerine Etkisi

Hava fazlasının NO_x emisyonuna etkisi, yakıcının diğer işletme parametreleri sabit tutularak iki hava fazlası değerinde çalıştırılmasıyla incelenebilmiştir. Deney 1 ve 2, sırasıyla % 22 ve % 8 hava fazlası koşullarında yapılmıştır. Şekil 7 Deney 1 ve 2 için ölçülen NO_x emisyonlarını göstermektedir. Hava fazlasının %22'den %8'e düşürülmesiyle yatak sıcaklığının artmasına rağmen NO_x emisyonunun 399 ppm'dan 341 ppm'a düştüğü görülmektedir. NO_x emisyonunun sıcaklıktan ziyade hava fazlasından etkilenmesinin temel nedeni yakılan linyitin yüksek uçucu madde içeriği olduğu düşünülmektedir. Zira uçucu maddesi yüksek olan kömürlerin yanmasında oluşan NO_x'in büyük bir kısmı uçucu maddeden kaynaklanmaktadır. 750°C'in altında uçucu madde linyiti terkeder ve yanar. Bu nedenle, çalışılan sıcaklıklarda (857°C, 918°C) NO_x oluşumu sıcaklıktan çok az etkilenir. Nitekim, Hampartsoumian ve Gibbs'in (1984) değişik kalitede kömürleri yakarak akışkan yatakta gerçekleştirdiği çalışmada, uçucu maddesi yüksek olan kömür için NO_x emisyonunun 750-900°C arasında sıcaklıkla değişmediğini göstermiştir. Tablo 6 yapılan deneylerde yakıt azotunun NO_x'e dönüşen yüzdesinin baca gazı oksijeniyle değişimini göstermektedir.

Tablo 6. Yakıt azotunun NO_x'e dönüşen yüzdesi.

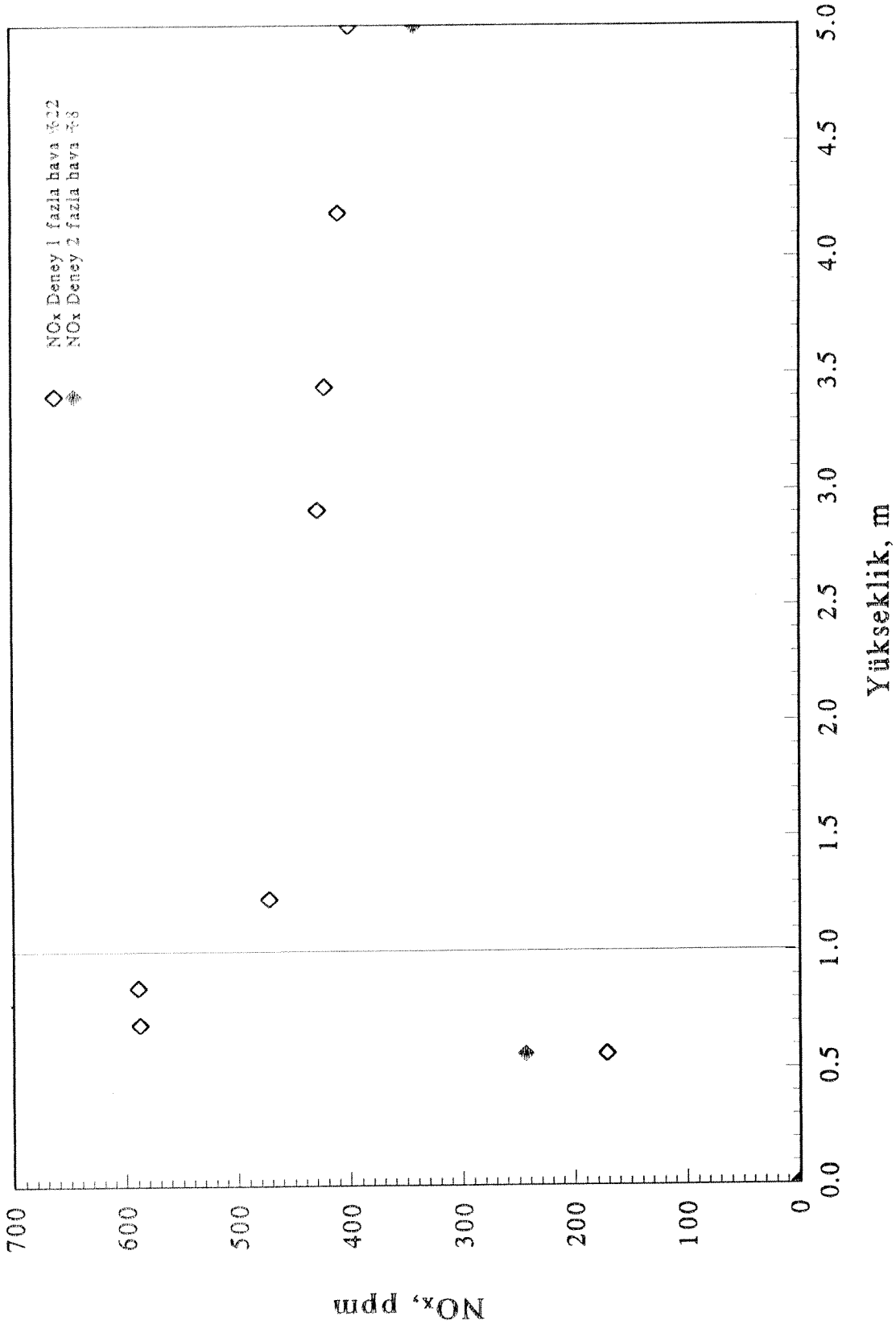
Baca gazı oksijeni, % (kuru baz)	Fazla hava, %	NO _x 'e dönüşen yakıt azotu, %
5.8	22 (Deney 1)	9
3.3	8 (Deney 2)	6

Tablodan görülebileceği gibi dönüşen miktar hava fazlasıyla artmaktadır. Bu bulgu Hampartsoumian ve Gibbs'in (1984) bulgularıyla uyum içindedir.

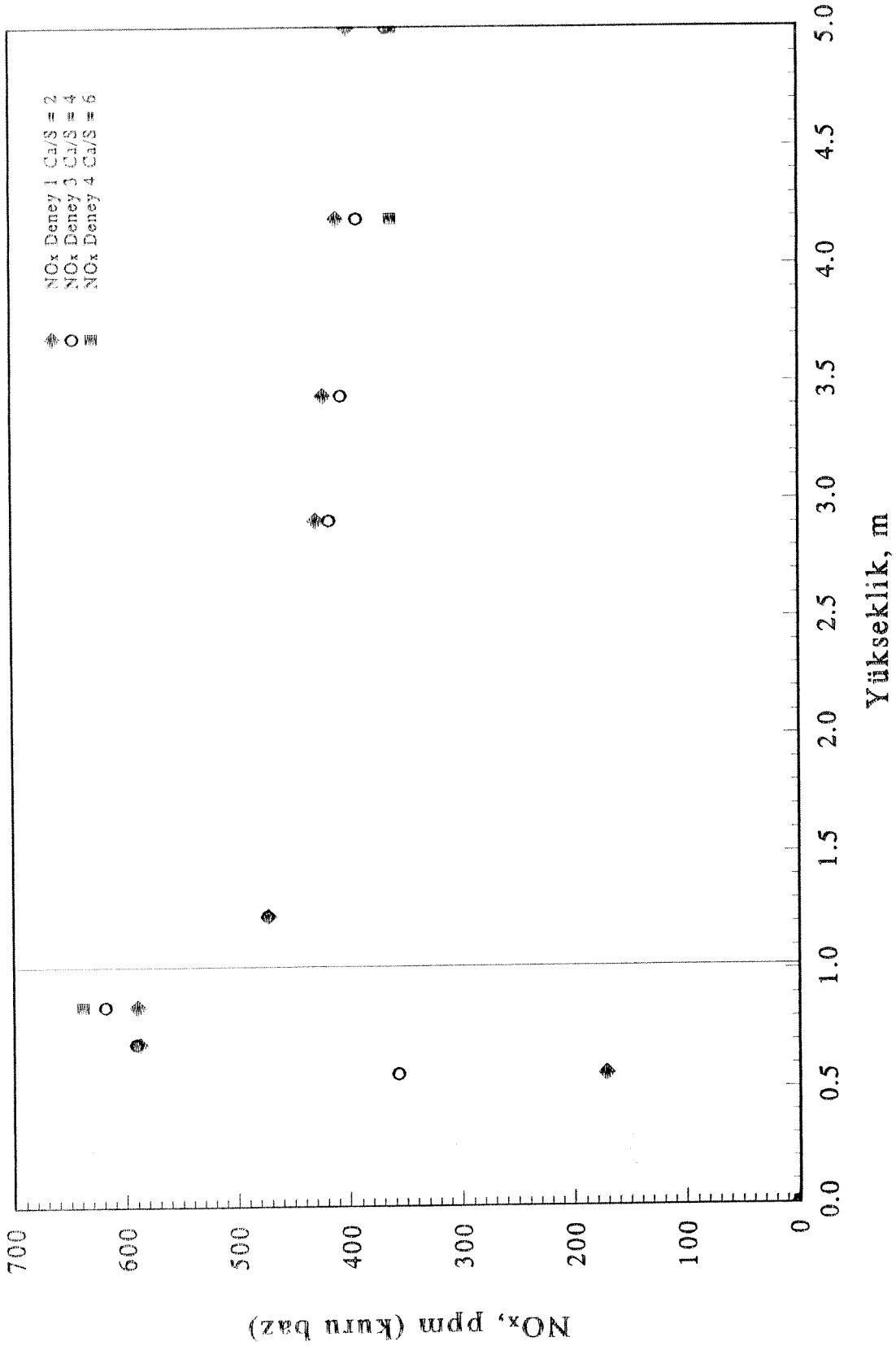
Sonuç olarak, uçucu madde içeriği yüksek olan linyitlerin NO_x emisyonunu etkileyen ana parametre fazla hava miktarıdır.

2.5 Kireçtaşı Katkısının NO_x Emisyonu Üzerine Etkisi

Şekil 8 sırasıyla kireçtaşı katkısız (Deney 1, Ca/S=2.0), ve artan kireçtaşı katkısı (Deney 3, Ca/S=4; Deney 4, Ca/S=6) ile sabit hava fazlası koşullarında yapılan deneylerde yatak ve serbest bölgede ölçülen NO_x miktarlarını göstermektedir. Hava fazlasının her deneyde aynı olduğu dikkate alındığında yataktaki NO_x miktarını etkileyen en önemli parametreler sıcaklık ve kireçtaşı miktarıdır. NO_x'un her iki parametre ile de artması beklenmektedir. Ancak Şekilden de görülebileceği gibi, kireçtaşı katkısıyla yatak sıcaklığının düşmesine rağmen NO_x miktarı artmaktadır. Bu artış, yatakta kireçtaşı katkısının sıcaklıktan daha etkili bir parametre olduğunu göstermektedir. Kireçtaşının NO_x oluşumu



Şekil 7. Deneý 1 ve 2 için yakıcı boyunca ölçülen NO_x miktarları (kuru baz).



Şekil 8. Deneysel 1, 3 ve 4 için yakıcı boyunca ölçülen NO_x miktarları (kuru baz)

üzerindeki etkisi, linyitin uçucu maddesinden kaynaklanan muhtemel HCN ve NH₃'in kireçtaşı katalizörlüğünde oksitlenerek NO oluşturması şeklinde açıklanabilir. Bu bulgu literatürdeki çalışmalarla uyum içindedir (Shimizu ve diğ., 1993, 1995, Pereira, 1975). Diğer taraftan, serbest bölgede yapılan ölçümler NO_x'in kireçtaşı katkısı ile azaldığını göstermektedir. Serbest bölge yatak gibi kireçtaşı tanecik yoğun bölge olmadığından kireçtaşının etkisi kaybolmakta ve NO_x oluşumunu etkileyen tek parametre olarak sıcaklık kalmaktadır. Sıcaklığın kireçtaşı ilavesiyle düşmesi NO_x miktarının azalmasına yol açmaktadır.

Sonuç olarak, emisyon bazında değerlendirme yapıldığında, kireçtaşı ilavesinin NO_x emisyonunu azalttığı ortaya çıkmaktadır.

2.6 Serbest Bölgede NO_x İndirgenmesi

Serbest bölgede iki faz örnekleme problemi olmadığından, NO_x azalmasını belirleyen faktör kimyasal indirgenmedir. Kimyasal indirgenme ile NO_x'in yokolması aşağıdaki oranla belirlenebilir:

$$\frac{(\text{ppm NO}_x)_{\text{yatak çıkışı}} - (\text{ppm NO}_x)_{\text{ Baca gazı}}}{(\text{ppm NO}_x)_{\text{yatak çıkışı}}} \times 100\%$$

Deney 1 ve 3 için NO_x'in serbest bölgede dönüşümü %16 ve %23 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerden uçucu maddesi yüksek olan linyitin serbest bölgede yokolma yüzdesinin oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ancak yokolma nedeninin NO_x/kok veya NO_x/uçucu madde reaksiyonundan kaynaklanabileceği göz önüne alındığında, serbest bölgedeki kok miktarının yatak bölgesine kıyasla düşük olması nedeniyle, NO_x yokolmasının nedeninin NO_x/uçucu madde reaksiyonu olduğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca NO_x'in CO ile yok edilmesi, serbest bölge için kok taneciği azlığı ve NO/CO homojen reaksiyonunun yavaşlığı nedeniyle etkili görünmemektedir.

2.7 NO_x Emisyonları

Tablo 7 deneylerde ölçülen NO_x emisyonlarını mgNO₂/m³ cinsinden göstermektedir. Tabloda ayrıca Türkiye için 500 MW ısı gücünde ısı güce sahip yeni tesisler için emisyon standardı aralığı verilmektedir (Topper ve diğ., 1994).

Tablo 7. Deneylerde ölçülen NO_x emisyonları (mgNO₂/m³)*.

Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Emisyon Aralığı
803	594	701	522	750-1690

* Baca gazında, kuru bazda %6 O₂ ve standart koşullarda

Tablodan görülebileceği gibi deneylerde ölçülen NO_x emisyonlarının hepsi Türkiye için belirtilen emisyon aralığının içine düşmektedir. Deney 1'in kireçtaşı katkısız deney olduğu ve kömürün kükürt içeriğinin yüksek olması nedeniyle akışkan yataklı yakıcıların mutlaka kireçtaşı katkılı çalıştırılması gerektiği dikkate alındığında kireçtaşı katkılı Deney 3 ve 4'ün NO_x emisyonlarının alt sınırının da altında olduğu görülmektedir.

Genelde emisyon değerleri baca gazına dayandırılarak mgNO₂/m³ cinsinden ifade edilmektedir. Ancak enerji üretim tesislerinde emisyonların 1 MJ ısı girdi bazında ifade edilmesi daha gerçekçi bir göstergedir. Bu nedenle deney emisyonları (mgNO₂/MJ) cinsinden hesaplanmış ve Tablo 8'de özetlenmiştir. Karşılaştırma için ise Türkiye değerleri bulunamadığından literatürde mevcut Almanya ve Amerika aralıkları kullanılmıştır.

Tablo 8. Deneylerde ölçülen NO_x emisyonları (mgNO₂/MJ)*.

Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Almanya	Amerika
387	249	333	365	80-580	240-380

*Baca gazında, kuru bazda %6 O₂ ve standart koşullarda

Tablodan görülebileceği gibi kireçtaşı katkısız deney dışında tüm emisyonlar Almanya ve Amerika yönetmeliklerince belirlenen aralığın içine düşmektedir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

3.1 Sonuçlar

Projede elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Linyit taneciklerinin yanması tanecik yoğun fazda gerçekleştiği için yatak yüksekliği ile NO_x'in arttığı oksijenin ise azaldığı gözlenmiştir. Yatak çıkışında patlayan kabarcıklarla her iki fazın birbirine karışması, ölçülen NO_x değerlerinde azalmaya, O₂ değerlerinde ise artmaya neden olmaktadır. Bu da NO_x'in daha ziyade tanecik yoğun fazda oluştuğunu göstermektedir.
2. Deneylerde kullanılan Beypazarı linyiti gibi uçucu maddesi yüksek olan kömürlerin yanmasından oluşan NO_x'in büyük kısmı uçucu maddelerden kaynaklanmaktadır. Uçucu madde 750°C'm altında linyiti terkedişinden çalışılan sıcaklıklarda NO_x oluşumu sıcaklıktan etkilenmemektedir.
3. Baca gazındaki NO_x emisyonu hava fazlası ile artmaktadır. Bu da yakıt içeriğindeki azotun NO_x'e dönüşüm oranının hava fazlasıyla artmasından kaynaklanmaktadır.
4. Yatak bölgesinde NO_x derişimi kireçtaşı ilavesiyle artmaktadır. Serbest bölgede ise kireçtaşı katkısının artması sıcaklığı düşürmekte ve bu bölge tanecik yoğun faz olmadığından NO_x emisyonu azalmaktadır.

5. Tüm deneylerdeki NO_x emisyonları günümüzdeki ulusal ve uluslararası emisyon standartlarını sağlamaktadır.

3.2 Öneriler

Önümüzdeki yıllarda NO_x emisyonları için halen yürürlükte olan sınır değerlerinin daha düşük seviyelere indirilebileceği göz önüne alındığında, azot oksit oluşumunu azaltacak tedbirlerin şimdiden alınması gereği ortaya çıkmaktadır. Bitirilen bu çalışmanın sonuçları ışığında aşağıda önerilen araştırmaların yapılmasında yarar görülmektedir.

1. NO_x emisyonlarının azaltılabilmesi için gerekli olan kademeli hava besleme yönteminin uygulanarak, NO_x dağılımlarını veren ölçümlerin alınması.
2. Daha ziyade kademeli hava besleme yönteminde ortaya çıkan ve sera etkisinin artması ile ozon tabakasının incelmeye neden olduğu öne sürülen N₂O dağılımlarının veya emisyonlarının ölçülmesi.
3. Linyitin uçucu madde içeriğinin homojen gaz fazı reaksiyonları üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için HCN ve NH₃ gibi gazların derişimlerinin ölçülmesi.
4. Azot oksit emisyonlarının aynı anda cereyan eden homojen ve heterojen reaksiyonlardan kaynaklanması; bu reaksiyonların emisyon üzerine olan etkilerinin tek tek incelenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle NO_x emisyonlarının deneylere paralel olarak matematiksel modelleme aracılığı ile incelenmesi.

4. KAYNAKLAR

1. Badr O., Probert S.D., Oxides of Nitrogen in the Earth's Atmosphere: Trends, Sources, Sinks and Environmental Impacts, *Applied Energy*, 46, pp: 1-67, (1993).
2. Gibbs B.M., Pereira F.J., Beer J.M., Coal Combustion and NO formation in an Experimental Fluidized bed, *Inst. Energy. Symp. Ser.No. 1, Fluidized Combustion*, (1975).
3. Hampartsoumian E., Gibbs B.M., NO_x Formation and Reduction in Fluidized Bed Combustors, *Journal of the Institute of Energy*, 57(12), pp: 402-410, (1984).
4. Johnsson J.E., Formation and Rediction of Nitrogen Oxides in Fluidized Bed Combustion, *Fuel*, 73, pp. 1398-1415, (1994).
5. Leckner B., Amand L.E, Emissions from a Circulating and a Stationary Fluidized Bed Boiler: A comparison, *9th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, (ed. J.P. Mustonen), ASME, (1987), pp. 891-897.
6. Pereira F., *Nitric Oxide Emissions From Fluidised Coal Combustion*, (Ph.D. Thesis), Univ. of Sheffield, Dept. of Ch.E. and Fuel Tech, (1975).

7. Selçuk N., Kırmızıgül Ü., Characteristics of a fluidized bed combustor burning low quality lignite, *Journal of the Institute of Energy*, 64(9), pp: 151-156, (1991).
8. Shimizu T., Fujita D., Ishizu K., Kobayashi S., Inagaki, M., Effect of Limestone Feed on Emissions of NO_x and N₂O from a Circulating Fluidized Bed Combustor, *Proc. 12th Int. Conf. Fluidized Bed Combustion*, (1993), pp 611-617.
9. Shimizu T., Miura M., Togashi T., Tonsho M., Inagaki, M., Simultaneous Reduction of Emissions of SO₂, NO_x and N₂O from Fluidized Bed Combustors, *Proc. 13th Int. Conf. Fluidized Bed Combustion*, (1995), pp: 1083-1090.
10. Smith I.M., Thambimuthu K.V., Greenhouse Gas Emissions, Abatement and Control: The Role of Coal, *Energy and Fuels*, 7, pp: 7-13, (1993).
11. Topper J.M., Cross P.J.I., Goldthorpe S.H., Clean Coal Technology for Power and Cogeneration, *Fuel*, 73(7), pp: 1056-1063, (1994).

EK 1

RAPOR SONUÇLARININ UYGULAMAYA DÖNÜŞTÜRÜLMESİ İÇİN GEREKLİ ÖNERİLER

Daha çok Kuzey Amerika ve Avrupa'nın kaliteli kömürleri için geliştirilmiş olan kazan tasarımlarının lisansı ile ülkemizde kurulmuş olan kazanların emisyon yönünden denetiminin sağlanması ve bu raporda verilen sonuçlara göre uygulayıcıların işletme koşullarında gerekli değişikliklere zorlanması, kurulmakta ve kurulması planlanan akışkan yataklı kazan tasarımlarının ise işletmeye alınmadan önce ülkemiz linyitlerine adaptasyonu için, uygulayıcıların bu konuda uluslararası ve ulusal araştırmalar yapan uzman kuruluşlarla temasının sağlanması gerekmektedir. Bu konuda TÜBİTAK'ın katkısı, akışkan yataklı yakıcı teknolojisinin Türk linyitlerine adaptasyonu için gereken tüm verilerin elde edilebileceği donanıma haiz pilot ölçekli sistemlerde yapılacak araştırmaların desteklenmesini sağlamak olacaktır.

EK 2

ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ARAŞTIRMA FONU PROJESİNİN KATKISI

T.C.
ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
ARAŞTIRMA FONU PROJESİ RAPORU

BU FORM PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ TARAFINDAN PROJE BAŞLANGIÇ TARİHİNDEN İTİBAREN
HER ALTI AYDA BİR DOLDURULARAK BÖLÜM BAŞKANLIĞINA SUNULACAKTIR.

1. PROJE YÜRÜTÜCÜSÜNÜN

Adı: Nevin	Soyadı: Selçuk	Ünvanı: Prof.Dr.
Fakülte: Mühendislik	Bölüm: Kimya Müh.	Telefon: 2603
İmza:		

2. PROJENİN ADI

Linyitle yakılan akışkan yataklı yakıcılarda azot oksit (NO_x)
emisyonlarının belirlenmesi

3. Proje No: AFP - 96-03-04-03	Süresi: 12+6(uzatma)..ay
Başlama Tarihi: 1.6.1996	Bitiş Tarihi: 31/12./1997
Raporun Kapsadığı Dönem: 1....../.6../1996.. - 31 ./12./1997 .	
Tahsis edilen ödenek: 875.000.000 .....TL	Harcanan miktar: 875.000.000 TL
0 GELİŞME RAPORU	☒ SONUÇ RAPORU

4. EK (RAPOR)

1. Giriş
2. Proje Ekibi
3. Projedeki Bilimsel Gelişmeler ve/veya Sonuçlar
4. Projedeki Mali Gelişmeler (Satın alınan teçhizat ve diğer harcamalar)
5. Proje kapsamında yapılan yayınlar
6. Proje kapsamında yürütülen lisansüstü tezler hakkında bilgiler
7. Değerlendirme
8. Sonuç
9. Öneriler

BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU

1- Proje No: MİSAG-89

2- Rapor Tarihi: 2 Şubat 1998

3- Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 2 Eylül 1996 - 2 Şubat 1998

4- Projenin Adı: Linyitle Yakılan Akışkan Yataklı Yakıcılarda Azot Oksit (NO_x) Emisyonlarının Belirlenmesi5- Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Prof.Dr. Nevin Selçuk, Araş.Gör. Engin Değirmenci,
Araş.Gör. Olcay Oymak, Araş.Gör. Levent Organ

6- Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 06531

7- Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 06531

8- Öz (Abstract):

Bu çalışmada ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde kurulu olan 0.3 MW ısı gücündeki akışkan yataklı yakıcı üzerinde tipik bir Türk linyitini temsil eden kül, uçucu madde ve kükürt içeriği kaliteli kömürlere göre yüksek olan Beypazarı linyitinin yakılmasıyla ortaya çıkan NO_x ve diğer baca gazlarının (CO₂, CO, O₂ ve SO₂) emisyonları on-line ölçümlerle belirlenmiştir. NO_x'in yakıcı boyunca dağılımının ve baca gazındaki emisyonunun fazla hava ve kireçtaşı katkısı ile değişimi incelenmiştir. Bulgular, NO_x'in daha ziyade linyitin uçucu madde içeriğinden kaynaklandığını ve bu nedenle NO_x oluşumunun çalışılan sıcaklık aralığında (857-918°C) sıcaklıktan etkilenmediğini göstermiştir. Baca gazındaki NO_x emisyonunun hava fazlasıyla arttığı, kireçtaşı katkısıyla da azaldığı tesbit edilmiştir. Ölçümlerle belirlenen baca gazı emisyonları, günümüzdeki ulusal ve uluslararası standart aralıklarıyla karşılaştırılmış ve izin verilebilir değerlerin altında kaldığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: NO_x emisyonu, akışkan yataklı yakıcı, linyit.

9- Proje ile ilgili Yayın/Tebliğlerle ilgili Bilgiler: Yayın, proje raporunun teslimini takiben ele alınacaktır.

10-Bilim Dalı: Temel İşlemler ve Termodinamik

Doçentlik B. Dalı Kodu: 603 01 02

Uzmanlık Alanı Kodu: 603 01 02

11-Dağıtım (*): Sınırlı Sınırsız

TEAŞ Genel Müdürlüğü, TEAŞ Çayırhan İşletmesi, TKİ Genel Müdürlüğü

12-Raporun Gizlilik Durumu:

 Gizli Gizli Değil

(*) Projenizin Sonuç Raporunun ulaştırılmasını istediğiniz kurum ve kuruluşları ayrıca belirtiniz