

59808

ELBİSTAN LİNYİTİNİN OLUŞTURDUĞU KİRLETİCİLERİN
AKIŞKAN YATAKLI BİR SİSTEMDE KONTROLÜ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Derya ERÇİKAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Ekim 1993

Tezin Savunulduğu Tarih : 4 Şubat 1994

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ekrem Ekinci

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Tefik Bardakçı

Prof. Dr. F. Osman Genceli

ŞUBAT 1994

ÖNSÖZ

Gittikçe artan çevre sorunlarının çözümler beklediği günümüzde akışkan yataklı yakıcıların kullanılması ile geleneksel sistemlere oranla daha etkin yanma ve daha temiz bir çevre sağlanabilmektedir. Son derece güncel olan böyle bir konuda doktora çalışması yapmama olanak sağlayan, öğrenciliğim ve daha sonraki lisans üstü çalışmalarımın her döneminde yurt içi ve yurt dışında her türlü desteğini gördüğüm değerli hocam Prof. Dr. Ekrem EKİNCİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Desteğini hiçbir zaman unutamayacağım Temel İşlemler Ana Bilim Dalı merhum başkanı, Türk Kimya Mühendisliğinin gururu mümtaz insan Prof. Dr. İhsan ÇATALTAŞ'ı rahmetle anıyorum. Temel İşlemler Ana Bilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Nursen İPEKOĞLU ve öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunuyorum. Tezimin çeşitli aşamalarında yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Hüsnü ATAÖL, Doç. Dr. Hasancan OKUTAN, Yrd. Doç. Dr. M. Ferhat YARDIM, can dostlarım Kim.Yük. Müh. Ahmet SİRKECİOĞLU ve Kim. Yük. Müh. Burak DÜRÜS'e, yardımlarından dolayı Prof. Dr. Sadriye KÜÇÜKBAYRAK, Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ERSOY MERİÇBOYU ve Kim. Yük. Müh. Çiğdem ŞENTORUN'a sonsuz teşekkürler ederim. Çeşitli yardımlarından dolayı Teknisyen Hanife AKSU'ya, yardımları ve elektrik çarpması sırasında hayatımı kurtaran Teknisyen Murat İSTANBULLU'ya, mekanik konularda hiç eksilmeyen desteklerinden dolayı Atölye Şefimiz Mustafa TÜRKER'e, desteklerinden dolayı İsmail ARSLAN, Teknisyen Şenel KARANCI ve Teknisyen Levent DİNÇER'e, SEM, XRD ve BET analizleri konusundaki yardımları için Prof. Dr. Adnan TEKİN'e, Kim. Müh. İsmail BÜLBÜL, Kim. Yük. Müh. Bilgin HİLMİOĞLU, Kim. Yük. Müh. Cemile YERLİKAYA, Kim. Yük. Müh. Nalan ERDÖL ile Kim. Müh. Fatih ÖNDER ve Kim. Müh. Murat ÇONGAR'a minnet borçluyum. Tezimin gerçekleşmesi sırasında sonsuz sabır ve desteklerini esirgemeyen sevgili eşim Perizat ERÇİKAN ve oğlum Barış ERÇİKAN'a teşekkürlerimi sunuyorum. Eğitimim ve yetişmemde büyük payları olan aileme de teşekkürü bir borç bilirim.

Derya Erçikan

Şubat 1994

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ	
1.1 Giriş	1
1.2 Amaç	3
BÖLÜM 2. AKIŞKAN YATAKLI YANMA SİSTEMLERİ VE ÇEVRE KİRLİLİĞİ KONTROLÜ	
2.1. Akışkan Yatak	5
2.2. Akışkan Yatakta Yanma	6
2.3. Çevre Kirliliği ve Kontrolü	8
2.3.1. Yakma Sistemlerinde SO ₂ Yayınımı ve Kontrolü	10
2.3.2. Akışkan Yataklı Sistemlerde SO ₂ Kontrolü	14
2.3.2.1. Sıcaklığın SO ₂ Sıyırma Verimine Etkisi	15
2.3.2.2. Ca/S Oranının SO ₂ Sıyırma Verimine Etkisi	17
2.3.2.3. Sorbent Tanecik Büyüklüğünün SO ₂ Sıyırma Verimine Etkisi	19
2.3.2.4. Yakıt Tanecik Büyüklüğünün SO ₂ Yayınımı ve Sıyırma Etkinliği Üzerindeki Etkisi	20
2.3.3. Yakma Sistemlerinde NO _x Yayınımı ve Kontrolü	21
2.3.4. Akışkan Yataklı Sistemlerde NO _x Kontrolü	25
2.3.4.1. Yatak Sıcaklığının NO _x Yayınımı Üzerindeki Etkisi	25
2.3.4.2. Hava Fazlalığının NO _x Yayınımı Üzerindeki Etkisi	27
2.4. Akışkan Yataklı Sistemler İçin Yapılan Modelleme Çalışmaları	28
BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	
3.1. Linyit ve Yatak Malzemeleri	30
3.2. Numunelere Uygulanan Analizler	30
3.2.1. Linyite Uygulanan Analizler	30
3.2.1.1. Kısa ve Elementel Analizler ve Isıl Değer Tayinleri	30
3.2.1.2. Linyit Boyut ve Yoğunluk Tayinleri	31
3.2.2. Külde Yapılan Analizler	31
3.2.2.1. Küllerin Kimyasal Analizi	31

3.2.2.2.Özgöl Kül Sıcaklıklarının Tayini	31
3.2.3.Yatak Malzemesine Uygulanan Analizler	31
3.2.3.1. Kuartz, Kireçtaşı ve Dolomitlerin Kimyasal Analizleri	31
3.2.3.2. Kükürt Türlerinin Tayini	34
3.2.3.3.Yatak Malzemelerinin Yüzey Alanı ve Yoğunluk Tayinleri	34
3.3. Deney Düzenegi	34
3.3.1. Akışkan Yatak, Ateşleme, Besleme ve Ölçme Sistemleri	34
3.3.2. Kontrol Üniteleri	38
3.3.3. Gaz Analiz Sistemi	40
3.3.4. Bilgisayarlı Ölçme ve Kontrol Ünitesi	42
3.4. Ölçüm ve Kontrol Programı	43
3.5. Deneylerin Yürütülmesi	45
BÖLÜM 4. YAPI ANALİZLERİ	
4.1. Cıva Porozimetresi Sonuçları	46
4.2.Termogravimetrik Analizler	48
4.3.Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri ve X Işınları İncelemesi Sonuçları	50
4.3.1.Sorbentlere Uygulanan Analizler	50
4.3.2.Farklı Tane Boyutundaki Elbistan Linyitine Uygulanan Analizler	63
4.4. Elbistan Linyitinin Yanabilirliği	66
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ	
5.1.Elbistan Linyitinin Akışkan Yatakta Yanması, Yanma Stabilitesi ve Yayınım	68
5.1.1.Farklı Tane Boyutlarındaki Elbistan Linyitinin Yanma Sürecindeki Davranımı	68
5.1.2.Farklı Tane Boyutlarındaki Elbistan Linyitinin Yakılması ile Oluşan Yayınım	75
5.2.Çeşitli Parametrelerin SO ₂ ve NO _x Üzerindeki Etkisi	77
5.2.1. Ca/S Oranının SO ₂ ve NO _x Yayınımına Etkisi	77
5.2.2. Kireçtaşı Tane Boyutunun Sıyırma Üzerindeki Etkisi	78
5.2.3. Dolomit Tane Boyutunun SO ₂ Sıyrmasına Etkisi	82
5.2.4. Dolomit Kullanıldığında Ca/S Oranının SO ₂ Sıyrmasına Etkisi	89
5.2.5. Ca/S Mol Oranı-NO _x -SO ₂ Etkileşimi	92
5.2.6.Sıcaklığın SO ₂ ve NO _x Yayınımı Üzerindeki Etkisi	94
5.3.Trona'nın SO ₂ Sıyırma Üzerindeki Etkisi	95
5.4.Kararsız Hal Deneyleri	100

5.5.Regresyon Analizleri, Model Denklem Oluşturma alışmaları	103
BÖLÜM 6. GENEL SONUÇLAR	107
BÖLÜM 7.ÖNERİLER	111
KAYNAKÇA	113
EKLER	123
ÖZGEÇMİş	135



ÖZET

Akışkan yatak teknolojisi, dünyada uzun yıllardan beri bilinen, ülkemizde de çeşitli çapta uygulamalara başlanılan temiz ve verimli bir yakma sistemi olarak kabul edilmektedir. Ülkemizin en büyük rezervine sahip Elbistan linyitinin düşük ısı değeri, yüksek kül ve nem içeriğine karşın akışkan yataklı sistemlerde değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmanın amacı ortalama 4600 kJ/kg ısı değere sahip, Elbistan linyitinin 0.2 m çapındaki bir akışkan yatakta yakılarak hava kirletici yayınımların sürekli olarak izlenmesi ve optimum Ca/S mol oranının saptanarak önceden belirlenen sabit sıcaklık, hava hızı ve linyit besleme debisinde SO₂ ve NO_x yayınımlarının azaltılmasıdır.

Yatak malzemesi olarak 3x10⁻⁴-6x10⁻⁴ m ve 6x10⁻⁴-10⁻³ m tane boyutlarındaki kuartz kum kullanılarak 10⁻³-2x10⁻³, 2x10⁻³-3.33x10⁻³ ve 4x10⁻³-5x10⁻³ m tane boyutlarındaki linyit numuneleri yakılmış ve yatak içi sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Beklenenin aksine her üç fraksiyonun da 1123 K sabit sıcaklıkta oldukça kararlı yanma gösterdikleri görülmüştür.

Yapılan bir dizi karakterizasyon çalışması ile mevcut olan kireçtaşı, iki farklı dolomit ve trona numunelerinin yoğunluk ve poroziteleri incelenmiş ve termogravimetrik analizler ile de sorbentlerin oksitlere dönüşüm sıcaklıkları saptanmıştır.

Tane boyutuna bağlı olmakla birlikte akışkan yatakta kalma sürelerinin de etkin olduğu kireçtaşı ve dolomitlerin SO₂ sıyırma etkinliklerinin benzer olduğu gözlenmiştir. Bu durum sorbentlerin yatak içi etkileşim ve ısı şok sonucu ortaya çıkan ufalanma ile de açıklanabilmektedir.

Elbistan linyitinin bünyesindeki CaO içeriğinin yüksek olması SO₂ sıyırma açısından olumlu sonuçlar vermiştir. Stokiyometrik Ca/S mol oranının SO₂ sıyırma üzerindeki etkisi düşük mol oranları için az etkin, yüksek oranlarda ise daha kararlı olmuştur.

Trona kullanımının kireçtaşı ile birlikte Na/Ca oranlarının ayarlanarak yapılması durumunda verimli olduğu, buna karşın tek başına trona kullanımının aglomerasyon riskini ortaya çıkardığı görülmüştür.

Çalışmalar sonucunda etkin bir sıyırma için kararlı yanma şartları ile birlikte sorbentin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin de etkin olduğu saptanmıştır.

CONTROL OF POLLUTANTS OCCURRED DURING THE COMBUSTION OF ELBISTAN LIGNITE USING A FLUIDISED BED COMBUSTION SYSTEM

SUMMARY

Elbistan lignite with 3 billion tons of visible reserves is the largest open mine coal sector in Turkey. Its low calorific value, high moisture and ash content made it quite difficult to obtain beneficial results in the utilisation side.

The aim of this study was to investigate the steady-state combustion and pollution characteristics of Elbistan lignite in a fluidised bed combustor. Elbistan lignite referred as E1 was provided by the Turkish Coal Board, South Eastern Regional Office in K.Maraş, Elbistan. 8 tons of low quality lignite sample was collected from the mixed coal which was used by Turkish Electricity Board (TEK) power plant .

The main reason to carry out a series of experiments was to monitor continuously the emissions which occurred during the combustion of this lignite. It was also aimed to make continuous addition of different sorbents to the bed in order to reduce SO₂ and NO_x emissions.

The fluidised bed combustor used in this work was made of stainless steel tube of 0.2 m diameter and 1 m. high. A 310 stainless steel distributor plate was designed to maintain proper fluidisation and mixing of particles. The experimental rig used in this study consisted of a fluidised bed, a preheating system, lignite and sorbent feeding systems including invertors, pressure transducer, a draft fan and two cyclones. All of these components were fully controlled by means of a data acquisition and control system communicated with a computer.

A computer programme was developed in order to monitor and store the data on coal feeding rate, sorbent feeding rate, air feeding rate, bed and distributor plate pressure drops, sulphur dioxide, nitrogen oxide, carbon monoxide emissions and oxygen percentage . These parameters were continuously visualised from the monitor, printed out and even plotted.

A continuous emission monitoring system was used to determine the pollutants. The gas samples were continuously taken from the exit on the vertical line above the second cyclone.

The effect of particle size, bed material and temperature profiles were determined in order to establish steady-state combustion conditions.

The lignite samples used in this study, prior to experiments, were crushed and sieved to 10^{-3} - 2×10^{-3} , 2×10^{-3} - 3.33×10^{-3} and 4×10^{-3} - 5×10^{-3} m fractions and designated with code numbers N1, N2 and N3 respectively. The proximate analysis of N1, N2 and N3 fractions is given in Table-1. The calorific value of a representative sample is around 4600 kJ/kg. Quartz sand used as bed material and sorbents such as limestone, dolomites (two types referred as D1 and D2) and a nahcolite (trona mineral) were used as sorbents to capture SO_2 . These materials were collected from different regions and were crushed and sieved to 6×10^{-4} - 10^{-3} and 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m fractions.

Table-1- The proximate analysis of three different particle sizes of E1 lignite.

Original (%)	N1	N2	N3
Moisture	18.7	20	21.3
Ash	30.5	39.6	25.0
Volatile Matter	27.5	14	30.5
Fixed Carbon	24.3	26.4	23.2

A series of characterisation work was carried out in order to characterize lignite, sorbents and bed material samples. A mercury porosimeter, a thermal analyser and a scanning electron microscope with EDX facility were used for the characterisation work.

The porosimeter results showed that the original limestone and dolomites had small surface areas before calcination at 1123 K (850 °C). Therefore, after calcination, total surface area of limestone sample slightly increased whereas total surface area of dolomites showed considerable augmentation. Active soda, obtained by the calcination of trona at 523 K (250 °C), had a low surface area after the operation temperature at 1073 K (800 °C) due to pore closure. The maximum pore size was obtained between 423 and 523 K (150-250 °C). It was therefore difficult to obtain promising results by using active soda as a sorbent in a fluidised bed combustor. The addition of limestone or high CaO content of lignites could be a relief for trona mineral in order to prevent the fluidised bed from agglomeration phenomena.

The Na content of the lignite sample is accepted to be a key factor for agglomeration. Hence, the high percentage of Na in trona mineral would have a hindering effect on the behaviour of the bed towards agglomeration.

Thermogravimetric analyses were carried out in a Rigaku thermal analyser. Limestone sample gave a peak at 1099 K (826 °C) due to heat loss with CO_2 release. D1, dolomite originally different from D2, showed two peaks, one at 1043 K (770 °C) for the conversion of MgCO_3 to MgO and the other at 1101 K (828 °C) for the conversion of CaCO_3 to CaO . A third peak occurred at 1122 K (849 °C). At similar conditions, D2 dolomite which was originally soft compare to D1 dolomite presented

a peak at 1041 K (768 °C) for MgCO_3 to MgO conversion , a second and a third one at 1101 K (828 °C) and 1112 K (849 °C) respectively for CaCO_3 to CaO conversion.

The scanning electron microscope analyses and EDX determination provided an information about the relationship between particle size and pore size of the original and calcined sorbents as well as the sulphated ones before and after calcination and after sulphation in the bed. The formation of Ca(OH)_2 enhanced the pore closure. No difference was observed between two particle sizes of sorbents.

The observation of pores in D1 and D2 dolomite samples was not successful due to structural differences between the samples. Micrographs of both samples taken at 1123 and 1173 K were quite similar. Most of the pores was closed and the surface of the particles was quite flat.

The use of trona mineral gave better results as far as the pores were concerned. At 473 K the pore diameter was around 25 μm . However, at temperatures above 1133K (860 °C) the pore closure improved and the particles became massy due to the fusion.

The sulphated samples had a non-porous surface (with pore closure) due to the formation of CaSO_4 layer. The CaO formed white colour regions in the particle which were clearly seen in the micrographs. The raw burnt lignite samples had similar appearance. The micrographs showed that the CaO content of ash is higher than that of original lignite.

The combustibility of Elbistan lignite samples E1 and E2 which have low and high calorific values were determined using La Nauze's diagram. E2 was found more combustible than E1 (the one used in the experimental work). Above all, both samples could provide a heat value which is around 1.3 MW/ m^2 .

Prior to experimental work, lignite samples having different particle sizes with N1, N2 and N3 were combusted without sorbent addition and SO_2 , NO_x and CO emissions were continuously monitored.

The fluidised bed combustion and especially SO_2 removal results showed that limestone, D1 and D2 dolomites have similar sulphur retention efficiencies as far as the particle size was concerned. The attrition phenomena and particle behaviour were quite important for the assessment of SO_2 reduction. The high CaO content of Elbistan lignite increased the SO_2 removal efficiency.

The stoichiometric Ca/S ratio has a crucial effect on SO_2 retention efficiency. Ca/S molar ratios greater than 3.5, SO_2 emissions around 300 mg/m^3 obtained for both limestone particle sizes 6×10^{-4} - 10^{-3} m and 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m . The lignite particle size had an effect on SO_2 retention and 4×10^{-3} - 5×10^{-3} m had the most promising results.

The comparison of D1 and D2 dolomites showed that the sulphur dioxide removal efficiency of the former is better compare to the latter one. D1 dolomite was found to be structurally soft and highly attrition tendent whereas marble-like D2 was

rigid. 4×10^{-3} - 5×10^{-3} m, N3 fraction was the best performed lignite sample as far as the SO_2 emissions were concerned. For D1 dolomite, Ca/S molar ratio of 3.5 was sufficient in order to obtain a SO_2 removal efficiency over 80 % while a Ca/S ratio of 5 and greater was needed for D2 dolomite.

NO_x emissions increased with the decrease in SO_2 emissions. This conclusion is compatible with the findings of some researchers.

Despite its low calorific value, high moisture, ash and comparably high sulphur content, Elbistan lignite can be burned quite satisfactorily in a fluidised bed combustor. The high CaO content reduces the SO_2 emission and consequently reduces the amount of sorbent needed to meet the standards.

The tendency of the fluidised bed towards agglomeration due to an increase in Na content of the bed hindered by trona's chemical composition followed by a breaking-up in hydrodynamic behaviour of the bed was easily visualised from temperature profiles. The Na/Ca molar ratio was adjusted and the presence of Ca behave as agglomeration retardant factor for the whole bed. However, the formation of soda-lime-glass was quite clear from the sample taken from the bed after the occurrence of agglomeration phenomena. This was observed from the samples collected from the bed after agglomeration. The reason for the occurrence of soda-lime-glass was explained by the high Na content of active soda as well as the calcium content of lignite and addition of CaCO_3 which was needed for the proper Ca/S and Ca/Na ratios. There was also another observation on the crucial role of active soda on the activation of sorbents. Therefore, the SEM micrograph of activated soda-limestone mixture after calcination presented open pores compare to raw limestone.

A multiple regression analysis was carried out in order to assess the experimental and theoretical results. The correlation coefficient were found around 0.8. The effect of lignite particle size was observed whereas there was no correlation between SO_2 and sorbent particle size unlike our expectations.

Ca/S molar ratio has a correlation with SO_2 emission. A general equation $\text{SO}_2 = K + AX + BX^2 + CX^3$ (where K,A,B,C were chosen as coefficients and X as Ca/S molar ratio) was developed according to experimental results. Ca/S molar ratio was chosen between 0 and 5. Calculated and experimental data were found compatible even though there was differences in the physical and chemical properties of sorbents. The calcination and sulphation behaviour of limestone, D1 and D2 dolomites also differed due to their particle sizes. Two different particle size for sorbents were used during the experiments. The correlation coefficients were calculated between 0.95 and 0.99.

Another regression analysis were accomplished in order to obtain a correlation between Ca/S molar ratios which were chosen above 2.5. The correlation coefficients were calculated as 0.52 for limestone and 0.36 for both dolomites. As could be seen from the regression coefficients, these results are not acceptable. The reason for these results could be explained by the diversity of the parameters and the complexity of the reactions which occurred during the sorption of SO_2 in a fluidised bed combustor, even in steady-state experimental conditions.

The regression analysis results indicated that the development of a model for the sorption of SO₂ emissions using different sorbents is quite difficult. This is mainly due to the variety of sorbents, lignite and sorbent particle sizes and Ca/S molar ratio. The lignite particle size is an important factor since its ignition and combustion time in the bed differed. The combustion of small lignite particle sizes takes place instantaneously whereas that of the bigger particles combustion proceeds longer. Consequently, the smaller the lignite particle size, the more SO₂ emits.



BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1.Giriş

Dünya enerji kaynakları arasında yüzde 30 gibi önemli bir paya sahip olan kömür toplam enerji tüketimi sıralamasında petrolün (% 40) altında, doğal gaz, hidrolik ve nükleer enerjinin (% 20) ise üzerinde yer almaktadır [1,2]. Kömür rezervlerinin büyüklüğü ve çeşitliliği dolayısı ile her dönemde yerini ve önemini korumuştur. Fosil kaynaklı dünya enerji rezervleri incelendiğinde, kömürün 610 milyar ton, petrolün 121 milyar ton eşdeğer kömür, doğal gazın 100 milyar ton eşdeğer kömür ile toplam 831 milyar ton eşdeğer kömürlük bir miktara ulaştığı görülür [1].

Kömürün günümüze kadar çıkartılması mümkün olan ve belirlenmiş rezervlerinin 1 trilyon ton civarında olduğu hesaplanmaktadır. Mevcut tüketim miktarları devam ettiği takdirde iki asır daha kullanılabileceği düşünülmektedir. Buna karşın diğer yakıtların tüketimi yalnızca birkaç on yıl devam edebilecektir [2].

Bilinen ve tahmin edilen dünya kömür rezervleri son 15 yıl içerisinde iki katına çıkmasına karşın bazı ülkelerin ciddi istatistik bilgilere ve envanterlere sahip olmamalarından dolayı bu miktarın daha da büyümesi mümkün görülmektedir. Örneğin, Botswana'da 100 milyarlarca ton kömür rezervinin bulunduğu fakat hiçbir şekilde değerlendirilmediği ortaya çıkmıştır [2].

Kömür, özellikle birinci ve ikinci petrol krizleri sırasında ortaya çıktığı gibi önemini hiçbir zaman yitirmemiş olup günümüzde geleceğe yönelik birçok araştırmanın konusu olmaya devam etmektedir.

Kömürün yakıt olarak kullanılmasında karşılaşılan en önemli sorun, ciddi çevre kirliliği problemlerine neden olması ve bunun giderilmesinin ekonomik açıdan pahalı olmasıdır.

1 MW elektrik üretmek için kullanılan kömür ve diğer yakıtların neden olduğu kirlilik Tablo 1-1 de verilmektedir.

Tablo 1-1 1 MW/yıl elektrik üretimi karşılığı ortaya çıkan atık bilançosu (Tabloda verilen değerler ton cinsindendir) [2].

Yakıt cinsi	Sera Etkisi, (CO ₂),	Asit SO ₂	Yağmurları NO _x	Katı Atık
Kömür, 3000	9000	60	12-60	150-450
Petrol, 2000	6200	120	10	önemsiz
Doğal Gaz, 1800	4400	4	30	0.5
Uranyum, 36 (kg)	----	--	--	Radyoaktif olmayan

Dünya'daki gelişmelere paralel olarak, katı fosil yakıtların Türkiye'nin enerji planlamasındaki önemi de gün geçtikçe artmaktadır [3]. Türkiye'deki kömür rezervlerinin çoğunluğunun ısı değerlerinin düşük kükürt, kül ve nem içeriklerinin oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. Isıl değerleri 5440 ile 23017 kJ/kg arasında değişirken, en düşük kükürt oranı yüzde 1 seviyelerindedir [4].

Türkiye'nin gelişen endüstrileşme ve nüfus artışına bağlı olarak enerjiye olan gereksinim hızla artmaktadır. Bu amaçla, yakılan düşük kaliteli linyitler yoğun hava kirliliğine neden olmakta ve özellikle Kayseri, Bursa, İstanbul gibi şehirler başta olmak üzere ölümcül boyutlardaki SO₂ yayınımlarına (2000 µg/m³) mertebelerinde rastlanmaktadır [5].

Akışkan yatak teknolojisi, 1928'deki ilk uygulamalarından beri sürekli yeni boyutlar kazanan, ticari uygulamaların dünyada olduğu gibi Türkiye'de de uygulamaya başlandığı temiz bir kömür yakma teknolojisi olarak, geleneksel yakma sistemlerine alternatif olarak kabul edilmektedir [6].

Çin'de 3 ile 30 MW güce sahip endüstriyel ölçekli 2000 akışkan yatak kullanılırken, ABD ve Kanada'da 1997 yılında 400 MW gücünde sistemlerin devreye alınacağı bildirilmektedir [7]. Günümüzde, ABD'de 160 MW gücünde sistemler kullanılırken Türkiye'de özel sektörde, 16 MW maksimum güce sahip yaklaşık 40 civarında akışkan yataklı kazan özellikle buhar üretimi amacıyla kullanılmaktadır [8].

Akışkan yataklı sistemlerde etkin yanmanın sağlanmasının yanında kalsiyum bazlı kireçtaşı ve dolomit gibi sorbentler kullanılarak SO_2 yayınımları CaSO_4 olarak yatak içerisinde tutulabilmekte ve böylece sisteme ayrıca bir baca gazı sıyırma ünitesi ilave etmek gerekmemektedir. Bir diğer kirletici olan NO_x yayınımları, 1273 K sıcaklığın altında çalışıldığından dolayı %50 oranında daha düşük seviyelerde gerçekleşmekte ve genellikle yakıttan kaynaklanan azot oksitleri kapsamaktadır. Çalışma sıcaklığının 1273 K in altında olmasından dolayı havanın azotunun bağlanması gerçekleşmemektedir.

Akışkan yataklı sistemlerde ortaya çıkan kül ve CaSO_4 gibi katı atıklar siklon ve benzeri toz tutma sistemlerinde toplanmakta zaman zaman geri beslenebilmektedir. Sorbent etkinliği açısından geri beslemenin önemi büyük olmaktadır. Özellikle, küllerin çimento sanayinde değerlendirilebilmesi yönünde çalışmalar yapılmaktadır.

Akışkan yataklı sistemlerde son yıllarda ortaya çıkan bir problem N_2O ve Poli aromatik hidrokarbonlar olmaktadır. Ayrıca yüksek miktardaki CO_2 de sera etkisi açısından önemlidir. N_2O in ozon tabakasına verdiği zarar, özellikle siklon küllerindeki ve baca gazındaki kanserojen poliaromatik hidrokarbon yayınımlarının diğer sistemlere kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmektedir [9].

1.2. Amaç

Katı fosil yakıtların enerji tüketimindeki payları oldukça büyüktür. Dünya birincil enerji tüketiminde ikinci, elektrik üretiminde ise ilk sırayı alan kömür Avrupa'daki kullanımının göreceli olarak azaltılmasına karşın gelecekte oldukça önemli rol oynaması beklenmektedir.

Düşük ısı değeri, yüksek kükürt, kül ve nem içeriğine sahip olan linyitlerimiz 7.6 milyar tona varan rezervleri ile önemli bir katı yakıt olarak kabul edilmektedirler.

Çevre açısından temiz bir yakıt olarak kabul edilemeyen linyitlerimizin fiziksel ve kimyasal işlemler yardımı ile temiz bir yakıt haline getirilerek yakılması ekonomik görünmemektedir. Bu yüzden, geleneksel yakma sistemlerine alternatif olarak getirilen akışkan yataklı yakma sistemleri ülkemiz linyitlerinin özellikleri göz önüne alınarak tasarlandıkları takdirde ideal yakıcılar olarak ortaya çıkabilmektedirler.

Bu çalışmanın amacı, ülkemizin 3 milyar ton ile en büyük linyit rezervine sahip olan Elbistan yöresine ait 4600 kJ/kg ısı değeri ve % 3 kükürt içeriğine sahip olan linyit numunesi 3 fraksiyona ayrılarak 0.2 metre çapındaki bir atmosferik akışkan yataklı yakıcıda yakılarak yanma stabilitesinin incelenmesi, farklı tane boyutlarındaki linyitin oluşturduğu yayınımların farklı tane boyutlarındaki sorbentler kullanılarak azaltılmaya çalışılması olmuştur. İncelenen diğer bir konu ise sıcaklık, hava hızı ve linyit ve sorbent besleme debileri sabit tutularak (Ca/S mol oranı optimum olarak seçilerek) SO₂ ve NO_x yayınımlarının zamana karşı sürekli olarak izlenmesi olarak belirlenmiştir. Ayrıca trona minerali kullanılarak sodyum bazlı bir sorbentin akışkan yatak operasyon sıcaklığındaki davranımı ve SO₂ tutmadaki etkisinin incelenmesi de planlanmıştır.



BÖLÜM 2. AKIŞKAN YATAKLI YANMA SİSTEMLERİ VE ÇEVRE KİRLİLİĞİ KONTROLÜ

2.1.Akışkan Yatak

Akışkanlaşma, kısaca katı taneciklerine sıvı davranımı özelliklerini kazandırma olayı olarak tanımlanmaktadır. Akışkanlaştırma, delikli bir plaka üzerinde duran katı tanecikler yığını içinden geçirilen bir akışkan yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Akışkan sıvı veya gaz olabilmektedir. Ancak bu çalışmada, aksi belirtilmedikçe, sözü edilen akışkanlaştırma gazla (hava ile) gerçekleştirilen akışkanlaştırmadır.

Akışkanlaşmada kullanılan dağıtıcı eleğin deliklerinin katı taneciklerin aşağıya düşmesini önleyecek ve gereksiz bir basınç düşüşü yaratmayacak şekilde düzenlenmiş olması gerekmektedir.

Akışkanlaşma çeşitli aşamalardan geçerek gerçekleşmektedir. Akışkanlaştırıcı gaz hızının düşük olduğu durumlarda gaz katı taneciklerinin konumunu önemli bir değişiklik yaratmadan katı tanecik yığını içinden geçerek sistemi terk eder. Bu durumda gazın katı taneciklerine uyguladığı kaldırma kuvveti taneciklerin ağırlığını yenemediği için tanecikler konumlarını korumaya devam etmektedir ve sistem bir "sabit yatak"tır. Akışkanlaştırıcı gaz hızının artırılması durumunda gazın katı taneciklerine uyguladığı kaldırma ve sürüklenme kuvveti taneciklerin ağırlığını dengelemeye başlar ve "genleşmiş yatak" durumu ortaya çıkar. Akışkanlaşma hızı daha da artırılsa belirli bir noktada yukarıda sözü edilen kuvvetler birbirlerini dengeler ve katı tanecikler havada asılı kalırlar. Bu dengenin sağlandığı hız "minimum akışkanlaşma hızı" olarak bilinmektedir. Akışkanlaşma hızının daha da artırılması durumunda taneciklerin taşınmaya başladığı "terminal hıza" ulaşılır ve katı tanecikler sistemden taşınmaya başlarlar. Terminal hızın üstündeki hızlarda sistem bir pnömatik taşıma sistemine dönüşmektedir. Akışkan yatak ,minimum akışkanlaşma hızı ile terminal hız arasındaki hızlarda çalışan bir sistemdir. Akışkanlaştırma ve akışkan yatakların özellikleri ve kullanım alanları konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Sürekli karıştırmalı bir tank reaktörünün bazı özelliklerini gösteren akışkan yataklarda kimyasal reaksiyonların yanısıra kurutma , taşıma, ısı iletimi, sınıflandırma, gazlaştırma, kalsinasyon, adsorpsiyon ve benzeri diğer birçok uygulamalarda

kullanılmaktadır[10-13].

Akışkan yataklı bir yakma sistemi esas olarak, rüzgar odacığı, dağıtıcı elek ve yanma odasından oluşmaktadır. Rüzgar odacığı, havayı yatışkın bir şekilde yatağa ulaştırmak ve uygulandığı hallerde LPG nin hava ile karışmasını sağlamak amacına yönelik olarak üretilmiştir. Dağıtıcı elek, rüzgar odacığı ile yanma odasının arasında yer almaktadır. Görevi, akışkan yatağa beslenen yatak malzemesini taşımak ve bu arada havanın yatak içinde homojen dağılımını sağlamaktır. Dağıtıcı elek, katı taneciklerin aşağıya düşmelerini engelleyecek ve gaz geçişinin kolayca gerçekleşebileceği şekilde tasarlanmaktadır. Akışkan yatağın, dağıtıcı eleğin üzerinde yer alan ve yatak malzemesinin bulunduğu bölgeye yanma odası adı verilmektedir. Uçucu madde yanmasına bağlı olarak serbest bölge olarak adlandırılan bölge de yanma odasının kapsamında kabul edilebilmektedir.

2.2. Akışkan Yatakta Yanma

Karıştırmanın, iyi bir şekilde sağlandığı sürekli karıştırılmalı bir tank reaktörü gibi davranan akışkan yatakta katı taneciklerin reaktörün herhangi bir yerinde bulunabilme şansları birbirine eşittir. Bu nedenle akışkan yatakta son derece iyi bir karışma sağlanabilmektedir. Bu durum akışkan yataklı sistemlerde tekdüze bir sıcaklık dağılımının ve hızlı bir ısı ve kütle iletiminin gerçekleşmesini sağlamaktadır [14]. Akışkan yataklı sistemler geniş bir uygulama alanı bulmaktadırlar [15,16]. Kömür, birincil enerji kaynağı olarak ısı, buhar ve elektrik üretimi açısından çok önemlidir. Bugüne kadar yürütülen ve halen yürütülmekte olan çalışmalar kömürün akışkan yataklı yanma sistemlerde geleneksel yakma sistemlerine oranla çok daha etkin bir şekilde yakılabildiğini ortaya koymuştur [17,18]. Böylece hava kirliliği azaltmak amacı ile düşük kaliteli ve yüksek kükürt içerikli kömür, linyit ve bitümlü şistlerin yakılmaları akışkan yatak teknolojisinin en önemli uygulama alanlarından biri haline gelmiştir [19-23]. Akışkan yataklı sistemler atık uzaklaştırma ve bertaraf etmek amacı ile de kullanılmaktadır [24,25]. Akışkan yatakta yanma sırasında kum, kül, kireçtaşı, dolomit gibi inert maddelerden oluşan yatak malzemesi akışkanlaştırıcı hava yardımı ile akışkanlaştırılarak LPG ile ön ısıtma gerçekleştirilerek kömürün tutuşma sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır [26]. Ön ısıtma için LPG veya sıvı yakıt kullanılabilmektedir. Daha sonra sisteme kömür beslenmeye başlanmakta ve uçucu madde çıkışı ve yanması gündeme gelmektedir. Uçucu madde yanmasından sonra sabit karbon yavaş bir şekilde yanmaya başlamaktadır.

Akışkan yataklı yakıcılarda ön ısıtma yapılmadan önce yatak statik yatak yüksekliği (H_s) olarak tanımlanan yükseklikte inert yatak malzemesi ile doldurulmaktadır. Dağıtıcı elek ile taşma borusu arasında kalan mesafeye dinamik yatak yüksekliği (H_d) adı verilmektedir. Yatakta kalma süresine bağlı olarak kömür taneciklerinin yanması kısa veya uzun süreçlerde gerçekleşmektedir. Kalma süresi, kömür tane boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Küçük tane boyutuna sahip kömürlerin yatakta kalma süreleri dolayısı ile yanma süreçleri daha kısa olmaktadır. Taneciklerinin boyutu büyüdükçe yatakta kalma süreleri artmaktadır. Küçük taneciklerin yataktan taşınması veya taşma borusu vasıtası ile yatağı terk etmeleri söz konusu olmaktadır. Yanmanın sürekli ve kararlı olabilmesi için hava-yakıt oranının iyi olmasının yanında inert yatak malzemesi içindeki kömür taneciklerinin oranının % 2 ile % 5 civarında tutulmaktadır [27,28]. Kömür oranının % 1 olması kararlı yanma için yeterli olmaktadır [29]. Yatak operasyonu 1173-1273 K (900-1000 °C) arasında gerçekleşmektedir. Akışkan yataklı sistemlerde yanan kömür taneciklerinin sıcaklığının ortam sıcaklığından 423-473 K (150-200 °C) daha yüksek olduğu ileri sürülmüştür [30-32].

Akışkan yataklı sistemlerde, operasyon sıcaklığının alt sınırı kömür tutuşma sıcaklığı üst sınırı ise aglomerasyon (sinterleşme) sıcaklığı ile belirlenir. Aşağıda belirtilen nedenlerden dolayı yanma sıcaklığı 1173-1273 K (900-1000 °C) arasında tutulmaktadır [27, 33,34]:

- a) Yanma olayına bağlı olarak ortaya çıkan SO_2 yayınının hava kalitesinin korunması ile ilgili sınırların altına çekilebilmesi amacı ile sisteme beslenen kireçtaşı, dolomit gibi sorbentler 1173-1223 K (900-950 °C) arasında optimum verimle kullanılabilir.
- b) 1273 K (1000 °C) üzerinde havanın azotu oksijenle birleşerek azot oksitleri oluşturmaktadır .
- c) Daha önce belirtildiği gibi yanan kömür taneciğinin sıcaklığı yatak sıcaklığından 150-200 °C daha yüksektir. Operasyon sıcaklığı 1073-1123 K (800-850°C) üzerine çıktığı zaman aglomerasyon tehlikesi ortaya çıkmaktadır[28].
- d) 1273 K (1000°C) üzerinde çalışıldığında kömür bünyesindeki alkali klorür ve sülfatların buharlaşma hızları artmaktadır. Bunun sonucunda, sözü edilen maddeler yatak cidarında ve ısı transfer yüzeyleri üzerinde birikerek korozyona neden olmaktadır [34-37].

Kömürün yandığı akışkan yataklarda iki temel bölgeden söz edilebilir:

1. Aktif Yatak: Bu bölge kömürün inert yatak malzemesi ile karışıp yandığı bölgedir.
2. Serbest Bölge: Aktif yatak yüzeyinin üstünde kalan bölgedir. Uçucu maddeler ve aktif yataktan sürüklenen kömür taneciklerinin yanması büyük ölçeklerde bu bölgede gerçekleşmektedir. Bu bölge aynı zamanda bir ikinci yanma bölgesi olarak da görev yapmaktadır. Kömürün besleme konumuna bağlı olarak bu bölgedeki yanma yoğunluğu değişebilmektedir. Bu bölgede uçucu madde yanması ağırlıklı olarak gerçekleşir[38].

Yanmayı etkileyen önemli faktörler arasında kömür inert madde oranı, akışkanlaştırıcı gaz hızı, kömür ve inert madde boyutu, yakıt ve kül özellikleri, kömür besleme şekli, yatak sıcaklığı, dağıtıcı elek ve yatak geometrisi sayılabilir [39].

Uçucu madde yanması çok kısa bir süre içinde gerçekleşirken (3-20 saniye) geriye kalan yarıkok (orijinal taneciğin yaklaşık % 50'si) yanması uzun zaman dilimlerinde (dakikalar mertebesinde) gerçekleşebilmektedir [26, 35, 40]. Pillai [41] tutuşma sıcaklığına kadar ısıtılmış bir akışkan yatağa beslenen linyit taneciğinin yanma aşamalarını inceleyerek uçucu madde ve sabit karbon yanma rejimlerine bazı açıklamalar getirmiştir.

2.3. Çevre Kirliliği ve Kontrolü

Yakıt veya enerji tüketimi günümüzdeki hızıyla devam ettiği takdirde düşük kaliteli yakıtların daha büyük ölçeklerde devreye alınmasının gündeme gelmesi kaçınılmazdır. Katı fosil yakıtlar sınıfına giren linyitler, ülkemizin en önemli enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Rezervleri 8 milyar tonu aşan linyitler, nem, kül ve kükürt oranları yüksek, ısıl değerleri ise düşük olan, düşük kaliteli yakıtlardır. Bu özelliklerinden dolayı, büyük bir kirlenme potansiyeline sahip olan bu yakıtların yanması önemli çevre kirliliği problemleri yaratabilmektedir.

Yanma prosesleri sonucunda gaz, sıvı ve katı olmak üzere her fazda kirleticiler ortaya çıkmaktadır. Bu kirleticiler, çok çeşitli tür ve miktarda olabilmekte ve çevre açısından büyük problem oluşturabilmektedirler.

Çevre açısından en büyük sorunlardan birisi kömürlerin içerdiği kükürt miktarıdır. Kükürt, özellikle yanabilir kükürt, yanma sırasında kükürt oksitlere (SO_x) dönüşmektedir. Kirliliğe karşı kurulan dernek ve kuruluşlar 60-65 yıldır SO_x emisyonları ile ilgilenmektedirler. Bu kuruluşların çeşitli çabaları sonucunda son 20 yıldır bir dizi tedbir ve yönetmelikler ile SO_x emisyonları sınırlandırılmıştır. Amerikan Kongresi 1971 yılında Temiz Hava Yasası ile Çevre Koruma Örgütü'ne (EPA), bu konuda yaptırım gücü olan yetkiler vermiştir.

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler de dahil olmak üzere bir çok ülke, kendi hava kalitesini koruma yönetmeliklerini hazırlayarak yayımlanan miktara ve derişime bağılı olarak işletmeleri daha düşük kükürt içeriğine sahip yakıt kullanmaya ve gazlardan kükürtlü bileşikler arıtma sistemlerini devreye almaya zorlamaktadırlar.

İkinci bir kirlletici türü NO_x olarak adlandırılan ve özellikle ozon tabakası açısından negatif bir etkiye sahip olan azot oksit yayınımlarıdır. Azot oksitler termal ve yakıt azotu olarak iki farklı kaynaktan dolayı ortaya çıkmaktadırlar. Termal azot 1273 K (1000 °C) sıcaklığın üzerinde havanın azotunun bağlanması ile oluşmaktadır. Buna karşın yakıtın içerdiği azot miktarına bağılı olarak ortaya çıkan azot oksitler de önemli miktarlara sahiptir. Özellikle son yıllarda önem kazanan N₂O yayınımları ozon tabakası açısından son derece tehlikelidir [42]. N₂O yayınımları akışkan yataklı sistemlerde geleneksel toz kömür yakma sistemlerine kıyasla daha yüksek seviyelerde gerçekleşmektedir.

Kömür yanması sırasında yanma gazının yanısıra bu gazla birlikte atmosfere atılan kül de önemli bir kirlletici türüdür. Bu kirlletici baca gazından ayrılarak depolansa bile bir katı atık problemi ortaya çıkartmaktadır. Katı atıklar ise yeraltı sularını etkilemekte ve doğal hayata zarar verebilmektedirler.

Kömürün yanmasında açığa çıkan kül, katı atık olarak problem oluşturduğu gibi bu katı atığın gazlardan sıyırılması sırasında da problem yaratmaktadır. Sıyırma kullanılan sistemler ne kadar gelişmiş olursa olsun küllerin tümü bu sistemlerde sıyıramamaktadır. Sıyırma sistemlerinde tutulamayan çok küçük tanecikler, insan sağlığı üzerinde büyük tehlike oluşturmaktadır. Bu nedenle, bütün çevre koruma örgütleri, devletler ve kuruluşlar, ilgili yönetmelikler ve standartlar çerçevesinde bu sistemlerin en hassas ve gelişmiş teknolojilerle üretilmesi ve uygulanabilmesi için çaba göstermektedirler.

Külün yüksek ağır metal içeriği su kirliliği için olumsuz bir faktördür ve son yıllarda özellikle yeraltı sularından bu metallerin arıtılması ve karıştırılmaması konusunda çeşitli önlemler alınmaktadır.

2.3.1. Yakma Sistemlerinde SO₂ Yayınımı ve Kontrolü

Yanma sonucunda ortaya çıkan kükürt oksitlerin yaklaşık yüzde doksanı SO₂, geri kalanı ise SO₃'tür. SO₂ sağlık açısından sakıncalı bir gazdır ve atmosferde katalitik etkiler sonucu yayımlanmasından sonra SO₃'e oksitlenerek su buharı ile asit yağmuruna ve sülfatlara dönüşmektedir. Dünya Çevre Örgütü (EPA) bu asidik bileşiklerin SO₂'den daha da zararlı olduklarını ve günümüzdeki standartlardaki SO₂ sınır değerleri yüksek olduğu ve bunların daha aşağıya çekilmesi gerektiğini belirtmektedir [43]. Özellikle sülfat miktarlarının dar yerleşim alanları için tehlikeli olduğu konusunda görüşler vardır.

Atmosferdeki SO₂ kirliliği sınır tanımamakta ve yalnız kaynağın bulunduğu bölgeyi değil kilometrelerce ötedeki bölgeleri de etkileyebilmektedir. İngiltere, uzun yıllar boyunca SO₂ sınırlarını düşünmeksizin kendi ülkesindeki kirliliği uzun bacalar yolu ile ve hakim rüzgarların etkisi ile Kuzey ülkeleri ve Avrupa'ya ihraç ederek bu ülkelerdeki ormanların (Kara Ormanlar gibi) ve göllerin asit yağmurları ile harap olmasına neden olmuştur. Bütün endüstrileşmiş ülkelerin özellikle Avrupa'da birbirlerine SO₂ ihraç ettikleri bilimsel olarak da ispatlanmıştır [44].

Doğal kaynaklar ve endüstriyel işlemler sonucunda ortaya çıkan SO₂ miktarı insan sağlığını tehdit eden boyutlara ulaşmış bulunmaktadır[43]. Burada ortam havasındaki SO₂ yıllık ortalama derişimi EPA tarafından 90 µg/m³ olarak belirlenmiştir. 24 saatlik ortalama değer ise 365 µg/m³'tür. Öngörülen standartları tutturmak için başvurulmuş başlıca iki yöntem üzerindeki tartışmalar devam etmektedir. Birinci yöntem, yayınımları sınırlandırmaya, ikinci yöntem ise atık gazları hava ile belirli oranda seyrelterek etkisini azaltmaya dayanmaktadır. Büyük tesisler ve kazan işletmeleri için ikinci yöntem önerilmektedir. Bunun temel nedeni, İngilizlerin daha önceleri uyguladığı gibi yüksek bacalar ile SO₂'nin uzak bölgelere göndermektir. Bu yöntem daha ucuz bir yöntemdir. Fakat EPA buna şiddetle karşı çıkmaktadır. Çünkü, çok hassas bir şekilde seyreltilse bile SO₂'nin sülfat asitlerine dönüşmesi kaçınılmaz olmaktadır. Bu aşamada EPA sülfat standardı oluşturabilmek için yeterli veri olmadığını öne sürmüştür. Bununla birlikte 1977'nin sonlarında yeni bir standart oluşturmuş ve üretilen her 10⁶ kkal için 2.16 kg SO₂ değerini kabul etmiştir. SO₂

sıyırma konusunda farklı yaklaşımlar vardır. Bunlardan bir tanesi, düşük kükürt içerikli kömür kullanılmasıdır. İkinci bir yol, sıyırma sistemlerinin devreye alınmasıdır. Kömür kükürdünün kimyasal işlemlerle azaltılması bilhassa organik kükürdün ağırlıklı olduğu kömürler için pahalı bir işlemdir [45,46].

Kükürtdioksidin çevresel etkileri 1950'li yıllarda önce Almanya'da endüstrinin yoğun olduğu Ruhr bölgesinde yağmur sularında görüldü. 1952 yılındaki Londra faciası olarak bilinen olay yaşandı ve atmosferdeki yüksek SO₂ derişiminden dolayı birkaç gün içinde 4000 kişi öldü. Kabere Angus Smith tarafından ortaya atılan "Asit Yağmuru" SO₂ nin SO₃ e yükseltilmesi ve bulut içinde H₂SO₄'a dönüşmesi ile oluştuğu bilinmektedir [47, 48]. Atmosferdeki hidrokarbonlar, ozon, NO_x ve güneş enerjisi bu oluşuma katkıda bulunmaktadır.

Asit yağmuru ile ilgili reaksiyonlar aşağıdaki şekilde yürümektedir:



Nisbi nem oranı % 30'un üzerinde olması durumunda 2.2 ve 2.3 reaksiyonları meydana gelmektedir. Asit oluşumu nem arttıkça hızlanmaktadır [49]. Asit yağmurlarının olumsuz etkisi tarihi yapılarda, ormanlar ve göllerde görülmektedir. Doğada bu denli olumsuz etkileri olan SO₂ yayınımlarının sürekli bir şekilde izlenmesi gündeme gelmiştir.

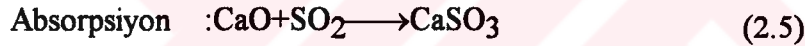
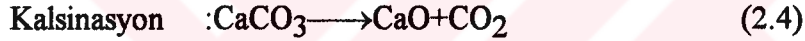
1975 yılında AT ülkeleri, BDT, ABD ve Kanada dahil toplam 34 ülke hava kirliliğini azaltmak üzere bir anlaşma imzalayarak 1993 yılına kadar SO₂ yayınımlarını % 30 oranında azaltma kararı almışlardır. Yeni baca gazı SO₂ sıyırma sistemlerini devreye almaya ve mevcut sistemleri yenilemeye başlamışlardır. Türkiye'de 1986 yılında çıkartılan Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği uygulamaya konulduğundan beri tüm santrallerin baca gazı sıyırma sistemleri ile donatılması gündeme gelmiştir. Çayırhan santraline baca gazı desülfürizasyon ünitesi yapılmış ve geçici teslimi yapılmıştır [50].

Yanma prosesleri sonucunda atmosfere atılan SO_xler oldukça büyük miktarlara ulaşmaktadır, 1970 yılında 35 milyon ton olan SO₂ emisyonunun miktarı 2000 yılına kadar üç kat artması beklenmektedir. EPA, insan faaliyetlerinden kaynaklanan SO₂ nin yarısından fazlasının elektrik üreten güç santralleri yolu ile atmosfere atıldığını öne sürmektedir. % 3-5 kükürt içeren bir kömürün kullanıldığı

1000 MW kapasiteli bir kazan günde 600 ton SO₂ yayınına neden olmaktadır [43]. Bu tür kazanların baca gazındaki SO₂ yayınına büyük oranlarda sıyırmak mümkündür. Örneğin, yukarıda sözü edilen tesiste günde 125000 ton SO₂ sıyırılabilir.

Atık gazlardan SO₂ sıyırmak amacıyla çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bunların uygulanabilmesi için ekonomik olarak kabul edilebilir nitelikte olmaları gerekir. Bu amaçla, genellikle kireçtaşı, su ve sodyum tuzları büyük miktarda kullanılmaktadır. SO₂'nin çözünürlüğü sınırlı olduğundan suyun kullanılması pek tercih edilmemektedir. Sodyum tuzlarının kullanımı ise coğrafik koşullardan etkilenmesi ve korozyon özelliğinden dolayı sınırlı kalmaktadır. Kireçtaşı ve dolomit en ucuz ve kullanımı en kolay olan maddelerdir.

Kireçtaşının kimyasal özellikleri ve kalsinasyon kinetiği, absorpsiyon ve oksidasyon kademeleri açısından önem taşımaktadır. Kireçtaşının kalsinasyon ve absorpsiyonu ile ilgili temel reaksiyonlar aşağıda verilmiştir:



Kalsinasyon reaksiyonu 1033 K (760 °C) altında oldukça yavaş yürümektedir. 1088-1421 K sıcaklıkları arasında kalsinasyonun maksimum hıza ulaştığı, bu sıcaklık aralığında 1255 K in ise optimum kalsinasyon sıcaklığı olduğu saptanmıştır. Bunun temel nedeni, 1255 K sıcaklığın üzerinde kireçtaşının iç gözenek alanının azalması ve bunun sonucunda etkinliğinin düşmesidir[43]. Etkinliği azalan CaO sülfatasyonu gerçekleştirilememektedir.

Kireçtaşının SO₂ absorplama mekanizması oldukça karmaşık bir özellik göstermektedir ve bazı faktörler absorpsiyonu önemli ölçüde etkilemektedir. Bu faktörlerin başlıcaları akışkan yatakta kalma süresi, sıcaklık, yatak içi SO₂ derişimi, kireçtaşı tanecik çapı, sülfat oluşumu, Arrhenius parametreleri (frekans faktörü ve aktivasyon enerjisi), kireçtaşı fazlası, etkinliği kaybetme derecesi (1255 K (982 °C) üstünde), kireçtaşının yüzey alanı, gaz karışımının içerdiği oksijen ve nem miktarı, ve kireçtaşının yapısıdır.

Kireçtaşının SO_2 absorplama mekanizması genellikle aşağıdaki şekildedir:

- a) Kalsinasyon sonucunda kireçtaşının yapısında öncelikle kireçtaşı türüne ve kalsinasyon sıcaklığına bağlı olan bir gözenek yapısı oluşmaktadır.
- b) Kimyasal kinetiğin hızı kontrol eden mekanizma olduğu ilk aşamalarda yeni oluşmuş gözeneklerde hızlı bir SO_2 absorpsiyonu gerçekleşmektedir.
- c) Daha ileriki aşamalarda absorpsiyon iki tür difüzyon mekanizmasının bileşik etkisi altında yürümektedir:

i) Gazın gözenekler içindeki difüzyonu. Bu difüzyon yavaş olduğu için reaksiyon hızını kontrol etmektedir. ii) SO_2 'nin ilk anda oluşan CaSO_4 içinden difüzyonu. Gözenekler için ideal boyut $2-3 \times 10^{-7} \text{m}$ olarak alınabilir. Daha küçük gözenekler hızlı bir şekilde kapanmakta geniş gözenekler ise yeterince büyük olmamaktadır.

Geleneksel yakma sistemlerinde, özellikle kazanlarda SO_2 gidermek için yapılan ilk çalışmalarda kireçtaşı kömür ile karıştırılarak sisteme beslenmekteydi. Fakat yüksek sıcaklıklarda kireçtaşının etkisiz hale geldiği ve kireçtaşı besleme noktasındaki sıcaklığın 1373 K (1100 °C) civarında olması gerektiği sonucuna varıldı. Almanya, Çekoslovakya ve Japonya'da yürütülen çalışmalarda olumlu bazı sonuçlar elde edilmiştir[43]. Bunun üzerine, EPA Amerika Birleşik Devletleri'nde Shawnee 175 MW gücünde bir tesis kurarak tesiste yoğun bir program başlatmıştır. Fakat elde edilen sonuçlar yetersiz olmuştur. Problemler, genellikle kireçtaşı taneciklerinin yanma sistemi içinde iyi bir şekilde dağılmaması ve absorpsiyon için sıcaklığın uygun olduğu bölgede kalma sürelerinin kısa olması (uygun sıcaklık, absorpsiyon hızının yeterince yüksek olmasını sağlayan ancak kireçtaşı etkinliğini düşürmeyecek , 1201 K (928 °C) üstünde bir aralıkta olmalıdır) ve bunun sonunda SO_2 'nin taneciğinin içine yeterince difüze olmamasından kaynaklanmaktadır[43]. Bu çalışmalarda stokiyometrik oranın üç katından fazla kireçtaşı kullanılmasına rağmen SO_2 sıyırma verimi %40 ı aşamamıştır. Isı iletim tüplerinde tıkanma ve toz sıyırma sistemindeki verim düşüşü de önemli birer problem olarak ortaya çıkmıştır. EPA'nın yukarıda sözü edilen ve 1970 yılında başlatılan deneme programına karşılaşılan bu olumsuzluklar sonucu 1973'te son verilmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar daha sonraları yakıt ve enerji kaynağı değiştirilerek hidroelektrik, rüzgar ve güneş enerjilerinin gündeme gelmesi, kükürdün yakıttan arındırılarak kullanılması, baca gazından SO_2 giderilmesi ve akışkan yataklı sistemlerde kükürt dioksit giderilmesi şeklinde değişik boyutlar kazanmıştır [33].

Kaliteli kömür kaynaklarının sınırlı olması, yakıt ve enerji kaynağının değiştirilmesi ile doğal gaz, rüzgar, hidroelektrik ve güneş enerjisini gündeme getirmiştir. Bununla birlikte, sözü edilen temiz enerji kaynaklarının ekonomik açıdan kabul edilebilirliği konusunda şüpheler bulunmaktadır. Bunun nedenleri arasında, yakıt ve enerji kaynaklarının değiştirilmesi hala seçenek olarak araştırma seviyesinde olmasıdır.

İkinci bir olasılık, kömürün kükürdünün giderilmesi yolu ile daha temiz bir yakıt elde etmektir. Bunun da ekonomik olarak sınırlandırılma durumları vardır [51]. Kömürler ve linyitler için kırma, flotasyon, piroliz ve kimyasal yolla bazı kükürt türleri giderilebilmektedir. Piritik kükürt, kırma ve flotasyon ile, sülfat kükürdü asit ile işlem yapılarak, organik kükürtler ise kimyasal yöntem ile uzaklaştırılabilmektedirler. Kimyasal yöntem küçük çaplı işletme ve üretimlerde ekonomik değildir [33]. Baca gazından SO₂ giderilmesi yaygın bir şekilde uygulanan ve kısaca FGD (Flue Gas Desulphurization) olarak adlandırılan bir sistemle gerçekleştirilmektedir. Gaz fazındaki seyreltik kükürtdioksit ile bazı reaktifler arasındaki tepkime korozyona dayanıklı pahalı malzemelerden üretilen büyük ünitelerde gerçekleştirilebildiği için ekonomik açıdan bazı avantajlar sağlamaktadır. SO₂ sıyırma prosesleri genel olarak üç grupta incelenebilmektedir. 1) Yaş Prosesler 2) Yarı kuru (püskürtmeli kurutma) Prosesler 3) Kuru Prosesler[49].

2.3.2. Akışkan Yataklı Sistemlerde SO₂ Kontrolü:

Geleneksel yakma sistemlerinin aksine, akışkan yataklı sistemlerde SO₂ kontrolü, kireçtaşı veya dolomit gibi tutucuların (sorbent) doğrudan yatağın içine beslenmesi ile yapılmaktadır. Bundan dolayı ilave sıyırma sistemi gerektirmeyeceği için ekonomiktir. Geleneksel sistemlere kıyasla sorbent taneciklerinin akışkan yatakta temas süresi daha uzun ve buna bağlı olarak da sorbentin kullanım etkinliği daha yüksek olmaktadır. İlk uygulamaların Winkler gazlaştırıcısı ile 1928 lere kadar gittiği Akışkan Yataklı Sistemlerin günümüzde atmosferik basınçlı yakma sistemlerinin kapasitesi 400 MWa, basınçlı akışkan yatakların kapasitesi ise 200 MW mertebelerine kadar çıkarılabilmektedir. Teknolojik yenilikler ve yapılan düzenlemeler ile 2000'li yıllarda 400 MW'lık akışkan yataklar devreye alınacaktır [52]. Amaç, EPA standartlarını sağlayabilecek sistemleri tasarlamaktır. Avrupa'da 1970'li yıllarda olumsuz sonuçlar alınan ve EPA standartlarını sağlamakta güçlük çekilen sistemlerde kireçtaşının yatakta kalma zamanı arttırılrsa dahi SO₂nin yayımlanma zamanı ve buna bağlı olarak SO₂nin kireçtaşı taneciklerine transferini arttırmak güçleşmiştir. Basınçlı

akışkan yatakların devreye alınmaları bu problemleri bir ölçüde gidermiştir. Ancak bu sistemlerde CO₂ kısmi basıncın yüksek olmasından dolayı kireçtaşının kalsine olması daha güç olmaktadır. Akışkan yataklarda operasyon sıcaklığı 1073 ile 1173 K (800 ile 900 °C) arasında değişmektedir. Standartların altında SO₂ yayılımını sağlayabilecek miktarda kireçtaşı eklenmesi durumunda kireçtaşı fazlası büyük miktarda katı atık ortaya çıkartabilmektedir. Bu da bir başka çevre kirliliği problemini gündeme getirmektedir. Daha önce belirtildiği gibi, temel reaksiyon mekanizması önce kireçtaşının kalsine olması, sonra da kalsine kireçtaşının SO₂ ve O₂ ile birleşerek kalsiyum sülfat haline dönüşmesidir.

Kireçtaşı veya dolomit gibi sorbentler (tutucular) yukarıda verilen mekanizma ile kükürt dioksit gazlarını yatağın içinde tutarak baca gazına daha düşük oranda yansımalarını önlemektedir. Bu tutucuların kullanılmasının yeğlenmesinin nedeni kolayca bulunabilmeleri, ekonomik olmaları ve ekonomik olmalarıdır. Kunii ve Levenspiel SO₂ ile kireçtaşı reaksiyonunun reaksiyon hızının sıcaklık ile arttığını ve film difüzyonunun hız kontrol edici aşama olduğunu ortaya koymuşlardır [10]. SO₂ yayılımını belirlenen sınırların altında tutabilmek için kullanılan kireçtaşı ve dolomit gibi tutucuların kömürün kükürt içeriği de alınarak kullanılmaları gerekmektedir. Bu amaçla kullanılacak tutucu seçiminde gözönüne alınması gereken birincil faktörler tutucu özellikleri yatak sıcaklığı, Ca/S mol oranı, ikincil faktörler ise, tanecik büyüklüğü, hava fazlalığı oranı ve yatağa tuz eklenmesidir [53].

2.3.2.1. Sıcaklığın SO₂ Sıyırma Verimine Etkisi

Kireçtaşı ve dolomitin SO₂ tutma konusunda yapılan çalışmalarda bu sorbentlerin optimum çalışma sıcaklığının 1073-1123 K (800-850 °C) civarında olduğu ortak bir görüş olarak ortaya çıkmıştır. Ekinci [33], Avgamasya asfaltitini 0.1 m çapında bir akışkan yatakta yaptığı deneylerde 1073-1123 K civarında optimum SO₂ sıyırılmasının gerçekleştiğini belirtmektedir. Bunun nedeni olarak özellikle asfaltit yapısındaki kalsiyum oksidin düşük sıcaklıklarda tam olarak bozunmaması, yüksek sıcaklıklarda ise gözeneklerin sülfonasyona bağlı olarak ve kül yapısındaki değişimin etkisi ile tıkanmasının göstermektedir.

Rajan v.ç.a.[54] yaptıkları çalışmalarda benzer sonuçlar elde etmişler ve 1073 K in altında CaO kalsinasyonunun tamamlanmadığını 1123 K in üstünde ise kireçtaşının gözeneklerinin kapandığını öne sürmüşlerdir. Williams v.ç.a.[55] ise SO₂ ve SO₃ yayılımı ile optimum sıcaklığın ilgisi bulunduğunu fakat uçucu maddenin optimum sıcaklığı etkilediğini belirtmişlerdir. Araştırmalarını 0.3x0.3 m² kare kesitli

bir akışkan yatakta yürütmüşlerdir. Tatebayashi v.ç.a.[56] 0.2x0.2 ve 0.5x0.5 m²'lik kare kesitli iki ayrı akışkan yatakta gerçekleştirdikleri deneylerde 1073-1103 K (800 ile 830 °C) arasındaki sıcaklıklarda kireçtaşı kullanılarak gerçekleştirilen sıyırma etkinliğinin maksimum seviyeye ulaştığını ancak 1123 K (850 °C)'nin üzerinde hızla düştüğünü gözlemlemişlerdir. Buna karşın, yanma veriminin arttığını belirtmişlerdir. Spitsbergen v.ç.a.[57] kireçtaşı bazlı sorbentler ile yaptığı çok kademeli akışkan yatak çalışmalarında oluşan CaSO₄ ın 1123 K de sıcaklığın etkisi ile bozunduğunu ve 1223 K (950 °C)'de ise % 10.1 oranında O₂ bulunan ortamda CaS'ün CaSO₄'a dönüştüğünü ve bu reaksiyonun tersinir olduğunu belirtmektedir. Sonuç olarak düşük sıcaklıklarda CaSO₄ a paralel olarak CaS miktarının arttığı, yüksek sıcaklıklarda ise CaS bozunması ile birlikte SO₂ miktarının artmaya başladığını saptamışlardır.

Bir başka çalışmada Lyngfelt v.ç.a.[58] 16 MW'lık bir akışkan yatak ile yaptıkları çalışmalarda 1163-1263 K (890-990 °C) arasında CaSO₄ ın CaO ve SO₂ ye parçalandığını ortaya koymuşlardır. Burada hava fazlası yüzde 1.4'dür. CaSO₄ parçalanması yoğun fazdaki CO ve H₂'e bağlanmaktadır. Burada dikkati çeken nokta 803 K (530 °C)'de kazanı terkeden SO₂'nin yatağa beslenen yakıt kökürdünün iki katından fazla olmasıdır. Doğu [59] kireçtaşı kalsinasyon sıcaklıklarını incelemiş ve 823 K (550 °C)'de kalsine olan numunenin en yüksek reaktiviteye sahip olduğunu belirtmektedir. Bu durumun reaksiyonun difüzyon kontrollü olmasına bağlanmıştır. Ford v.ç.a.[60] 0.91 m yükseklikte ve 0.15 m iç çapa sahip bir akışkan yatakta yaptıkları karakterizasyon deneylerinde 57 farklı numuneyi 933 ile 1193 K (660 ile 920 °C) arasındaki sıcaklıklarda incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar numunelerin 1173 K (900 °C)'nin SO₂'yi maksimum bir verimle absorpladıklarını ortaya koymaktadır. Münzner v.ç.a.[61] farklı kireçtaşı ve dolomit numuneleri kullanarak laboratuvar ölçeğinde ve 0.4 x 0.8 m² lik farklı sistemlerde 1 m/s. hız ve % 3 O₂ ortamında 1123 K(850 °C)'de SO₂ tutulmasını incelemiştir. Haque v.ç.a.[62] üç değişik kömür numunesi ile yaptıkları çalışmada kireçtaşı kullanarak optimum SO₂ sıyırmanın 1073-1123 K (800-850 °C) arasında gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Optimum sıcaklığın kireçtaşı tane boyutu küçüldükçe artma eğilimi gösterdiği sonucuna varılmıştır. % 54 CaO içeren kireçtaşı kullanarak yürütülen deneylerde 1093 K (820 °C) 'nin altındaki sıcaklıklarda kireçtaşının parçalanmasının tamamlanamamasından dolayı reaksiyonun yavaş olduğunu gözlemişlerdir.

Vickers v.ç.a.[63] 1.8 MW'lık bir endüstriyel akışkan yataklı kazan ile gerçekleştirdikleri deneylerde 1113 K (840 °C)'de 2 saatlik çalışmada % 40 oranında kökürt dioksit sıyırma verimi elde ederken, 1173 K (900 °C) civarında % 30 verim elde edebilmişlerdir. Bunun nedeni deneylerde % 16 ile % 30 arasında sabit tutulan

alev üstü hava oranının kireçtaşının etkisini düşürmesidir. Elde edilen sonuçlar, akışkan yataklı yakıcılarda iyi SO₂ sıyırma sağlayabilmek için yatak sıcaklığının 1113 K (840 °C) civarında ve hava fazlasının düşük tutulması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Marshall v.ç.a.[64] katıların dolaşımının sağlandığı 2200 KW'lık Akışkan Yataklı Test Ünitesinde yatak sıcaklığının 1093 K (820 °C)'den 1133 K (860 °C)'ye yükseltilmesi durumunda SO₂ emisyonlarının iki kat arttığını ve uygun Ca/S oranında çalışıldığında yüksek sıyırma verimleri elde edilebileceği görüşüne varmışlardır.

2.3.2.2. Ca/S Oranının SO₂ Sıyırma Verimine Etkisi

Akışkan yataklı sistemlerde kükürt dioksidin sıyırılması konusunda yapılan çalışmalarda Ca/S oranının SO₂ tutma etkinliği üzerinde büyük etkisi olduğu çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir. Krishnan v.ç.a.[65] tarafından yapılan derlemede Amerikan Birleşik Devletleri'nde yapılan çalışmalar, önemli test ve endüstriyel uygulamalar özetlenmektedir. Tennessee'de TVA (Tennessee Valley Authority)'nın sahip olduğu 20 MW gücüne ve 3.7x7.3 m² kesit alanına sahip atmosferik akışkan yatak 1982'de devreye alınmıştır . Yıkanmış kömür ile yapılan çalışmalarda Ca/S oranı 2-2.5 arasında tutularak yatak üstü ve altı besleme ve 1.5-2.5 geri besleme oranı ile % 90 oranında kükürt sıyırma sağlanmaktadır. Buna karşın Babcock-Wilcox, elektrik üretimi amacına yönelik olarak çalıştırdığı 1.81 x 1.81 m² kesit alanına sahip akışkan yataklı sistemde Kentucky 9 , Ohio 6 ve Pittsburg 9 kodlu kömürleri yakarak yürüttükleri çalışmalarda Ca/S oranı 2.5-3 arasında tutularak geri besleme ile % 90 sıyırma etkinliğine ulaşabilmektedirler.

Modrak v.ç.a.[66] 0.15 x 0.15 m² kesit alanına sahip olan atmosferik akışkan yataklı yakıcıda geri beslemeli ve geri beslemenin yapılmadığı çalışmalarda Ca/S oranını arttırarak SO₂ sıyırma etkinliğini incelemişlerdir. Uçucu külleri geri beslemeleri durumunda % 98 civarında sıyırma etkinliği sağlarken Ca/S oranını 3.5 civarında tutmaları gerekmiştir. Buna karşın aynı Ca/S oranında geri besleme yapılmaksızın gerçekleştirilen çalışmalarda sıyırma verimi % 85 civarına düşmektedir.

Haque v.ç.a.[62] 873-973 K (600-700 °C) civarına kadar ön ısıtma uygulanmış kireçtaşını yatak malzemesi olarak kullandıkları ve 1073-1173 K (800-900 °C) arasında özellikle 1113 K (840 °C)'de sabit tuttıkları, saatte 20 kg kömür yakabilecek kapasitedeki 0.25 m çapındaki akışkan yataklı sistemde Ca/S mol oranının SO₂ sıyırma etkinliği incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan % 43 CaO içeren

kireçtaşının % 54 CaO içeren kireçtaşına oranla daha düşük sıyırma verimine sahip olmakla birlikte Ca/S mol oranının 3 olarak tutulmasının % 98'lere varan oranlarda sıyırma sağladığını belirtmişlerdir.

Küçükbayrak v.ç.a.[67] 0.39 m çapındaki akışkan yataklı sistemde dolomit numuneleri ile gerçekleştirdikleri deneylerde 1 m/s akışkanlaştırma hızında beslemedeki Ca/S mol oranını arttırmakla serbest bölgede SO₂ tutma veriminin arttığını belirtmişlerdir. Bunun temel nedeni ise yatakta ve serbest bölgedeki tutucu miktarının artması ile açıklanmaktadır.

Anthony v.ç.a.[68] uçucu kül geri besleme ile sabit Ca/S mol oranında SO₂ sıyırma veriminin % 10 ile % 30 oranları arasında artırılabilirdiğini belirtmişlerdir. 22 adet pilot ölçek ve 2 adet endüstriyel tesiste yürüttükleri çalışmalarda pilot ölçekteki deneylerin ışığı altında endüstriyel tesiste gerçekleşen sıyırma verimlerinin % 71.4 ve % 80.9 olduğunu gözlemişlerdir. Pilot ölçekteki çalışmaların sonuçları ile tahmin edilen sıyırma verimleri % 84.9 ve % 88.7 civarındadır. Bu çalışmalar sırasında kül geri beslemeli ve beslemesiz şartlar için iki farklı sıyırma denklemi oluşturmuşlardır.

Münzner v.ç.a.[61] farklı kireçtaşı ve dolomit numuneleri kullanarak 0.4 x 0.8 m² lik bir akışkan yatak ve laboratuvar ölçekli küçük sistemlerde dolomitin kireçtaşına oranla 1.8 kat daha fazla kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca Ca/S oranının 3.5 olarak tutulması durumunda klor emisyonlarının % 50 düşürüldüğünü gözlemiştir.

Marshall v.ç.a.[64] 2200 KW kapasiteli akışkan yatakta 1123 K (850 °C) sıcaklıkta ve kademeli yanma sağladıkları deneylerde kireçtaşı kullanmışlardır. Ca/S oranını 3-4 arasında tutarak % 90 sıyırma verimi elde ettikleri çalışmalarda 200 mg/Nm³'lük kükürt dioksit yayını gözlemişlerdir. Sıcaklık 1098 K (825 °C) civarına düşürüldüğünde % 90'lık verimi elde etmek için Ca/S mol oranını 2 ile 3 arasında tutarak yeterli olmaktadır.

Vickers v.ç.a.[63] 1.8 MW gücündeki akışkan yataklı sistemde elde ettikleri sonuçlarla kükürt giderme veriminin Ca/S oranı 2 ve 4 için sırasıyla % 60 ve % 70 olduğunu gözlemişlerdir. 32 MW'lık kazanda saptanan değerler yukarıdaki sonuçlarla paralellik göstermektedir.

2.3.2.3.Sorbent Tanecik Büyüklüğünün SO₂ Sıyırma Verimine Etkisi

Ekinci [33] kireçtaşı tanecik büyüklüğünün CaO ile kükürt dioksidin temas yüzeyini hem artırıcı hem de azaltıcı etkisi olduğunu belirtmiştir. Kireçtaşı tanecik büyüklükleri 6×10^{-4} - 9.5×10^{-4} m ile 1.18×10^{-3} - 1.4×10^{-3} m arasındaki 4 ayrı elek aralığından alınan numunelerle gerçekleştirilen ve 1073 K akışkan yatak sıcaklığında Ca/S mol oranları 1 ile 4 arasında değiştirilen deneylerde küçük tane büyüklüğüne sahip kireçtaşı ile % 100'e varan sıyırma verimi elde ettiği görülmektedir. Ca/S mol oranı 4 için 6×10^{-4} m çapındaki kireçtaşı tanecik büyüklüğü kullanılarak 150 ppm civarında SO₂ derişimi elde ederken, tanecik büyüklüğü 1.18×10^{-3} - 1.4×10^{-3} m olan deneylerde 600 ppm civarında SO₂ derişimi izlenmektedir.

Ağabay [69] 0.17 m çapındaki akışkan yatakta Orhaneli linyitini yakarak gerçekleştirdiği SO₂ tutma çalışmalarında kullandığı üç farklı tanecik boyutundaki kireçtaşının 4.25×10^{-4} metrenin altındaki fraksiyonunun en yüksek sıyırma etkinliğine sahip olduğunu belirlemiştir. Kireçtaşı tanecik boyutundaki artış ile SO₂ tutmada görülen azalmanın taneciklerin spesifik yüzeyindeki düşüşe bağlı olduğunu ve optimum sıyırma çapının 2×10^{-4} ile 4×10^{-4} m arasında olduğu belirtilmektedir.

Öner [70] Çan bölgesi linyitlerini kullanarak yaptığı çalışmada Ca/S mol oranını sabit tutarak 4×10^{-4} - 7×10^{-4} m , 7×10^{-4} - 10^{-3} ve 10^{-3} - 1.4×10^{-3} m tanecik büyüklüklerine sahip kireçtaşı numuneleri kullanarak SO₂ sıyırma etkinliğini incelemiştir. Elde edilen sonuçlardan en etkin sıyrmanın 4×10^{-4} - 7×10^{-4} m tanecik büyüklüğündeki kireçtaşı kullanıldığında sağlandığı anlaşılmaktadır.

Küçükbayrak v.ç.a.[67] sorbent tanecik büyüklüğü dağılımının SO₂ tutma üzerinde büyük etkisi olduğunu belirtmektedir. Bu çalışma sırasında, 10^{-3} metrenin altındaki dolomit taneciklerinin 3000 saniye sonra yüzde ellisinin yataktan taşındığı , buna karşın 2×10^{-3} ile 4×10^{-3} m arasındaki tanecikler için taşınma yüzdelerinin sırasıyla yüzde 29 ve yüzde 14 olduğu saptanmıştır. Küçük tanecikler için yataktaki tutucu madde birikimi azdır ve bu yüzden yavaş gerçekleşen ufalanma serbest bölgede kükürt tutmada etkin olan büyük tanecikler için olduğu gibi değildir. Siklon küllerinde yapılan kimyasal analizlerden elde edilen sonuçlar büyük taneciklerle gerçekleştirilen deneylerde yataktan taşınan tutucu taneciklerinin daha fazla sülfat içerdiği belirtilmektedir.

Modrak v.ç.a.[66] Ca/S mol oranını 2.5 ile 3.2 arasında , çalışma hızını 2.44 m/s. ve kireçtaşı tanecik büyüklüğünü 1.2×10^{-3} metrenin altında tutarak yaptıkları deneylerde SO₂ sıyırma etkinliğini 1.2×10^{-3} - 4×10^{-3} m arasındaki kireçtaşına oranla daha yüksek olarak belirlenmektedir. Bunun 1.2×10^{-3} metrenin altındaki taneciklerde yataktan taşınmaya, 1.2×10^{-3} metrenin üzerindeki taneciklerde ise kireçtaşı yüzey alanındaki azalmaya bağlanması gerektiği görüşü savunulmaktadır.

Marshall v.ç.a.[64] aktif yatak sıcaklıklarını 1120-1123 K (847-850 °C) arasında ve birincil hava/kömür oranını 0.81-0.87 arasında tuttıkları çalışmalarda üç farklı kireçtaşı tanecik boyutu kullanarak elde ettikleri sonuçlarda 0-200 mikron arasındaki boyutun Ca/S oranı 6-8 arasında beslenmesi ile % 85 verim sağlayabileceğini saptamaktadır. Buna karşın 100-150 mikron arasındaki kireçtaşı ile Ca/S oranı 1.5 için % 45, Ca/S oranı 5 için ise % 85 sıyırma verimi sağlanabilmektedir. Daha kaba taneciklerle gerçekleştirilen deneylerde Ca/S mol oranı 2 civarında tutularak % 78 civarında verim alınmaktadır. Bu sonuç önceki araştırmaların aksine büyük tane boyutunun sıyırma etkinliğinin daha fazla olduğunu ortaya koymaktadır. Buradaki temel neden büyük taneciklerin yatakta kalma sürelerinin uzun olmasına ve ufalanan taneciklerin gözeneklerinin açılarak yeniden SO₂ tutmasına bağlanmaktadır.

Ford v.ç.a.[60] İngiltere'de mevcut kireçtaşı numunelerinin SO₂ tutma açısından karakterizasyonuna yönelik olarak yaptıkları çalışmalarda sülfatlanmış kireçtaşı taneciklerinin yatak içinde gerçekleşen tanecikler arası harekete bağlı olarak aşınarak ufalandıklarını ve bu arada ortaya çıkan yeni reaksiyon yüzeylerinin sülfatlanma açısından çok önemli olduğunu belirtmektedir. Nitekim Haque v.ç.a.[62], % 50 CaO içeren kireçtaşı numuneleri ile yürüttükleri deneylerde 10^{-4} ile 3×10^{-4} m arasındaki tane boyutlarında SO₂ tutma veriminde artma, 3×10^{-4} ile 8×10^{-4} m arasında ise azalma olduğunu belirtmiştir. 3×10^{-4} metreden küçük taneciklerin kolayca sürüklenbildikleri, büyüklerde ise temas yüzeyinin önem kazandığını belirtmiştir.

2.3.2.4. Yakıt Tanecik Büyüklüğünün SO₂ Yayınımı ve Sıyırma Etkinliği Üzerindeki Etkisi

Kömür tanecik büyüklüğünün SO₂ yayınımı üzerinde etkili olduğu görüşü yaygındır. Tanecik büyüklüğü arttıkça SO₂ yayınımının azaldığı birçok araştırmacı tarafından savunulmaktadır. Bunun nedeni büyük taneciklerin yatakta yanma sürelerinin uzun olması ve buna bağlı olarak özellikle serbest bölgede seyrermenin

meydana gelmesidir. Bu şekilde SO_2 yayınının kademeli bir şekilde gerçekleşmektedir. Küçük tanecikler ise kısa sürede yanarlar ve SO_2 yayınına arttırıcı rol oynarlar. Ayrıca tanecik büyüklüğü yataktan taşınmayı ve yanma etkinliğide etkilemektedir. Daha da önemlisi farklı tane boylarının farklı miktarda kükürt içerdikleri bilinmektedir. Williams v.ç.a.[55], % 1.9 kükürt içeren kömür ile yaptıkları çalışmada 1113 K (840 °C) de 1 m/s'lik akışkanlaşma hızı ve % 20 hava fazlası ile 6×10^{-3} , $6 \times 10^3 - 10^{-2}$ ve $10^{-2} - 16 \times 10^{-3}$ m tane boyutları için SO_2 yayınımlarını büyüdükçe seyreden bir şekilde 1230, 840 ve 620 ppm olarak elde etmişlerdir.

Moss [71] ve Ağabay [69], kömür tane büyüklüğüne bağlı olarak kömürün kükürt türlerinin de farklılık gösterdiğini, buna bağlı olarak da SO_2 yayınımlarının azalma ve artma gösterdiğini saptamışlardır. Moss[71] kömür elek analizi sonucu 10^{-3} metrenin altındaki kömürlerin 10^{-3} metrenin üstündeki kömürlere oranla iki kat daha fazla kükürt içerdiklerini belirtmiştir. Ağabay [69] Moss'un sonuçlarına paralel olarak Orhaneli ve Tavşanlı linyitlerinin çeşitli fraksiyonlarındaki kükürt miktarlarını belirlemiştir. Toplam kükürt miktarlarında önemli bir farklılık gözlenmez iken reaktif (yanabilir) kükürt miktarlarında değişimler göze çarpmaktadır.

Atakül [22] yanma verimi açısından Çan linyitlerinin $2 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-3}$ m arasındaki tanecik boyutunun en iyi sıcaklık dağılımına sahip olduğunu saptamıştır. Yanma veriminin artması kükürt dioksit oluşumunda etkin rol oynamaktadır.

Öner [70] üç farklı kömür taneciği ile yaptığı çalışmada orta fraksiyon olan $2 \times 10^{-3} - 3.15 \times 10^{-3}$ m büyüklüğündeki fraksiyonların yanması sırasında SO_2 yayınının maksimum bir değere çıktığını belirtmektedir.

2.3.3. Yakma Sistemlerinde NO_x Yayını ve Kontrolü

Azot oksit yayınına, kükürt dioksit ve partiküler madde yayınına oranla daha farklı bir şekilde ele almak gerekmektedir. Asit yağmurlarına neden olan temel etkenlerden SO_2 den sonra gelen azot oksit yayınımları korozyon etkileri nedeni ile çevre için son derece zararlı ve tehlikelidir. Belirli temas süreleri ve derişim sınırları dışına çıkıldığında insan sağlığını olumsuz şekilde etkilemektedir. Derişim 250 ppm civarına çıktığında insanda öldürücü etki yaratmaktadır.

% 12 kül, % 3.5 kükürt içeren bir kömürün yakıldığı 1000 MW kapasiteli bir yakma sisteminde bir günde atmosfere yaklaşık olarak 900 ton kül, 600 ton SO₂ ve 100 ton NO_x pompalanmaktadır. Yukarıda belirtilen kirleticilerden kül ve SO₂ için yapılacak ekstra işlemler vardır fakat temelde kömürün bünyesinde bulundukları için gaz ile veya ızgaradan alınacak taban külü ile birlikte sistemi terkederler. Bununla birlikte, azot oksitler kül ve SO₂ miktarına oranla oldukça az miktarda kalmaktadır. Bu oksitler daha çok yüksek yanma sıcaklıklarında havanın azotunun oksijen ile reaksiyona girmesi sonucunda oluşmaktadır [33, 43]. Dolayısı ile yayımlanan NO_x miktarları yakma sistemlerine, yakılan yakıtın içerdiği azot miktarına ve çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir. EPA 1971 yılında 0.74 kg /10⁶ kkal(500 ppm) NO_x yayılım sınır değerini yürürlüğe koymuştur. EPA sürekli olarak standartları yenilemekte ve düzenlemeler getirmektedir. Alman çevre standartlarında yeni tesisler için SO₂ yayılımı 400 mg/m³, NO_x yayılımı ise 800 mg/m³ olarak belirlenmiştir [72]. İngiltere'de atmosfer kirleticilerin yayılım standartları SO₂ için 400 mg/m³, NO_x için ise 640 mg/m³ olarak sınır getirilmiştir [73]. Amerika Birleşik Devletlerinde eyaletler arasında SO₂ için farklılıklar bulunmasına karşın New York'ta 100 ppm (0.159 kg/10⁶ kkal) SO₂ sınır değer olarak belirlenmiştir. NO_x için tipik bir değer ortaya çıkartmak son derece zordur. Bu oksitlerin yayılımı, genellikle alev sıcaklığı, hava fazlası, kömürün içerdiği azot miktarı, kazan besleme yüzdesi, gaz soğutma hızına bağlıdır. Fuel oil yakma sırasında yakıtta bulunan metallerin NO_x oluşumu üzerinde katalitik etkisi vardır. Kömür yakma sırasında bu etki ortaya çıkmamaktadır. Birçok parametrenin etkisi altında olan NO_x yayınımları 400 ile 1000 ppm arasındadır. (0.636 - 1.49 kg/10⁶ kkal) NO_x yayınımlarının % 90'ı NO şeklindedir.

Alev sıcaklığı temelde yakıcı ve sistemin tasarımına bağlıdır. Kömürdeki azot miktarı % 0.6 ve 2.2 arasında değişebilmektedir. Bununla birlikte kömürdeki azotun tümü NO_x'a dönüşmemekte ve bazı şartlarda çoğunluğu moleküler azota dönüşebilmektedir. Hava fazlası arttırıldığında ve daha yüksek sıcaklık, daha türbülent bir alev ortamında NO_x oluşumu artmaktadır. Düşük besleme dolayısı ile düşük yanma sıcaklıklarında NO_x yayılımı azalmaktadır. Oksijen fazlasını azaltmak bir çare olabilir, fakat tam yanma sağlanamama tehlikesi bulunmaktadır. Amerikan Birleşik Devletleri başta olmak üzere genel yaklaşım yanma şartlarının değiştirilmesi NO_x yayınımlarının azaltılmasının daha kolay olacağı şeklindedir. NO_x emisyonları ile ilgili yaş (sıyırma) ve kuru (katalitik parçalama) yöntemleri bulunmaktadır. Genellikle Japonya'da sınır değerlerin sürekli olarak düşürülmesi bu tür sistemlerin devreye alınmasını gerekli kılmaktadır.

Azot oksitlerinin kontrolünde genel olarak üç yöntem uygulanmaktadır: 1) Azotun yakma öncesinde yakıttan uzaklaştırılması (kimyasal yöntem), 2) Azot oksitin yanma sırasında tutulması, 3) Yanma sonrasında azot oksitlerin baca gazlarından sıyırılması.

- 1) Azotun yakıttan uzaklaştırılması kimyasal yöntemlerle mümkündür. Bu günümüz koşullarında oldukça pahalı bir yol olmaktadır.
- 2) Yakmanın gerçekleştirildiği sistemin operasyonu kimyasal, fiziksel ve mekanik yöntemler ile kontrol edilebilmektedir. Oksijen miktarını azaltmak, yakıcının geometrisini eğimini değiştirmek, iki kademeli yakmak, su buharı eklemek, baca gazlarını geri beslemek, operasyonu kontrol edebilmek amacı ile başvurulmuş yöntemlerden bazılarıdır. Geleneksel yakma sistemlerinden olan pulverize yakma ateşleme sistemlerinde sınır değerleri sağlamak son derece zor olmaktadır. Akışkan yataklı sistemlerde bunu sağlamak çok daha kolay olmaktadır.
- 3) Azot oksitler, yıkama ve absorpsiyon yöntemleri ile veya uygun bir katalizör ile reaksiyona sokularak baca gazlarından sıyırılabilir. Burada sisteme ek bir ünite eklenmektedir. Bu ünite ekonomik açıdan ek bir yük getirmektedir.

NO_x oluşumunu azaltmak için şu yollara başvurulmaktadır:

a) Kazan veya yakıcı tipi: Siklon, teğetsel ve standart çoklu yakıcı tipleri vardır. Siklon en yüksek NO_x yayılımını siklon türü yakıcılarda gerçekleştirmektedir. Teğetsel tip en düşük, standart tip ise orta derecede bir NO_x yayılımını gerçekleştirmektedir.

b) Kademeli yanma: Bu tip yanmada yanma kamarasına gönderilen hava stokiometrik orandan daha azdır. Geri kalan hava kazana farklı noktalardan beslenmektedir. Burada avantajlı nokta, yanma kamarasındaki indirgenmiş oksijenin havanın oksijeninden daha çok yakıt içindeki azot ile reaksiyona girmesidir. Geri kalan oksijen ise sıcaklığın daha düşük olduğu bölgede bulunmakta ve dolayısı ile NO_x oluşumunda bir azalma sağlanmaktadır. Kademeli yanmanın NO_x yayınımlarını % 30 oranında azalttığı bilinmektedir. TVA'da yapılan çalışmalarda kademeli yanma ve düşük hava fazlası ile yayınımlar 590 ppm den 375 ppm seviyelerine düşürülerek % 36 oranında bir iyileştirme sağlanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta, buhar fazdaki organik maddelerin çok yüksek derişimlere çıkması kabul edilmeyecek derişimlerde olması ve bunun ciddi tıbbi problemlere yol açma olasılığıdır. Teğetsel yakmalı kazanlarda gerçekleştirilen kademeli yanma ile NO_x miktarında % 20 ile % 30 oranlarında bir düşüş sağlanabilmiştir. Japonya'da kademeli yanma hem fuel oil

hem de kömürlü yakma sistemlerinde uygulanmaktadır.

c) Gaz geri besleme: Yanma gazının bir kısmının geri beslenerek yanma odasına verilmesi ve bu yolla alevin soğuması sağlanarak NO_x yayınımları % 15 oranında azaltılabilmektedir. Bu yöntem kademeli yanma ile birlikte uygulandığında NO_x yayınımlarında toplam % 21 oranında bir düşüş elde edilebilmektedir.

Diğer azot oksit indirgeme metodları ise aşağıdaki şekilde özetlenebilmektedir:

NO_x ları amonyak ile reaksiyona sokularak moleküler azota dönüştürmek. Bu işlem iki şekilde gerçekleştirilmektedir:

a) Katalitik olmayan indirgeme: Bu yöntemde amonyak katalizörlü veya katalizörsüz olarak kullanılabilir. Burada önemli olan nokta NO_x derişiminin düşürülmesi sırasında artık amonyak miktarının da minimum seviyede tutulabilmesidir. 1148-1248 K (875-975 °C) arasındaki sıcaklıklarda NO_x yayınımları minimum olmaktadır. NH₃ : NO_x mol oranı 1 olduğunda , optimum reaksiyon sıcaklığı 1323 K ve maksimum NO_x dönüşümü %50 olmaktadır.

b) Katalitik indirgeme yöntemi : Uygun bir katalizör kullanılması ile optimum reaksiyon sıcaklığının düşürülmekle ve NO_x yayınımlarının % 90 oranında azaltılması mümkün olmaktadır. Katalizör kullanıldığı durumlarda 623-723 K (350-450 °C) uygun bir sıcaklık olmaktadır. Bu nedenlerle seçici katalitik indirgeme (SCR) Japonya'da en çok uygulanan yöntem olmaktadır. Bununla birlikte bu yöntemde SO₃ zehirlenmesi, toz yapışması ve tıkanması sonucu katalizör etkinliğinin düşmesi , sıcaklık dalgalanmaları ve artık amonyak önemli dezavantajlar olarak görülmektedir.

Yaş sıyırma: Japonya'da uygulamaya konan bir yöntemdir. Bununla birlikte küçük çaptaki ilk araştırmalar Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da yapılmıştır. Burada karşılaşılan en büyük problem azot monoksidin inert bir madde olması nedeni ile uygun ve etkin bir sıyırıcı madde bulunmasıdır. Bunun üstesinden gelmek amacı ile araştırmacılar azot monoksidi doğrudan absorplama veya azot monoksidi azot dioksite oksitleme yoluna gitmişlerdir. Bir başka yöntem ise beslemedeki NO/NO₂ oranını absorpsiyon işleminden önce 1 olacak şekilde ayarlamaktır.

2.3.4. Akışkan Yataklı Sistemlerde NO_x Kontrolü

Akışkan yataklı yakma sistemlerinin geleneksel yakma sistemlerine oranla sahip oldukları en önemli avantajları yanma sıcaklığının 1273 K nin altında olması nedeni ile NO_x yayınının düşük seviyelerde kalmasıdır. Bilindiği gibi havanın azotu 1273 K sıcaklıkların üzerinde oksijen ile birleşerek NO_x ları oluşturmaktadır. Akışkan yataklı sistemlerde oluşan NO_x lar termal azottan çok yakıtın içerdiği azottan kaynaklanmaktadır.

Lyngfelt v.ç.a. [58] 16 MW güce sahip akışkan yataklı yakıcıda 1153-1163 K de SO₂ çıkışı ile birlikte CaSO₄ ın tekrardan CaO e parçalandığını ve CaO/CaSO₄ oranının NO oluşumunda ve indirgenmesinde katalizör rolü oynadığını saptamışlardır. CaSO₄ parçalanması CO ve H₂ varlığına ve düşük NO_x yayınımlarının indirgen şartlara bağlı olduğunu açıklamışlardır.

Horio v.ç.a [74] akışkan yataklı yakma sistemlerinde NO_x yayınımlarını hedef değer olan 50 ppm sınırına çekebilmek amacı ile Japonya'da yapılan çalışmaları derlemişlerdir. Kademeli yanma, stokiyometrik oranın altındaki akışkan yatak yakma koşullarında yapılan çalışmalarda özellikle ikincil havanın beslenme noktasının NO yayınımları üzerindeki etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre 0.7 m civarında ikincil hava beslemesi yapılan çalışmada NO 200 ppm civarında ölçülürken, besleme noktası 1.8 metreye yükseltildiğinde NO yayınımları 75 ppm seviyelerine düşmektedir.

Fennelly v.ç.a [75] 1965-1980 yılları arasında akışkan yataklı yakma sistemlerinden alınan NO_x yayınımları ile ilgili verileri değerlendirilmiş ve kazan kapasiteleri 5-10 MW ın üzerindeki sistemlerde NO_x yayınımlarının sınır değerlerin altına çekilebildiğini belirlemiştir. Aynı araştırmacılar NO_x ile SO₂ arasındaki ilişkiyi incelemişler ve birincil hava oranının 0.95 civarında olması gerektiğini saptamışlardır. Bunun tersine, birincil hava oranının azaltılması ile NO_x yayınımlarının arttığını belirtmişlerdir.

2.3.4.1. Yatak Sıcaklığının NO_x Yayınımları Üzerindeki Etkisi

Yatak sıcaklığının artması ile NO_x yayınımlarında genel bir artma eğilimi gözlenmektedir.

Tatebayashi v.ç.a [56] yatak sıcaklığının artması ile NO_x yayınının arttığını saptadıkları çalışmalarında 1073-1103 K sıcaklıkta kükürt giderme etkinliğinin

maksimum olduğunu fakat sıcaklığın 1123 K e yükseltilmesi ile etkinliğin azaldığını belirlemişlerdir.

Bir başka çalışmada Wittler v.ç.a [76] 973 ile 1473 K sıcaklıklarda CO mol fraksiyonlarına karşı NO yayınımlarındaki dalgalanmaları saptamışlardır. Elde edilen sonuçlardan ortamdaki yüksek CO derişimlerinden dolayı NO derişimlerinin düşük seyrettiği gözlenmektedir. Shimizu v.ç.a. [77] benzer sonuçlara varmıştır.

Hansen v.ç.a [78] indirgen şartlarda NO ve N₂O yayınımlarının azaldığını, özellikle sıcaklıklar 1073 K den 1223 K e yükseltildiğinde bu yayınımların önemli ölçüde azaltılabildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, yüksek kükürt içeriğine sahip olan kireçtaşlarının yüksek olan katalitik etkilerinden dolayı NO ve N₂O yayınımlarının azaltılması açısından etkili oldukları görüşünü savunmuşlardır .

Oude Lohuis v.ç.a [79], 0.029 m çapındaki bir akışkan yatakta 6 farklı kömür örneği ile yürüttüğü çalışmalarda 900-1000 K gibi düşük sıcaklıklarda NO yayınımlarının 200-500 ppm arasında, buna karşın N₂O yayınımlarının ise 100-400 ppm arasında ölçmüşlerdir. 1173 K in üzerindeki yatak sıcaklıklarında NO yayınımları 300 ile 1100 ppm arasında belirli bir artma eğilimi gösterirken N₂O yayınımları 100 ppm e düşmektedir. Burada vurgulanan diğer bir nokta ise yanma sıcaklığının azalması ile N₂O yayınımlarının artması buna karşın NO yayınımlarının artmasıdır.

Diğer bir çalışmada, Butting v.ç.a [80] 0.07 m çapındaki akışkan yatakta İngiliz kömürlerini farklı sıcaklıklarda yakarak yürüttükleri deneylerde sıcaklıkların 973 ile 1273 K arasında değiştirilmesi ile NO yayınımlarının arttığını, buna karşın bir önceki çalışmaya paralel olarak N₂O yayınımlarının azaldığını saptamışlardır.

Buchtela v.ç.a [42], 0.2 m çapındaki akışkan yatakta sıcaklığın NO ve N₂O yayınımları üzerindeki etkisinin büyük olduğunu belirtmişlerdir.

Diğer bir araştırma Marshall v.ç.a [64] tarafından yapılmış ve Killoch kömürü ve Ballidon kireçtaşını kullanarak kömürün tek başına yakıldığı deneylere oranla daha düşük NO_x yayınımları elde etmişlerdir. Bu çalışmada kireçtaşı yatağın 283 ile 293 K civarında düşük seyretmesine neden olmuştur. Bununla birlikte, kademeli yanmanın NO_x yayınımlarını 400 mg/m³ seviyelerinden 200 mg/m³ seviyelerine düşürdüğü belirlenmiştir. Bunun yanında sıcaklık artışının NO_x yayınımları üzerindeki etkisi incelendiğinde 1083 K de 35 ppm olan NO_x yayınımları değeri sıcaklık 1123 K e çıkartıldığında 115 ppm e ulaştığı gözlenmiştir.

Vickers v.ç.a [63], yatak sıcaklığındaki 373 K lik bir sıcaklık azalmasının NOx yayınımlarında 100 mg/m^3 lük bir azalmayı beraberinde getirdiğini saptamışlardır. Bu çalışmada, baca gazındaki NOx yayınımları 155 ile 770 mg/m^3 arasında değişmektedir.

2.3.4.2. Hava Fazlalığının NOx Yayınımları Üzerindeki Etkisi

Akışkan yataklı sistemlerde hava fazlalığına azaltılıp artırılmasına bağlı olarak NOx yayınımları kontrol edilebilmektedir. Hava fazlalığının azaltılması ile NOx yayınımlarının azaltılabildiği konusunda çeşitli görüşler öne sürülmektedir. Bu sırada SO₂ sıyırma verimi de düşmektedir[33].

Shimizu v.ç.a [77] kalsine edilmiş kireçtaşı kullandığı deneylerinde NOx sıyırma etkinliğinin SO₂ sıyırılması ile paralel bir şekilde arttığını saptamışlardır. Bu sırada, tek kademeli hava beslemesi sırasında N₂O yayınımlarının çok az düşme gösterirken kademeli yanmada hiç değişmediğini belirlemişlerdir.

Tatebayashi v.ç.a [56] iki kademeli yanma testlerinde birincil hava oranının en önemli etkisinin NOx yayınımlarında ortaya çıktığını, NOx yayınımlarının birincil hava oranı azaltıldığında hızlı bir şekilde düştüğünü ve 0.95 lik birincil hava oranının yayılım için minimum değer olduğunu saptamışlardır. Birincil hava oranı daha da düşürüldüğünde NOx yayınımları artmaya başlamaktadır. İkincil hava beslemesi de besleme noktasının konumuna bağlı olarak NOx yayınımları üzerinde etkili olmaktadır. Aynı araştırmacılar, 1073 K de yapılan deneylerde ikincil hava besleme yüksekliğinin NOx yayınımları üzerindeki etkisini incelemişler ve elde ettikleri sonuçlara göre ikincil hava beslemesi ne kadar yüksekten yapılırsa NOx yayınımlarının o derece düşük olacağını saptamışlardır. Bununla birlikte NOx yayınımlarının daha aşağıya düşürülemeyeceği bir noktanın varlığını unutmamak gerekmektedir.

İki ve üç kademeli yanma NOx yayınımlarını etkileyebilmektedir. Fakat özellikle iki kademeli yanmanın en yüksek NOx sıyırma etkinliğine sahip olduğu belirtilmektedir [56,65,78-80].

Marshall v.ç.a [64], birincil hava/yanma oranının NOx yayınımları üzerinde % 50 oranında düşmeye neden olduğunu bunun da kademeli yanma sonucu gerçekleştiğini belirlemişlerdir.

Buchtela v.ç.a [42], 15 KW gücündeki akışkan yataklı sistemde ikincil hava besleme yüksekliğinin etkisini incelemiş ve ikincil hava beslemesi yapılmadığı durum ile 1.4 m yükseklikten beslemenin yapıldığı durum arasında NO_x yayınımlarında 80 ppm civarında bir azalma olduğunu saptamışlardır.

Krishnan v.ç.a [81], yüksek kül içeriğine sahip kömürler kullanarak 1x1 m² lik akışkan yataklı sistemde yürüttükleri yakma deneylerinde NO_x yayınımlarının hava fazlası ile arttığı sonucuna varmışlardır.

Ekinci [33] akışkanlaştırıcı hava ile stokiyometrik hava arasındaki oranın NO_x yayınımları üzerinde etkili olduğunu ve akışkanlaştırıcı havanın artması ile NO_x yayınımlarının arttığını vurgulamıştır.

Vickers v.ç.a [63] baca gazındaki O₂ miktarını %1 oranında düşürerek NO_x yayınımlarında 100 mg/m³ civarında azalma sağlamışlardır.

2.4. Akışkan Yataklı Sistemler İçin Yapılan Modelleme Çalışmaları

Akışkan yataklı yakma sistemlerinin modellenmesi ve bu konuda ilk kabullerle yapılan modelleme çalışmaları son derece fazladır.

Baron v.ç.a.[82] 1955'li yıllarda başlattıkları çalışmalarda genellikle yanma verimi üzerinde durulmuştur. La Nauze [83] 1982 yılına kadar yapılan kinetik çalışmaları derlemiştir. 0.1 m çapındaki akışkan yatakta petrokok yakılarak tanecik ve yatak sıcaklıklarını inceleyerek modellemiştir.

Günümüzde yapılan önemli bir akışkan yataklı yakıcı modelleme çalışması Souza de Santos [84] tarafından gerçekleştirilmiş ve Babcock and Wilcox şirketinin akışkan yataklı yakıcısından elde edilen test sonuçları ile model program sonuçları karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür. Kararlı halde çalışan akışkan yataklı sistemde, sorbent beslemesinin sürekli yapıldığı durumlar göz önüne alınarak model denklemler geliştirilmiştir.

Van den Berg [85] 1 m/s akışkanlaşma hızı, 1143 K (870 °C) yatak sıcaklığı ve 8.5×10^{-4} m tane boyutundaki kuartz kumu kullanarak elde edilen çalışma sonuçlarından hareketle bir model oluşturmuştur. Diğer bir çalışmada, Henttonen v.ç.a. [86] SO₂ ve NO_x yayınımları için iki model denklem oluşturmuş ve optimizasyona yönelik değerlendirmeler yapmıştır. Model denklemlerde, SO₂ ve

NO_x yayınımları, yatak ve serbest bölge sıcaklıkları ile birincil hava beslemesine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Oluşturdukları regresyon modeli $SO_2 = 3.03 T_{bed} + 0.035 T_{bed} \lambda_{prim} - 2047$ şeklinde verilmektedir. Burada λ_{prim} birincil hava katsayısı, T_{bed} ise yatak sıcaklığıdır. SO₂ ise baca gazındaki kükürt dioksit yayınımlarını simgelemektedir (mg/MJ).

Ayrıca Alvfors v.ç.a. [87] kireçtaşı ve dolomitin kalsinasyon, sinterleşme ve sülfatlanmalarının modellenmesini yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar yanmanın ele alınmadığı modelde kireçtaşının kalsiyum sülfata dönüşümü hakkında kalitatif tahminlerin mümkün olduğu buna karşın kantitatif tahmin yapmanın zor olduğunu ortaya çıkartmıştır.

Lin v.ç.a. [88] gaz-katı reaksiyonlarına bağlı olarak genel bir analitik model ortaya koymuşlar ve SO₂-NO_x etkileşimini incelemişlerdir. Ayrıca kalsiyum bazlı sorbentlerle SO₂ sıyırma ve bu sorbentlerin akışkan yataktaki NO_x oluşumu üzerindeki katalitik etkileri incelenmiştir.

Lyngfelt v.ç.a. [89] SO₂ sıyırmada sıcaklıkla bağımlılık ve kireç dönüşümünü incelemişlerdir. Çeşitli literatür sonuçlarına göre bir derleme yapılmıştır. Tanecik fazındaki indirgen şartların sonucu olarak SO₂ sıyrmanın gerçekleştiği ve sıcaklık ile bağıntısı incelenmektedir.

Saxena[90] son yıllara kadar yapılan akışkan yatak modelleme çalışmalarını SO₂ tutma yönü ile birlikte ele alarak bir derleme yapmıştır.

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Linyit ve Yatak Malzemeleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan Elbistan linyit numunesi Türkiye Kömür İşletmeleri'nin (TKİ) Afşin-Elbistan İşletmesi'nin açık üretim yapan ocaklarından alınmıştır. E1 olarak kodlanan bu linyit, TEK santraline verilen besleme hattından 4 ton numune halinde alınmıştır.

Numuneler çeneli bir kırıcıda kırılıp elendikten sonra 1×10^{-3} - 2×10^{-3} , 2×10^{-3} - 3.33×10^{-3} ve 4×10^{-3} - 5×10^{-3} m'lik üç değişik tanecik fraksiyonu halinde içiçe geçirilmiş naylon torbalar içine konularak hava ile teması kesilmiş ve saklanmıştır.

Yatak malzemesi olarak kuartz kumu, kireçtaşı ve iki farklı dolomit kullanılmıştır. Kuartz kumu Ege Nazilli bölgesinden, kireçtaşı Akçimentoya ait Çatalca ocağından, Dolomitler ise (D1 kodlu) Türkiye Şişe Cam Fabrikaları'nın Kapaklı bölgesinden ve (D2 kodlu) Gölcük bölgesinden alınmıştır. Yatak malzemeleri elenerek 3×10^{-4} - 6.3×10^{-4} , 6.3×10^{-4} - 1×10^{-3} ve 1×10^{-3} - 1.25×10^{-3} m aralıklarındaki üç fraksiyon halinde ayrılmış ve deneylerde kullanılmıştır. Ayrıca deneylerde kullanılan orijinal trona numunesi Beypazarı'ndan ve pelletlenmiş yapay numune ise TUBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nden alınmıştır.

3.2. Numunelere Uygulanan Analizler

Kullanılan numune ve yatak malzemelerinin özelliklerini saptamak amacıyla TSE standartları, bunların bulunmadığı hallerde ise ASTM ve DIN standartlarında belirtilen analiz yöntemleri kullanılmak suretiyle gerekli analizler yapılmıştır.

3.2.1. Linyite Uygulanan Analizler

3.2.1.1. Kısa ve Elementel Analizler ve Isıl Değer Tayinleri

Linyit numunelerinde toplam nem TS 690, kül TS 330, uçucu madde TS 711'e göre hesaplanmıştır. Sabit karbon miktarı, yüze tamamlanarak hesaplanmıştır. Isıl değerler DIN 1900'e göre izotermal kalorimetre bombası kullanılarak hesaplanmıştır.

Karbon, hidrojen, azot, oksijen ve kükürt değerleri Heraus marka elementel analiz cihazı kullanılarak belirlenmiştir (Tablo 3-1).

3.2.1.2. Linyitin Boyut ve Yoğunluk Tayinleri

Linyit numuneleri çeneli kırıcıda kırıldıktan sonra SWECO marka sürekli çalışan bir elek sisteminden geçirilmiştir. Bu çalışma sonucunda N1, N2 ve N3 ile kodlandırılan 10^{-3} - 2×10^{-3} , 2×10^{-3} - 3.33×10^{-3} ve 4×10^{-3} - 5×10^{-3} m aralıklarında üç linyit fraksiyonu elde edilmiştir. Bu aralıktaki linyit numunelerinin çeşitli yoğunlukları Quanta Chrome marka civa porozimetresi kullanılarak ölçülmüştür.

3.2.2. Külde Yapılan Analizler

3.2.2.1. Küllerin Kimyasal Analizi

Külde yapılan kimyasal analizler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O ve Na_2O 'in analizini kapsamakta olup ASTM D 2795-69'a göre gerçekleştirilmiştir (Tablo 3-2).

3.2.2.2. Özgül Kül Sıcaklıklarının Tayini

Kül deformasyon, yumuşama, yarı küreselleşme ve akma (ergime) sıcaklıkları, ASTM D 1857-68'e göre LECO-AE-500 cihazı kullanılarak TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nde yaptırılmıştır (Tablo 3-2).

3.2.3. Yatak Malzemesine Uygulanan Analizler

3.2.3.1. Kuartz, Kireçtaşı ve Dolomitlerin Kimyasal Analizleri

Kuartz, kireçtaşı ve dolomitler için SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO ve MgO ile kızdırma kayıpları malzemenin alındığı kurumlarda ve standart yöntemlerle yapılmıştır (Tablo 3-3).

Tablo 3-1 Farklı Linyit Fraksiyonlarının Kısa ve Elementel Analizleri

Orijinal Baz (%)	N1	N2	N3
Nem	18.7	20.0	21.3
Kül	30.5	39.6	25.0
Uçucu madde	27.5	14.0	30.5
Sabit karbon	24.3	26.4	23.2
C	33.1	27.0	34.75
H	3.65	2.55	3.95
N	1.20	1.00	1.25
S	0.2	0.5	0.9
Alt Isıl Değeri (kJ/kg)	7014	6808	10625

Tablo 3-2 Linyit Külünün Anorganik Yapısı ve Özgül Sıcaklıkları

Oksit Yüzdesi (%)	Elbistan
SiO ₂	5.5
Al ₂ O ₃	12.7
Fe ₂ O ₃	4.2
Na ₂ O	0.9
K ₂ O	2.28
MgO	4.93
CaO	9.4
Cl ₂	0.086
Kül Deformasyon Sıcaklığı (°C)	1015
Kül Yumuşama Sıcaklığı (°C)	1034
Yarı Küreselleşme Sıcaklığı (°C)	1131
Akma (ergime) Sıcaklığı (°C)	1178

Tablo 3-4 Kükürt Türleri

Kükürt Türleri	N1	N2	N3
Yanabilen S	1.12	0.66	1.83
Sülfat S	0.44	0.94	0.33
Pirit S	0.56	0.97	0.28
Toplam S	2.35	1.72	2.1

Tablo 3-3 Yatak Malzemelerinin Kimyasal Analizleri

	D1	D2	Kireçtaşı
SiO ₂	0.50	0.79	1.84
Al ₂ O ₃	0.60	0.21	2.84
Fe ₂ O ₃	0.04	0.09	1.93
Na ₂ O	0.26	-	0.32
K ₂ O	0.22	-	0.20
MgO	22.0	19.8	-
CaO	37.3	32.2	48.5
TiO ₂	-	-	0.19
Kızdırma Kaybı	46.8	46.8	43.1

Tablo 3-5 Sorbentlerin Yığın Yoğunlukları

		Yığın Yoğunluğu , g/cc	
		0.6-1 mm	1-1.25 mm
D1	A	2.8603	3.3532
	B	1.9241	1.5190
D2	A	2.8059	2.8953
	B	1.8633	2.4488
Kireçtaşı	A	2.4727	2.4245
	B	2.4647	1.6101
Trona	B	2.4840	-

A: Kalsine Olmamış (Yaş)

B: Kalsine Olmuş

Tablo 3-6 Sorbentlerin Görünür Yoğunlukları

		Görünür Yoğunluk , g/cc	
		0.6-1 mm	1-1.25 mm
D1	A	2.8945	3.4485
	B	2.6775	3.2987
D2	A	2.8108	2.9100
	B	2.9660	2.9417
Kireçtaşı	A	2.7226	2.5657
	B	3.5128	2.7565
Trona	B	3.0038	

A: Kalsine Olmamış (Yaş)

B: Kalsine Olmuş

Tablo 3-7 Sorbentlerin Yüzey Alanları

		Toplam Yüzey Alanı, m ² /g	
		0.6-1 mm	1-1.25 mm
D1	A	0.4025	0.4784
	B	11.4335	17.6107
D2	A	0.0181	0.0675
	B	10.9076	7.1683
Kireçtaşı	A	1.9478	0.6013
	B	4.8977	4.7534
Trona	B	0.4749	

A: Kalsine Olmamış (Yaş)

B: Kalsine Olmuş

3.2.3.2. Kükürt Türlerinin Tayini

Kükürt tayinleri TSE-363 ve TSE-329 standartları ile yapılmıştır (Tablo 3-4).

3.2.3.3. Yatak Malzemesi Yoğunluk ve Yüzey Alanı Tayinleri

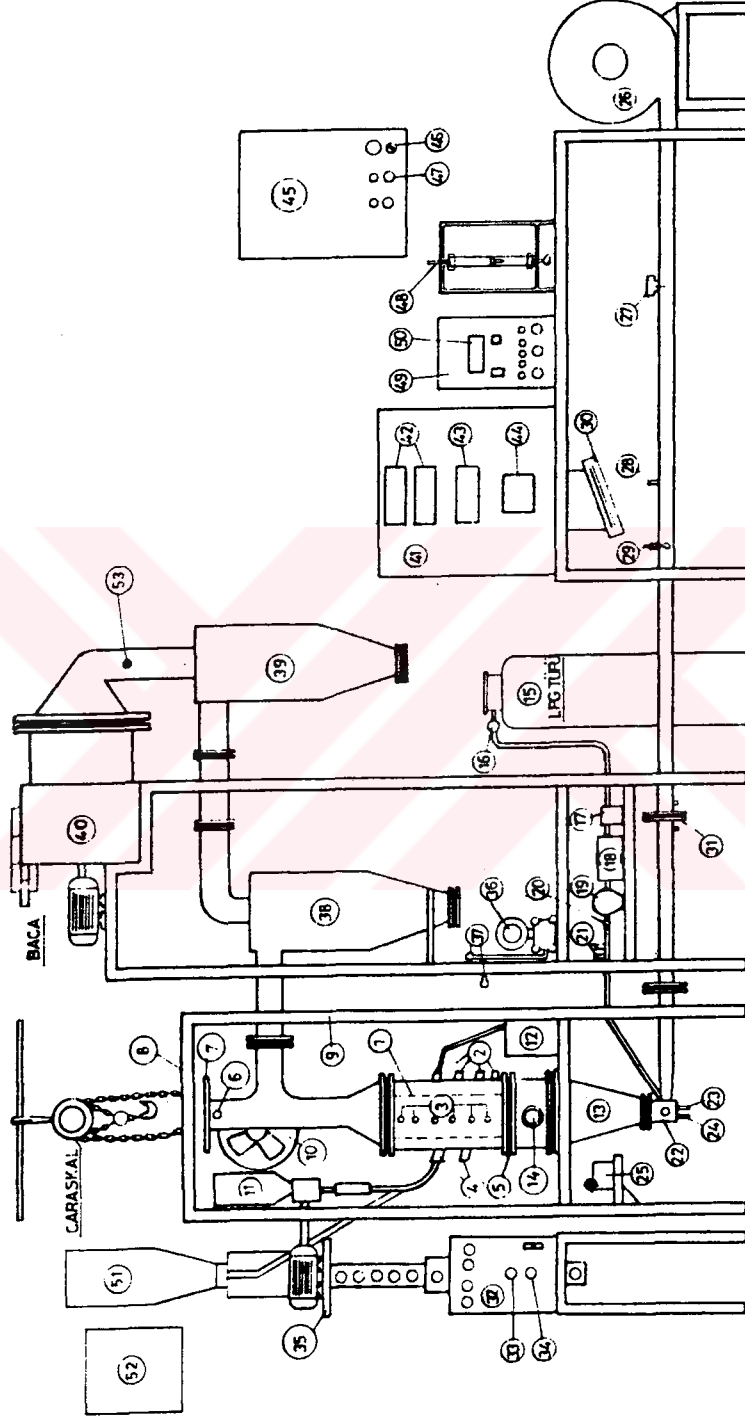
Yatak malzemeleri SWECO marka sürekli çalışan bir elek sisteminde 3×10^{-4} - 6.3×10^{-4} , 6.3×10^{-4} - 1×10^{-3} ve 1×10^{-3} - 1.25×10^{-3} m aralıklarındaki fraksiyonlara ayrılmış ve elde edilen fraksiyonların yoğunlukları ve yüzey alanları linyit örneklerine uygulanan yöntemlerle belirlenmiştir (Tablo 3-5), (Tablo3-6), (Tablo3-7).

3.3. Deney Düzeneği

Deneylerde kullanılan düzenek sürekli çalışabilecek, elle kumandalı, yarı otomatik ve bilgisayarla kontrol edilebilecek şekilde yapılmıştır. Şekil 3-1'de şematik olarak gösterilen deney düzeneği temel olarak akışkan yatak, ön ısıtma sistemi, besleme, basınç ölçme düzeneği, siklonlar ve emiş fanı ve kontrol ünitelerinden oluşmaktadır.

3.3.1. Akışkan Yatak, Ateşleme, Besleme ve Ölçme Sistemleri

Akışkan yatak, yanma odası, rüzgar odacığı ve dağıtıcı elekten oluşmaktadır. İnert yatak malzemesinin doldurulduğu ve akışkanlaşma ve yanma olaylarının gerçekleştiği yanma odası 0.188 m çapında ve 1 m yüksekliğinde paslanmaz çelikten yapılmış silindirik bir gövdeden oluşmaktadır. İlerideki bölümlerde yanma odası akışkan yatak olarak tanımlanmıştır. Akışkan yatağın gövdesi üzerinde dağıtıcı elekten başlamak üzere değişen yüksekliklerde ısı çift girişi, kömür besleme ve kül çekme boruları ile basınç ölçmek ve gaz çekmek için gerekli problemlerin girişleri için delikler bulunmaktadır. Deneylerde 3 adet ısı çifti kullanılmış ve bunlar dağıtıcı elekten başlamak üzere 0.01, 0.05 ve 0.4 m yüksekliğe yerleştirilmiştir. Kömür ve tutucu besleme borusu 0.2 m yükseklikte gövdeye 45°'lik açı ile kaynatılmış 3/4" standart borudan ibarettir. Besleme girişlerinin karşısında merkezleri 0.2, 0.3 ve 0.4 m yüksekliklere gelecek şekilde açılmış taşma (kül çekme) boruları bulunmaktadır. Bu borular aynı zamanda dinamik yatak yüksekliği ayarlama görevi de yapmaktadır ve Şekil 3-1'de görüldüğü gibi 45°'lik bir açıyla aşağı doğru gövdeye bağlanmıştır.



1 Akışkan Yatak, 2 Taşma Boruları, 3 Isıl Çiftler, 4 Kömür ve Sorbent Besleme Girişi, 5 Dağıtıcı Elek, 6 Asma Kolu, 7 Gözetleme Penceresi, 8 Camlı Kapak, 9 Akışkan Yatak Odası, 10 Aspiratör, 11 Sorbent Deposu, 12 Kül Toplama Kabi, 13 Rüzgar Odacığı, 14 Gözetleme Penceresi, 15 LPG Tüpü, 16 Tüp Manometresi, 17 Gaz Filtresi, 18 Gaz Reglilatörü, 19 Oransal Reglilatör, 20 Manometre, 21 Selenoid Valfler, 22 Ateşleme Beki, 23 İyonizasyon Elektrodu, 24 Ateşleme Elektrodu, 25 Ateşleme Transformatörü, 26 Fan 27 Akış Analizörü, 28 Uyarı Probu, 29 Anemometre, 30 Eğik Manometre, 31 Orifizmetre, 32 Sorbent Besleme Kontrol Panosu, 33 Seçici Anahtar, 34 Potansiyometre, 35 Hareketli Tabla, 36 Park Basınç Transmitteri, 37 Selenoid Valfler, 38 1. Sıkıl, 39 2. Sıkıl, 40 Emiş Fani, 41 Sıcaklık Okuma Panosu, 42 Sıcaklık Okuyucular, 43 Tarayıcı, 44 Altı Nokta Yazıcı, 45 Fan Kontrol Panosu, 46 Seçici Anahtar, 47 Potansiyometre, 48 Akışölçer, 49 Ateşleme Kontrol Panosu, 50 Ateşleme Panosu Sıcaklık Okuyucusu, 51 Kömür Deposu, 52 Kömür Besleme Kontrol Sistemi, 53 Gaz Numune Alma Yeri ve Seramik Sonda.

Şekil 3-1 Akışkan Yataklı Yakma Sistemi, Ölçme ve Kontrol Üniteleri

Yatağın en altında 3/4"lik bir boru girişi daha vardır. Boru dağıtıcı eleklerle aynı seviyededir ve yatak malzemesini boşaltmakta kullanılmaktadır. Boşaltma borusu basınç probu ve ısı çift bağlantılarına da elverişlidir ve gerektiğinde bu amaçla da kullanılabilir. Yatak cidarları 5 cm kalınlığında bir yalıtım çamuru ile sıvanmış ve alüminyum bir levha ile de mekanik olarak desteklenmiştir.

Akışkan yatak yukarıdan, seri halde çalışılan iki siklona bağlanmıştır. Siklon bağlantısının dirsek yaptığı yerde açılır kapanır bir gözetleme penceresi bulunmaktadır. Akışkan yatak rüzgar odacığının konik kısmı hariç olmak üzere, Şekil 3-1'de görüldüğü gibi saçtan yapılmış dikdörtgenler prizması şeklinde bir odacığa yerleştirilmiştir. Odacığın tavanında camlı bir kapak mevcuttur. Gerektiğinde bu kapak açılarak akışkan yatağın üstünde tavana bağlanmış bir caraskal sistemi yardımıyla siklon bağlantıları ve akışkan yatak askıya alınabilmektedir. Kömür besleme sisteminin tamburlu döner besleyici kısmı ve kömür deposu bu odacığın içinde yer almaktadır. Yataktan sızan gazlar bir aspiratör tarafından emilerek bacaya verilebilmektedir. Yataktan taşan küller ise bir toplama kabında toplanmaktadır. Ön ısıtma sürecinde yatak malzemesinin taşınmasını önlemek için taşma boruları kapalı tutulmaktadır.

Konik tabanlı silindirik bir gövde şeklinde olan rüzgar odacığı ön ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. Bu bölüm alttan ateşleme beki, üstten ise dağıtıcı eleğe bağlıdır. Silindirik kısmında LPG-hava karışımının yanmasını gözlemek amacıyla kullanılan bir gözetleme penceresi bulunmaktadır.

Dağıtıcı elek, rüzgar odacığı ile yanma bölgesi arasında yer almaktadır. Deneylerde delikli düz dağıtıcı elek kullanılmıştır. Elek 3.2×10^{-3} m kalınlığında ve 0.2 m çapındaki 310 kalite paslanmaz çelik levhadan yapılmıştır. Delik (orifiz) çapları 9×10^{-4} m olup karelerin köşelerine gelecek şekilde delinmiştir. Delikler arası mesafe merkezden merkeze olmak üzere 6.2×10^{-3} m'dir. Açık alanların oranı % 1.9'dur.

Akışkan yatağın ön ısıtılması dolaylı bir şekilde ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) kullanılarak yapılmaktadır. Gerekli gaz, sanayi tipi bir LPG tüpünden sağlanmaktadır. LPG ve hava dağıtıcı eleğin altında karıştırılıp yakılmakta, çıkan gazlar akışkan yatağın içinden geçerek yatağı istenen sıcaklığa ısıtmaktadır. Ön ısıtma ünitesinin en önemli bölümü ateşleme sistemidir. Bu sistem temel olarak ateşleme beki, iki tane gaz regülatörü, selenoid valfler ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Tüp çıkışında basıncı 2 bar olarak sabit tutulan LPG bir filtreden geçerek gaz regülatörüne gelmekte ve burada basıncı 80 mbar düşürüldükten sonra hava/gaz oranlarını ayarlayan bir oransal regülatörden, bir manometreden ve iki selenoid valften

geçtikten sonra beke ulaşmaktadır. Oransal regülatör hava hattından aldığı uyarıya göre gaz akışını ayarlamaktadır. Gaz hattında kullanılan malzemenin seçiminde hattaki basınç düşüşleri göz önüne alınmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda 17 Mkal/h gücünde bir bek seçilmiştir. Bekte biri iyonizasyon, diğeri ise ateşleme elektrodu olmak üzere iki elektrot bulunmaktadır. Ateşleme elektrodu 10 kV'luk bir ateşleme transformatörüne bağlıdır.

Yanma ve akışkanlaştırma havası fan vasıtası ile sağlanmaktadır. Hava debisi hız kontrol birimi yardımıyla ayarlanabilmektedir. Hız kontrol birimine bağlı bir fren sistemi bulunmaktadır. Fanı rüzgar odacığına bağlayan hava hattı üzerinde hava akışını kontrol eden bir akış anahtarı (flow switch), oransal gaz regülatörüne bağlı uyarı probu, ananometre, orifizmetre ve buna bağlı eğik manometre gibi donanımlar bulunmaktadır.

Kömür (linyit) besleme sistemi mekanik kısım ve envertörden oluşan iki bölümde incelenebilir. Mekanik kısımda 0.75 kW'lık redüksiyonlu bir motor bulunmaktadır. 1360 dev/dak'lık motor çıkış devri, redüksiyonla 60 dev/dak'ya düşürülmektedir. Hareket miline bağlı tambur kömür besleme deposundan eşit hacimlerde linyit alarak besleme borusu yardımıyla akışkan yatağa beslenmektedir. Envertör kontrol panosu üzerinde bulunan potansiyometre yardımı ile linyit beslemesi kontrol edilebilmektedir. Bilgisayar ile kontrol için motora gönderilen belirli bir gerilim yardımıyla tamburun dönüş hızına göre ayarlanarak yapılmaktadır. Gerilim artırılarak linyit besleme debisi artırıldığı gibi, gerilimin azaltılması ile besleme debisi azaltılabilmektedir. Farklı tane boyutundaki linyit numuneleri için her gerilime karşı gelen besleme debileri kalibre edilmiştir. Kalibrasyon değerleri bilgisayar programında yer almaktadır.

Sorbent besleme sistemi kontrol panosu ve mekanik kısımdan oluşmuştur. Mekanik kısımda 0.75 kW'lık redüksiyonlu bir motor aşağı yukarı doğru hareket eden bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Çıkış devri 1360 dev/dak olan motora 1/60 oranında redüksiyon uygulanarak hareket miline bağlı tamburu maksimum 22 dev/dak ile döndürmek mümkün olmaktadır. Hareketli tambur üzerindeki kanatlar yukarıda bulunan sorbent deposundan eşit hacimlerde kireçtaşı veya dolomit alarak besleme borularına vermektedir. Yerçekimi etkisi altında yatağa düşen sorbent taneciklerinin sürüklenmesini kolaylaştırmak ve besleme borusunu soğutmak amacıyla belirli miktarda hava beslemesi yapılmaktadır. Ayrıca sorbent besleme sistemi üzerinde bulunan bir seçici anahtar ile sistemin el veya bilgisayarla kontrolünü sağlamak olasıdır. Elle kontrolde, kontrol panosunda bulunan bir potansiyometreden

yararlanılmaktadır. Bilgisayarla kontrolde belli bir gerilim uygulanması, tamburun belli bir dönüş hızına karşı gelecek şekilde ayarlanmıştır. Gerilimin artmasıyla dönüş hızı artırılmakta, gerilimin düşürülmesiyle azaltılabilmektedir.

Değişik sorbentler için belli bir gerilime karşılık sorbent miktarları ölçülerek kalibre edilmiştir. Herbir gerilimin karşı geldiği g/dak cinsinden sorbent debisini veren bağıntılar bilgisayar programına yüklenmiştir.

Dağıtıcı elek ve yatak basınç düşüşlerini (ΔP_d , ΔP_b) ölçmek için dağıtıcı eleğin hemen altına ve üstüne ve yatak yüzeyinin üstüne 310 kalite çelik borulardan yapılmış probalar yerleştirilmiştir. Bu basınç problemleri içinde su bulunan U manometrelerine bağlanmıştır. U manometrelerinin yanısıra ölçülen basınç farkı değerlerini bilgisayara yüklemek için fark basınç transmitteri kullanılmaktadır. Bu transmittir 0-12.5 mbar ve 0-75 mbar basınç aralıklarında çalışılabilmektedir. Deneylerde transmittir atmosferik basınçta 4 mA, 75 mbar basınçta 20 mA çıkış akımı verecek şekilde ayarlanmıştır. 250 Ω direnç yerleştirilerek bu çıkış akımlarının atmosferik basınçta 1 V, 75 mbar basınçta ise 5 V gerilim oluşturması sağlanmıştır. Bu transmittirde ancak tek bir basınç değeri okumak olasıdır. Transmittirde düşük ve yüksek basınç bağlantıları bulunmaktadır. Birden fazla basıncı okumak için dağıtıcı eleğin altına ve üstüne yerleştirilen problemler, transmittirin yüksek basınç girişine bağlanmıştır. Her prob ile transmittir arasında bir adet selenoid valf bulunmaktadır. Yatağın üst kısmına yerleştirilen prob transmittirin düşük basınç girişine bağlanmıştır. Böylece dağıtıcı eleğin altına yerleştirilen basınç probu hattındaki selenoid valfin kapalı, diğer selenoid valfin açık tutulmasıyla yatak basınç düşüşü (ΔP_b), kapalı selenoid valfin açılması ve açık olanın kapatılması ile de toplam basınç düşüşü ($\Delta P_t = \Delta P_d + \Delta P_b$) ölçülebilmektedir.

Akışkan yatak deney düzeneğinde seri halde bağlı iki adet siklon bulunmaktadır. Her bir siklon giriş ve çıkışlarında sıcaklıkların ölçülmesi ve gaz numunesi alma bağlantıları bulunmaktadır. İkinci siklon bir emiş fanı ile bacaya bağlanmıştır. Emiş fanı ateşlemenin gerçekleşmediği durumlarda yanma odası ve siklonlarda biriken gazların uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır.

3.3.2. Kontrol Üniteleri

Bu üniteye sıcaklıkların okunduğu pano üzerinde 6 kanallı yazıcı ile iki tane Ni-Cr-Ni sıcaklık okuyucusu bulunmaktadır. Bunu yanısıra değişik noktalardan ölçülen sıcaklıkları panoda bulunan bir tarayıcı ile tarayarak izlemek olasıdır. 6 kanallı yazıcı sıcaklıkları değişik renkte özel bir kağıda kaydedilebilmektedir.

Bu ünitedeki fan kontrol panosu içinde hız kontrol birimi mevcuttur. Pano üzerinde bulunan seçici anahtar yardımıyla fan elle veya bilgisayarla kontrol edilebilmektedir. Elle kontrolde hava debisini ayarlamada pano üzerindeki potansiyometreden yararlanılmaktadır.

Ayrıca bu ünitede kömür besleme borusuna verilen havanın debisinin ölçülmesinde kullanılan bir akışölçer mevcuttur.

Ateşleme kontrol panosu üzerinde bulunan seçici anahtarla, sistem el veya bilgisayarla kontrol edilebilir. Ateşlemenin ve ön ısıtmanın elle kontrol edilmesi durumunda, ateşleme kontrol panosundaki fan anahtarı ile çalıştırılır. Fan panosu üzerindeki potansiyometre yardımıyla gerekli hava debisi ayarlanır. Hızlı bir ön ısıtma istenmiyorsa ikinci gaz selenoid valfi anahtarı açılır. Daha sonra yaylı anahtar yardımıyla bekin kontrol beyni devreye alınmaktadır. Ateşleme beyninde mevcut programa göre ateşleme transformatörü yardımıyla 2 saniye süre ile kıvılcım çakmakta, bunu izleyen aşamada 1 selenoid açılmakta ve devreden gaz geçmeye başlamaktadır. Gaz akış başladıktan 3 saniye sonra ateşleme transformatörü devreden çıkmaktadır. Ateşleme transformatörünün devreden çıkmasından 2 saniye veya gazın geçmeye başlamasından 5 saniye sonra iyonizasyon elektrodu alevi tespit ederse ateşleme gerçekleşmiş olmaktadır. Aksi halde 5 saniyelik bekleme süresinden sonra sistem arızaya geçmektedir.

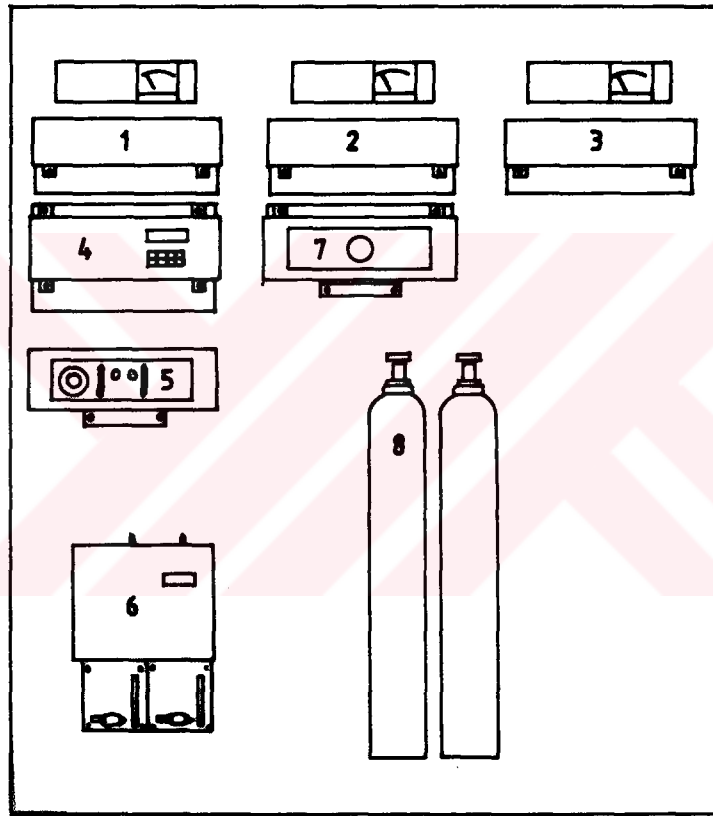
Sistemin arızaya geçmesi arıza lambasının yanması ile anlaşılmaktadır ve yaylı silme anahtarı ile beyin belleği silinmektedir. 5 saniyelik bir süpürme süresinden sonra yukarıda açıklan şekilde ateşleme işlemi tekrarlanmaktadır.

Ateşleme işleminin normal yürümesi durumunda 1. selenoid valf lambası sürekli yanık kalır. İkinci selenoid anahtarı açık durumda ise belli bir süre sonunda 2. selenoid valf de açılır ve geçen LPG miktarı artar. Ateşleme kontrol panosundaki sıcaklık göstergesinin belli bir eşik sıcaklığına ayarlanması ve bu sıcaklığın aşılması durumunda gaz selenoid valfleri otomatik olarak kapanır. Sıcaklığın eşik sıcaklığının altına düşmesiyle ateşleme programı otomatik olarak devreye girer. Ateşleme panosu sıcaklık okuyucusunun ısı çifti dağıtıcı eleğe yakın bir bölgeye yerleştirilir. Elle kontrolde 1073 K (800 °C) eşik sıcaklık olarak seçilmiştir. Ateşleme, yaylı durdurma anahtarı yardımıyla iptal edilebilir.

3.3.3. Gaz Analiz Sistemi

Şekil 3-2 de görülen HARTMANN & BRAUN marka gaz analiz ünitesinin belli başlı bölümleri ve ölçüm metodları aşağıda verilmiştir.

- a) Kalibrasyon tüpleri: Düşük ve yüksek derişimli SO_2 ve CO , NO ve N_2 karışımı ve sıfır gaz olarak bilinen N_2 gaz tüpleri çeşitli gaz ölçüm cihazlarının kalibrasyonu için kullanılmaktadır.
- b) Gaz numune alma probu : Bu prob baca içine uzatılmış 1/2" boru ile flanşta yer alan seramik bir filtreden oluşmaktadır.
- c) Gaz numune alma hattı: Bu hat teflon numune alma hortumu ve kışın gaz numuneyi belirli sıcaklıkta tutmak için gerekli olan bir ısıtma bölümünü içerir.
- d) Gaz soğutma bölümü (CGEK 5): Gaz analiz cihazlarının bulunduğu bölüme gelen gaz numune hattı önce bir soğutma bölümüne girmektedir. Bu bölüme bağlı olarak iki adet kondensat kabı bulunmaktadır.
- e) Gaz numune besleme ünitesi (CGMF 11): Bölümde bir adet membran filtre, iki adet akışölçer ve kalibrasyon sırasında gerekli gaz hatlarını değiştirme düğmesi bulunmaktadır. Soğutma bölümünden geçen gaz numunesi bu bölüme gelerek seramik filtrede tutulmayan tozlardan arındırılır ve akış hızları ayarlanır.
- f) Termomanyetik oksijen analiz cihazı (Magnos 7 G): Mikro işlemci ile kontrol edilen bu ünite üç ayrı yüzde hacim aralığında, 0-10, 0-21 ve 0-21 (N_2 atmosferinde) ölçüm yapabilmektedir. Bu cihazın çalışmasının temeli, diğer gazlardan farklı olarak paramanyetik özelliğe sahip O_2 'nin bu özelliğinin sıcaklığa bağımlı olmasıdır (Curie Kanunu).
- g) Kızıl ötesi (IR) gaz analiz cihazı (Uras 3G): SO_2 ve CO derişimlerini (mg/m^3) izlemek için kullanılan cihazdır. CO için 3 ayrı aralıkta, SO_2 için ise 2 aralıkta ölçüm yapılabilmektedir. Analiz edilecek gaz bu üniteye girdiği zaman NDIR (non dispersive IR) tekniği adı verilen bir metotla, heteroatomik gazların 2.5 μm ile 12 μm dalda boyları arasındaki IR bölgesindeki rezonans adsorpsiyonu ile Lambert-Beer adsorpsiyon kanununa bağlı olarak ölçülür.



Şekil 3-2 Gaz Analiz Sistemi

1 Karbon Monoksit Analiz Cihazı, 2 Kükürt Dioksit Analiz Cihazı, 3 Azot Oksit Analiz Cihazı, 4 Oksijen Analiz Cihazı,
5 Filtre ve Akışmetreler, 6 Soğutma Ünitesi ve Kondensat Kabları, 7 NO₂/NO Katalitik Dönüştürücüsü, 8 Kalibrasyon Tüpleri.

h) Endüstriyel fotometre (Radas 1G): Bu cihaz NO gazının derişimini 2 ayrı aralıkta mg/m^3 olarak ölçmektedir. Prensip, ölçülen gazın radyasyon absorpsiyon özelliklerini UV alanında kullanmaktadır. Burada yine Lambert-Beer absorpsiyon kanunu geçerlidir. Bu cihazda NO ve $\text{NO}+\text{NO}_2$ gazlarını ölçebilmek olasıdır. Bunun için katalitik konvertör kullanılmaktadır. Burada karbon molibden bazlı bir katalitik konvertör NO_2 gazını NO ve O_2 gazlarına dönüştürmektedir.

3.3.4. Bilgisayarlı Ölçme ve Kontrol Ünitesi

Bilgisayarlı kontrol sistemi, sisteme ait ölçümlerin yapılmasında ve bir önceki bölümde anlatılan kontrol ünitelerinin ve deney düzeneğinin çeşitli donanımlarından yararlanılarak sistemin kontrol edilmesinde kullanılmaktadır.

Bilgisayarlı kontrol sistemi Hewlet Packard (HP) 9000/300 serisi bilgisayar, HP yazıcı, HP çizici ile HP 3852A veri toplama ve kontrol ünitesinden (data acquisition/ control unit) oluşmuştur. HP 3852A'nın ön yüzünde tuş takımı ve iki adet ekran bulunmaktadır. Arka yüzünde ise temel konfigürasyon olarak HP44701A voltmetre bulunmaktadır. Ayrıca kullanıcının uygulaması ile 3852A arasında ara birim sağlamak üzere kullanıcının isteğine göre çeşitli kontrol kartları yerleştirilebilecek 8 adet yuva mevcuttur. Bu yuvalara yerleştirilmiş üç kart sırasıyla HP44725A (16 kanallı genel amaçlı anahtar), HP 44727A/B/C kontrol kartı (toplam olarak 6 kanal dijital-analog gerilim dönüştürücü, 6 kanal dijital-analog akım dönüştürücü) ve HP 44705A röle çoğullayıcı (20 adet giriş) dir.

3852A biriminin ekranı vasıtası ile komutları okumak ve hata mesajlarına ulaşmak mümkün olabilmektedir. Birimin ön yüzündeki tuş takımı veya HP-IB arabirimi kullanılarak 300 serisi HP bilgisayar ile programlanabilmektedir.

Bilgisayarlı kontrol sisteminde ayrıca 2 adet bağlantı kutusu da mevcuttur. Bu bağlantı kutularından biri 447525A (16 kanallı genel amaçlı kontrol kartı) ile bağlantılıdır.

107 numaralı anahtar ateşleme transformatörünü devreye almaktadır. 108 ve 109 numaralı anahtarlar gaz, 110 ve 111 numaralı anahtarlar fark basınç transmitteri selenoid valflerini açıp kapatmaktadır.

Diğer bağlantı kutusu 44727A/B/C ve 44705A kontrol kartları ile bağlantılıdır. Kutu üzerindeki 314,315 ve 316 numaralı girişler ısı çiftlerin ölçtükleri gerilimler için ayrılmıştır. Anenometre bağlantısı 312 numaralı kanala yapılmıştır. Fark basınç transmitteri 308 numaralı kanala , alev kontrolü 310 numaralı kanala bağlanmıştır. 306 numaralı kanal NO_x , 300 numaralı kanal SO₂, 301 numaralı kanal CO yayınımlarını, 304 numaralı kanal ise O₂ yüzdesini ölçmektedir. 300 ve 301 numaralı kanallara 2-10 V arası çıkış değeri giderken 304 ve 306 numaralı kanallarda cihaz çıkışı 4-20 mA olduğu için 250 Ω luk direnç eklenmiş ve 1-5 V arasında çıkış alınmaktadır. Kutu üzerinde mevcut 200-203 numaralı çıkışlar 44727A/B/C kontrol kartı ile bağlantılıdır. 202 numaralı çıkış vasıtasıyla 0-10 V gerilim uygulanarak hız kontrol birimine, 200 numaralı çıkış vasıtasıyla 0-10 V gerilim uygulanarak sorbent besleme sistemine ve 201 numaralı çıkış vasıtasıyla da 0-10 V gerilim uygulanarak linyit besleme sistemine kumanda edilmektedir.

3.4. Ölçüm ve Kontrol Programı

Deneylerin yürütülmesinde kullanılan kontrol programı yaklaşık 948 satırdan oluşmaktadır. Program ana program ve alt programlardan oluşmaktadır.

İlk 43 satırda dizi değişkenler, ana ve alt programlarda kullanılan değişkenler ile bazı değişkenlerin başlangıç değerleri tanımlanmaktadır. Program devreye girdiği anda ekran temizlenerek program deneyi tamamlayıcı soruların bulunduğu 676-690 numaralı satırlar arasındaki alt bölüme dallanmaktadır.

44-89 numaralı satırlar arasında ekranın oluşturulması ve fonksiyon tuşlarının tanımlanması yapılmaktadır.

F1 tuşu fan hızının artırılması için 778-789 numaralı satırlar arasında kullanılmaktadır (Çalışma aralığı 0-10 V) .

F2 tuşu fan hızının azaltılması amacıyla kullanılmaktadır. Komutun icrası 791-802 numaralı satırlar arasındadır.

F3 tuşu linyit besleme debisini arttırmak için kullanılmaktadır. Komutun icrası 804-827 satırlar arasında gerçekleşmektedir (0-5 V arasında kalibre edilerek çalışma aralığı belirlenmiştir).

F4 tuşu linyit besleme debisini azaltmak amacı ile kullanılmaktadır. 829-853 numaralı satırlar arasındaki program parçası ile çalışmaktadır. F3 ve F4 tuşlarının kullanılması ile uygulanan gerilim değerleri kalibrasyon sonucu g/dakikaya dönüştürülerek ekrana ve yazıcıya gönderilmektedir.

F7 alarm iptal tuşu, alev kopması, fanın durması veya herhangi bir arıza durumunda bağlantı kutusundaki sirenin çalması ve yazıcıdaki arıza uyarısı ile ortaya çıkan durumun ortadan kaldırılması amacı ile kullanılır.

F1 (2. konumda) deney başlama amacı ile kullanılır ve bu tuşa basılması ile birlikte ön ateşleme sistemi devre dışı kalarak uygulana gerilim hava fanını daha önceden belirlenen set değerinde çalıştıracak şekilde değişmektedir. Tuş 867-878 numaralı satırlar arasında işlev görmektedir.

F2 (2. konumda) deney bitirmek amacı ile kullanılmakta ve istenilen bilgiler kaydedilerek sonuç istenirse grafik halinde alınabilmektedir. 434-464 numaralı satırlar arasında çalışmaktadır.

F3 (2. konumda) yatak ısıtma tuşu olarak adlandırılan bu tuş vasıtası ile ön ısıtma sonrası linyit beslemesi ile yürütülen yakma sırasında herhangi bir nedenle yanma sağlanamaz ise yatak yeniden ateşlenmektedir (587-591 numaralı satırlar).

F4 ısıtma iptal tuşu olarak kullanılmaktadır. F3 tuşunun işlevini durdurmaktadır (593-598 numaralı satırlar).

F5 fan start tuşu olarak işlevlendirilen bu tuş çok amaçlı olarak kullanılabilir. Tuşa ilk basıldığında işlevi yatak ısıtma olarak değişmekte (561-566 nolu satırlar) , tuşa tekrar dokunulduğunda ateşleme yapılmakta, ateşlemede bir problem yok ise tuş kömür besleme konumuna geçmektedir. Kömür besleme konumundan tuşa tekrar basılarak deney başlama konumuna, deney başlama konumundan da deney bitiş konumuna geçilmektedir.

F6 (2. konumda) Sorbent arttırma tuşu olarak kullanılmaktadır (0-5 V).

F7 (2. konumda) Sorbent azaltma tuşu olarak kullanılmaktadır (0-5 V).

105 ile 223 numaralı satırlar arasında kontrol ve ölçümler için gerekli gerilim okumaları gerçekleştirilmektedir.

322-349 numaralı satırlar arasında sıcaklık ve SO₂, CO, O₂ ve NO_x değerleri her 15 saniyede bir ekranda izlenebilmektedir.

351 ile 363 numaralı satırlar arasında program 3 sıcaklık değeri , SO₂, CO, NO_x, O₂ , hava hızı, sorbent ve linyit besleme debileri, ΔP_t ve ΔP_b ve varsa açıklama gerektiren işlemi dakikada bir yazıcıya göndermektedir.

365-393 numaralı satırlar arasında sıcaklık, SO₂, CO, O₂, NO_x ,hız, basınç ve bunların gerilim cinsinden değerlerini her 15 saniyede bir dizilere yüklenmektedir. Deney sonucunda bu diziler deney numarası ile oluşturulan bir dosyada saklanabilmektedir.

395-431 numaralı satırlar arasında ekranda sürekli olarak grafik eksenin zaman koordinatlarını basmakta ve grafik ekran 2 dakikalık periyodunu tamamladıktan sonra zaman değerleri değişerek bir sonraki 2 dakikayı çizmektedir.

Ayrıca bir data disketine kaydedilen bilgileri okuyabilmek ve grafikleyebilmek amacı ile yazılan bir program mevcuttur.

3.5. Deneylerin Yürütülmesi

Belirlenen tanecik boyutundaki yatak malzemesi 0.1 m statik yatak yüksekliğini sağlayacak şekilde yatağa beslenir. Bilgisayar yardımı ile program devreye alınır ve deneye ait ön bilgiler girildikten sonra fan çalıştırılır ve ateşleme gerçekleştirilir. Yatak kömürün tutuşma sıcaklığına kadar ısıtılır. Ardından yatak bir süre çift yakıtla yakılmaya devam ettirilir. Sıcaklık 1023-1073 K (750-800 °C) e ulaştıktan sonra LPG devre dışı bırakılır. Hava hızı önceden belirlenen değere getirildikten sonra taşıma borusu açılır. Bu arada, kömür besleme ile birlikte belirlenen Ca/S mol oranına göre sorbent besleme debisi de ayarlanır. LPG kesildikten sonra yanma sürekli kontrol edilir.

Yanma sürecinde tüm yayınımalar, sıcaklıklar, basınçlar izlenir. Aynı zamanda, bilgisayar tuş takımının yardımı ile deneye müdahalelerde bulunulur. Linyit ve sorbent besleme debileri ayarlanır. Deneysel sonuçların grafik değerlendirmeleri deney sonrasında yapılır.

BÖLÜM 4. YAPI ANALİZLERİ

4.1. Cıva Porozimetre Sonuçları

Deneylerde sorbent olarak kullanılan kireçtaşı, D1, D2 dolomitleri ile trona numunesinin toplam yüzey alanı, yığın yoğunluğu, görünür yoğunluğu, gözenek çapı ve gözenek hacmi Quantachrome marka cıva porozimetresi kullanılarak incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar Tablo 3-5, Tablo 3-6 ve Tablo 3-7 de verilmektedir. Tablolar incelendiğinde SO₂ tutma kapasitesi ve verimi açısından son derece önemli bir gösterge olan toplam yüzey alanının dört numune için de düşük sayılabilecek seviyelerde kaldığı göze çarpmaktadır.

6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kalsine edilmemiş ham kireçtaşı numunesinin toplam yüzey alanının $1.94 \text{ m}^2/\text{g}$ civarında olduğu ve 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki numuneye oranla daha büyük yüzey alanına sahip olduğu görülmektedir. Aynı kireçtaşı numunesinin 1123 K (850 °C) de kalsine edilmesi ile elde edilen toplam yüzey alanlarında her iki tane boyutu için de belirgin bir artma olduğu gözlenmektedir. 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutu için toplam yüzey alanı $4.89 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak saptanmaktadır. 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı numunesi kalsine edildiğinde elde edilen toplam yüzey alanı $4.75 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak ölçülmüştür. Elde edilen toplam yüzey alanları, literatürde karşılaşılan değerlere oranla düşük bulunmuştur[60]. Literatür değerleri ortalama $16 \text{ m}^2/\text{g}$ civarında olmakla birlikte $94 \text{ m}^2/\text{g}$ değerine kadar ulaşabilmektedir. Değerlerin düşük bulunmasının nedeni, kireçtaşı kalsinasyonu sonrası numunenin 973 K (700 °C) civarında alınarak kapaklı bir kaba konulması ve desikatör içinde tutularak analizin mümkün olduğu kadar ortam neminden etkilenmeden gerçekleştirilmesine rağmen Ca(OH)₂ oluşumu gözeneklerin kapanarak toplam yüzey alanında azalmaya neden olmaktadır. Ca(OH)₂ oluşma sıcaklığı olan 823 K (550 °C) nin altına düşerek ortam neminden etkilenmemesine çalışılmasına rağmen yine de belirli oranda nemin etkisi gözlenmektedir. Bunun yanında ikinci bir faktör, aşırı kalsine olan bir başka ifade ile uzun sürelerle kalsine olan numunelerin reaktivitelerini yitirmeleri olarak bilinmektedir.

Aynı durum yığın yoğunlukları gözönüne alındığında da ortaya çıkmaktadır. 6×10^{-4} - 10^{-3} m ve 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı numunelerinin kalsine edilmeden önce gerçekleştirilen yığın yoğunluğu analizlerinde elde edilen değerler sırası ile 2473 kg/m^3 ve 2425 kg/m^3 olarak bulunmuştur. 1123 K (850°C) de gerçekleştirilen kalsinasyondan sonra aynı numunelerin yukarıdaki tane boyutları için yığın yoğunlukları sırası ile 2465 kg/m^3 ve 1610 kg/m^3 olarak tespit edilmiştir. Kalsine edilen numunede % 43.1 oranında gerçekleşen kızdırma kaybı sonucunda yığın yoğunluklarında bir azalmanın meydana gelmesi beklenen bir sonuçtur. Ancak özellikle küçük tane boyutundaki numunenin yığın yoğunluğunda kalsinasyon öncesi ve sonrasında büyük bir fark görülmemesi belirli oranda Ca(OH)_2 oluşmasından kaynaklandığı sanılmaktadır. D1 kodlu dolomit numunesinin yığın yoğunluğu ve toplam yüzey alanı analizleri cıva porozimetresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki D1 dolomit numunesinin kalsine edilmeden önceki toplam yüzey alanı $0.4025 \text{ m}^2/\text{g}$ iken kalsine edildikten sonra bu değer $11.43 \text{ m}^2/\text{g}$ seviyelerine ulaşmaktadır. Bu da dolomitin tutma etkinliğini artırıcı bir faktör olarak görülmektedir. Nitekim 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki D1 numunesi için elde edilen kalsine edilmeden önce ve sonraki toplam yüzey alanı değerleri de sırası ile $0.4784 \text{ m}^2/\text{g}$ ve $17.6107 \text{ m}^2/\text{g}$ dir. Literatür değerleri ile karşılaştırıldığında ve küçük tane boyutundaki numunenin daha büyük özgül yüzey alanına sahip olacağı varsayımından hareketle elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki D1 kodlu dolomit numunesinin 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki D1 numunesine oranla özellikle kalsine olduktan sonra daha büyük yüzey alanına sahip olması gerektiği düşünülmektedir [91]. Fakat özellikle kalsinasyon sıcaklığına bağlı olarak ,numunenin akışkan yatak ortamından sıcak olarak alınması ve ortam neminden etkilenmeden analiz noktasına taşınmasının güçlüğü düşünüldüğünde elde edilen sonuçların pek de anlamsız olmadığı sonucuna varılabilmektedir. Burada Ca(OH)_2 oluşumu ile gözeneklerin kapanmasının rolü de büyük olmaktadır.

D2 dolomiti ile yapılan cıva porozimetresi ölçümlerinde elde edilen yüzey alanı değerleri 6×10^{-4} - 10^{-3} m ve 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutlarındaki dolomit numuneleri için oldukça küçük olarak sırası ile 0.0181 ve $0.0675 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak ölçülmüştür. Kalsine edilmiş numunelerde toplam yüzey alanı küçük tane boyutu için $10.9 \text{ m}^2/\text{g}$, büyük tane boyutu için ise $7.16 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak hesaplanmıştır. Burada özellikle kalsine olmuş numunelerin tutma etkinliklerinin büyük çapta artması beklenen bir sonuçtur.

Kireçtaşı ve dolomit numuneler arasında kalsinasyon sonrası görünen kalsinasyon sonrası toplam yüzey alanı farkı iki mineralin kimyasal yapılarından kaynaklanmaktadır. Kireçtaşı, CaCO_3 tek bir CO_2 kaybederek ilave yüzey alanı oluştururken, dolomit $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ şeklindeki yapısından dolayı iki CO_2 kaybettiği için daha yüksek bir yüzey alanı artışı ile sonuçlanmaktadır.

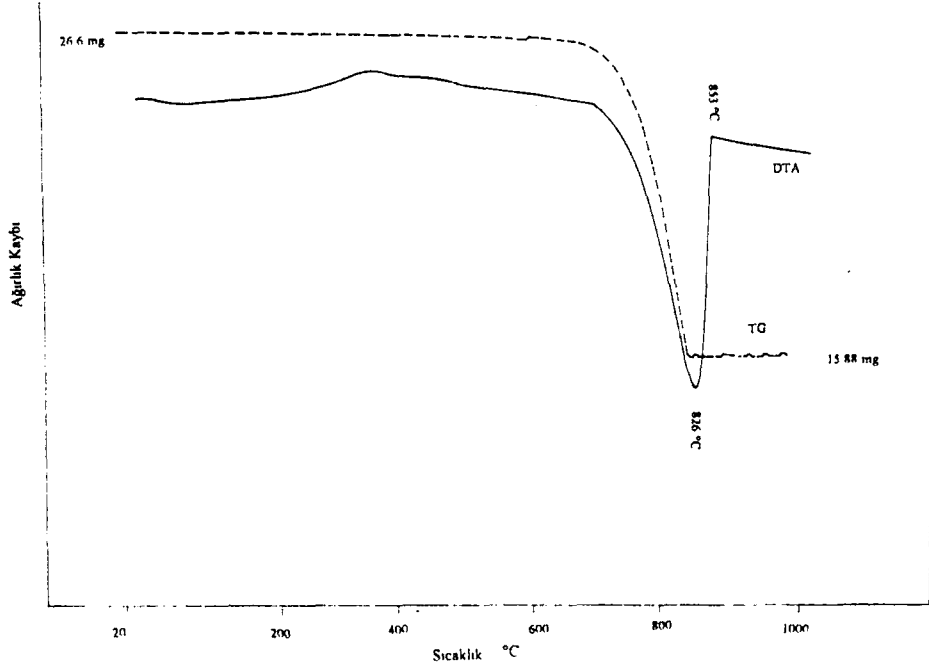
D1 ve D2 kodlu dolomit numuneleri kullanılarak yapılan yığın yoğunluğu ve görünür yoğunluk analizleri beklenen türde sonuçlar vermektedir.

Elde edilen toplam yüzey alanları ve gözeneklilik sonuçları incelendiğinde deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlarla uyum içinde oldukları gözlenmektedir.

Boru fırında gerçekleştirilen ve simülasyon gazı ile yürütülen SO_2 tutma deneylerinde 6×10^{-4} - 10^{-3} m ve 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutlarındaki kireçtaşı numuneleri için sırası ile 0.28 g SO_2 /g CaCO_3 ve 0.2 g SO_2 /g CaCO_3 değerlerinin İngiliz kireçtaşları için gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmalarında elde edilen sonuçlarla benzerlik gösterdikleri anlaşılmaktadır [60]. Nitekim, İngiliz kireçtaşı numuneleri ile yürütülen çalışmalarda g CaCO_3 başına 0.07 g SO_2 ile 0.2 g SO_2 aralığının en karakteristik bölge olduğu ve sadece tek bir numune için 0.35 g SO_2 /g CaCO_3 tutma kapasitesi elde edildiği gözönüne alınırsa bu durumun sonuçların uyumluluğu konusunda önemli bir gösterge olarak kabul edilmesi gerektiği gerçeği ortaya çıkmaktadır. Kireçtaşı numunesine uygulanan BET analizi $5.05 \text{ m}^2/\text{g}$ yüzey alanı, $7 \text{ m}^2/\text{g}$ mikro gözenek alanı, $2.13 \text{ m}^2/\text{g}$ kümülatif adsorpsiyon yüzeyi ve $2.644 \text{ m}^2/\text{g}$ kümülatif desorpsiyon yüzey alanı değerlerini ortaya koymaktadır.

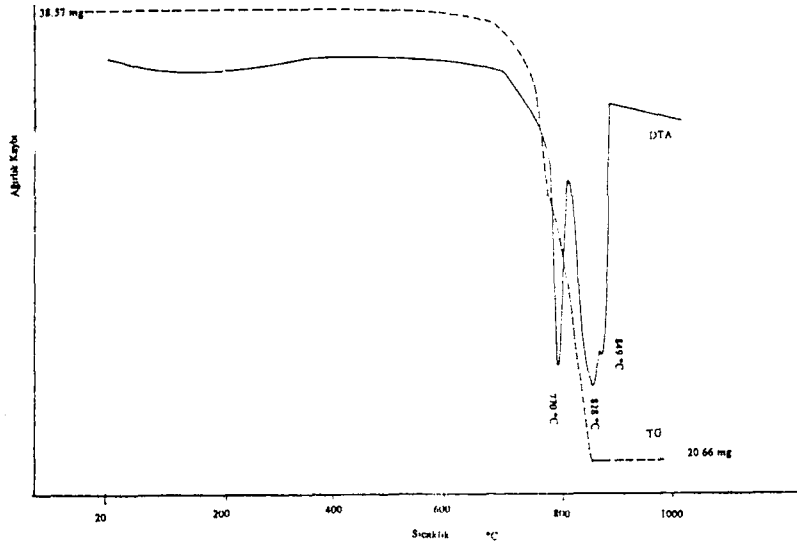
4.2. Termogravimetrik Analizler

Kalsine edilmemiş yaş kireçtaşı numunelerinin termogravimetrik (TGA) ve diferansiyel termal analizleri (DTA) Rigaku marka bir cihaz kullanılarak ve $\pm 50 \mu\text{v}$, 283 K/dak. şartlarda gerçekleştirilmiştir. Termogravimetrik analizlerinde 26.6 mg numune kademeli olarak 1273 K (1000 ° C) sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Isıtma sırasında numune miktarı 15.88 mg seviyelerine kadar düşmüştür. Numunenin TGA ve DTA eğrileri Şekil 4-1 de görülmektedir. Ağırlık kaybının yanında 973 K (700 ° C) civarında başlayan pik oluşumu 1099 K (826 °C) dolaylarında sonuçlanmış ve bu noktada kalsinasyon sonucu CO_2 çıkışı ile kızdırma kaybı gözlenmiştir. Pik oluşumu 1126 K (853 °C) da son bulmuştur . Bu aynı zamanda kalsinasyonun son bulunduğunu göstermektedir.



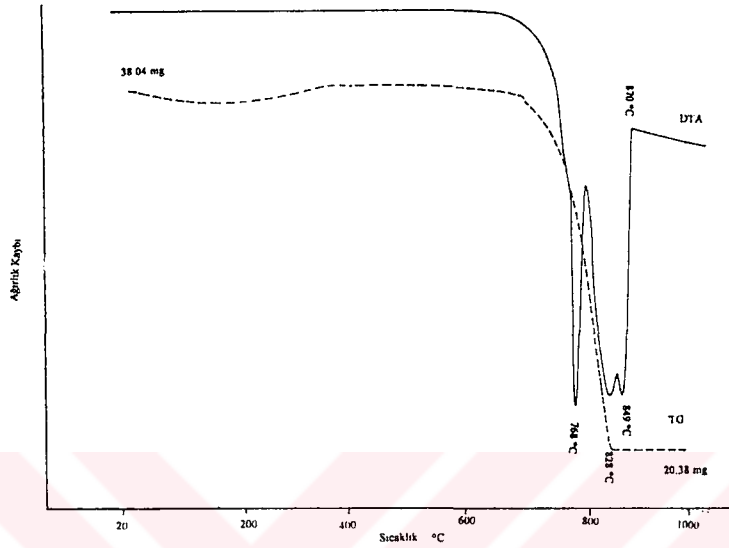
Şekil 4-1 Kireçtaşı numunesine ait TG ve DTA sonuçları ($\pm 50 \mu v$ ve 283 K/dak.)

D1 dolomit numunesine $\pm 50 \mu v$ DTA aralığı ve 283 K/dak lık şartlarda uygulanan DTA ve TG analizlerinde dolomitin bünyesindeki $MgCO_3$ 'ın 1043 K (770 °C) civarında MgO 'e dönüştüğü, 1101 K (828 °C) de ise $CaCO_3$ 'ın CaO haline geldiği anlaşılmaktadır. Dolayısı ile iki pik oluşumu gözlenmektedir. 1122 K (849 °C) civarında üçüncü bir pik gözlenmektedir. 1143 K (870 °C) da tepe oluşumu sona ermektedir. Ağırlık kaybı, 38.57 mg numunenin 20.66 mg civarına düşmesi ile gerçekleşmektedir. (Şekil 4-2).



Şekil 4-2 D1 dolomitine ait TG ve DTA sonuçları (aynı şartlarda)

Benzer şartlarda D2 dolomitinde de 1041 K (768 °C) civarında bir tepe oluşumu ile $MgCO_3$, MgO e dönüşmekte daha sonra 1101 K (828 °C) ve 1112 K (849 °C) de D1 dolomiti ile uyum içinde iki farklı tepe daha gözlenmektedir. Bunlar büyük olasılıkla $CaCO_3$ ın CaO e dönüştüğü noktalardır. Toplam ağırlık kaybı D2 dolomiti için 17.66 mg dır. (Şekil 4-3).



Şekil 4-3 D2 dolomitine ait TG ve DTA sonuçları (aynı şartlarda)

4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri ve X Işınları İncelemesi Sonuçları

4.3.1. Sorbentlere uygulanan analizler

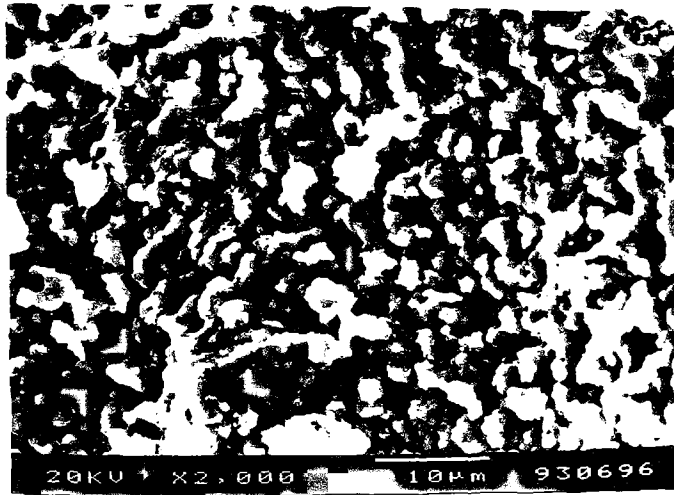
Taramalı elektron mikroskobunda 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı numunesinin incelenmesi ile elde edilen mikrograf ve kantitatif elementel analiz sonuçlarından hareketle yaş ve 1123 K (850 °C) de ısıtılma uğratılan (kalsine edilen) numuneler arasında 2000 kez büyütülerek yapılan analizlerde gözeneklerin açıldığı görülmektedir. 2 ile 3 μm çapında gözenekler görülebilmekte fakat akışkan yataklı sistemden numune almanın zorluğu gözönüne alınarak $Ca(OH)_2$ oluşumu ile gözeneklerin bir kısmının kapandığı düşünülmektedir. 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı numunesinin SO_2 ile sülfatlanması sonucu ortamdaki kuartz kumu ve kül ile birlikte yataktan alınan numunenin elektron mikrografi yapının daha homojen olduğunu fakat gözeneklerin sadece 0.5 μm seviyelerinde hatta tamamen kapanmış olduğunu göstermektedir (Şekil 4-4, Şekil 4-5, Şekil 4-6).



Şekil 4-4 6×10^{-4} - 10^{-3} m orijinal kireçtaşı SEM mikrografi (2000 büyütme)

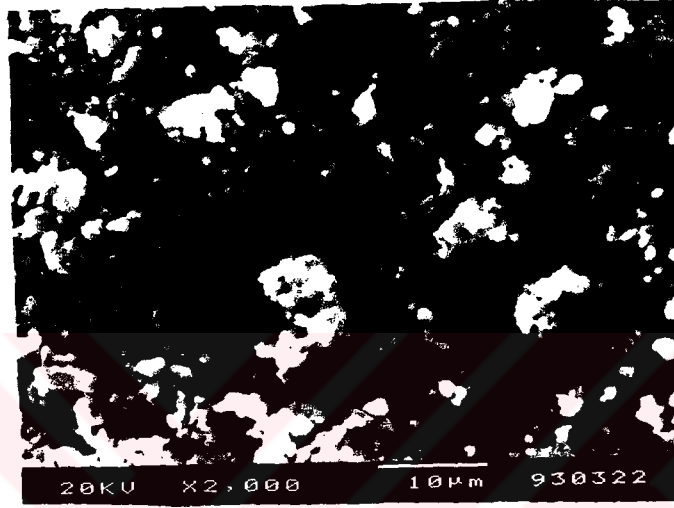


Şekil 4-5 6×10^{-4} - 10^{-3} m kalsine kireçtaşı SEM mikrografi (2000 büyütme)

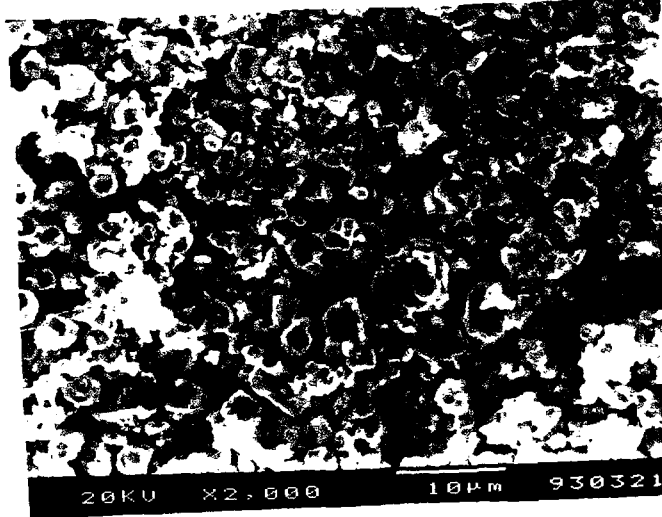


Şekil 4-6 6×10^{-4} - 10^{-3} m kalsine kireçtaşı + SO₂ mikrografi (2000 büyütme)

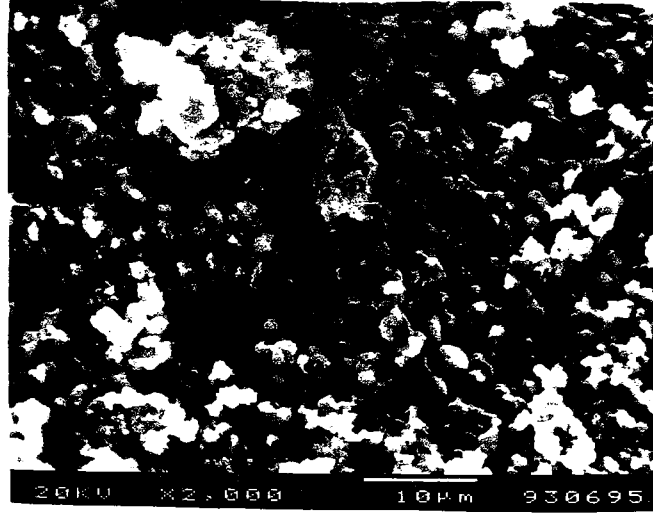
10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı numunesinin elektron mikrolraflarından da benzer sonuçlara varmak mümkündür. Elde edilen mikrolraflarda yaş numunenin düzgün bir yapıda olduğu ,buna karşın 1123 K (850 °C) de kalsine edilen numunenin 4-5 µm seviyelerinde gözeneklere sahip olduğunu görmek mümkündür. Benzer bir yaklaşımla elde edilen sülfatlanmış numunenin 2.000 kez büyütülmesi ile düzgün bir yapıya sahip olduğu fakat yine de bir kısım gözeneklerin varlığı gözlenebilmektedir(Şekil 4-7, Şekil 4-8, Şekil 4-9).



Şekil 4-7 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m orijinal kireçtaşı SEM mikrolrafl (2000 büyütme)

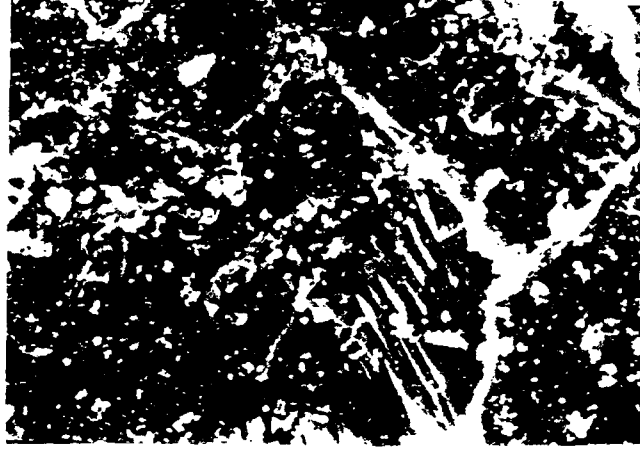


Şekil 4-8 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m kalsine kireçtaşı SEM mikrolrafl (2000 büyütme)



Şekil 4-9 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m kalsine kireçtaşı + SO_2 SEM mikrografi (2000 büyütme)

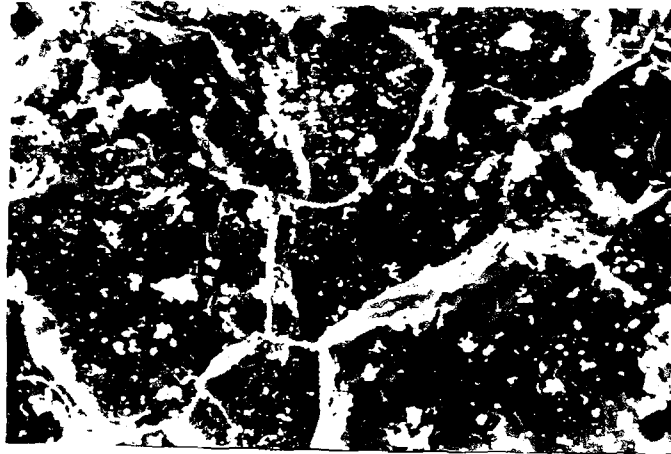
Taramalı elektron mikroskobunda D2 dolomit numunesinin incelenmesi ile 1000 kez büyütülerek çekilen elektron mikrograflarından 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutu ile 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki numuneler arasında yaş ve kalsine edilmiş hallerde belirgin bir farklılık gözlenememiştir. 1123 K (850 °C) de gerçekleştirilen kalsinasyonda bir sonuç alınamaması üzerine yatakta her zaman ulaşılan sıcaklık olmamasına rağmen 1173 K (900 °C) gerçekleştirilen kalsinasyon işlemi sonucunda istenilen gözeneklilik elde edilememiştir. Burada göreceli olarak yavaş gerçekleştiği bilinmesine rağmen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşumu önem kazanmaktadır. Şekil 4-10, Şekil 4-11, Şekil 4-12 deki mikrograflardan görülebileceği gibi kırılğan bir yapıdan söz edilebilmektedir. Fakat gözeneklilikten söz etmek imkansızdır. Yapıda yapılan X ışınları incelemesi ile %55 oranında Ca ve % 32 Mg bulunduğu saptanmıştır. Sülfatlanmış numunelerde yataktan alınan kütlenin son derece karmaşık olması ve tek bir taneciğin incelenebilmesinin son derece zor olmasından dolayı sağlıklı analiz yapılamamıştır. Elde edilen mikrograflardan kalsine yapı ile yaş yapı arasında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Burada Elbistan linyitinin bünyesinde içerdiği CaO miktarının fazla olmasının da rolü büyüktür.



Şekil 4-10 6×10^{-4} - 10^{-3} m orijinal D2 SEM mikrografi (1000 büyütme)

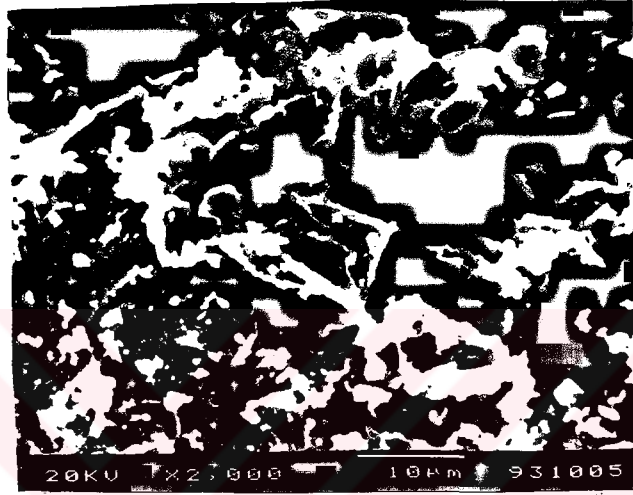


Şekil 4-11 6×10^{-4} - 10^{-3} m kalsine D2 SEM mikrografi (1000 büyütme)

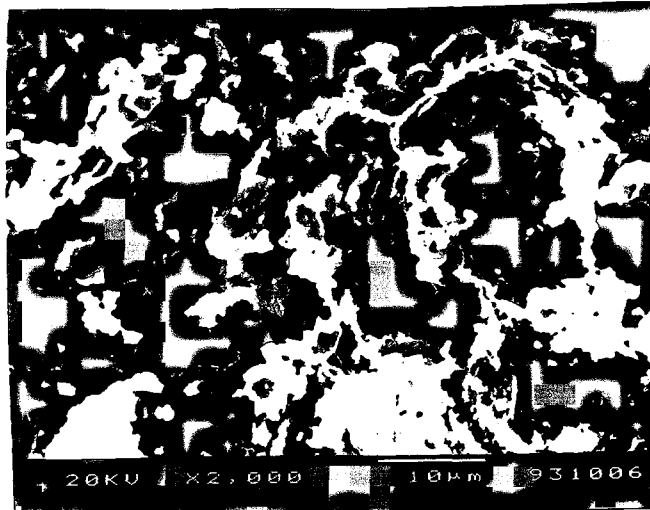


Şekil 4-12 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m orijinal D2 SEM mikrografi (1000 büyütme)

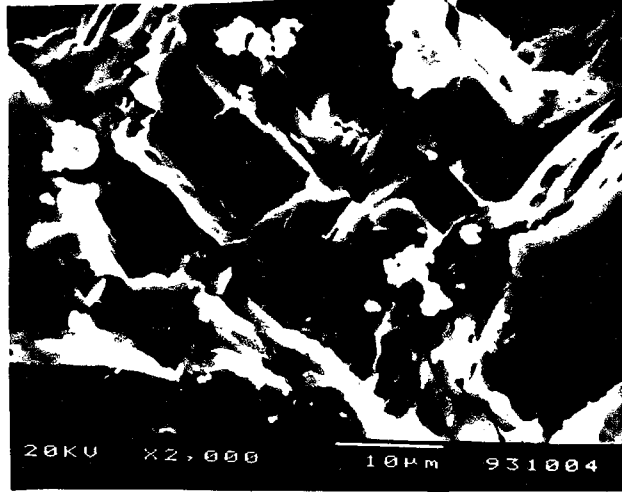
Kalsine edilmiş numunelerde belirgin bir değişim izlenememiştir. Şekil 4-13 ve Şekil 4-14 te ufak ve iri tane boyutlarındaki D1 dolomitinin orijinal haldeki SEM mikrografları görülmektedir. Her iki tane boyutunda sülfatlanmış numunelerde kireçtaşının hakim olduğu bir yapı görülmekte, gözenekler yerine düzgün bir yapıya rastlanmaktadır(Şekil 4-15 ve Şekil 4-16).



Şekil 4-13 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki orijinal D1 dolomiti SEM mikrografı
(2000 büyütme)



Şekil 4-14 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki orijinal D1 dolomiti SEM mikrografı
(2000 büyütme)



Şekil 4-15 6×10^{-4} - 10^{-3} m D1 dolomiti + SO_2 SEM mikrografi (2000 büyütme)

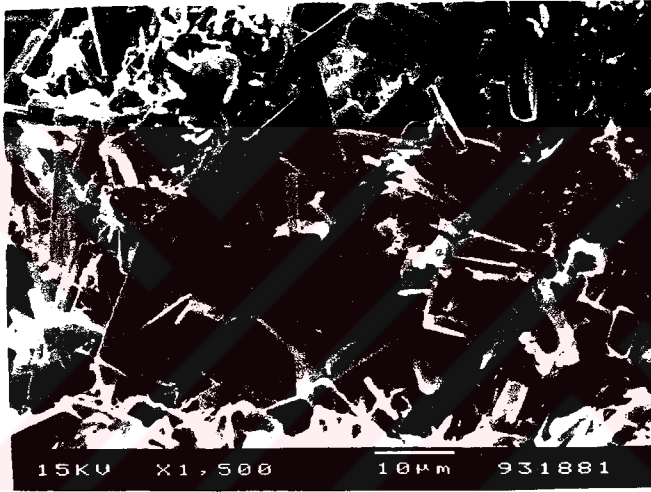


Şekil 4-16 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m D1 dolomiti + SO_2 SEM mikrografi (2000 büyütme)

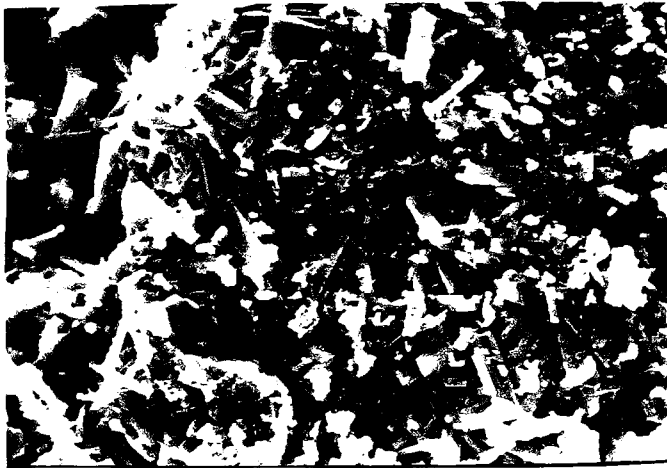
X ışınları incelemesi taramalı elektron mikroskop analizleri ile paralel olarak yürütülmüş ve elde edilen verilerden SO_3 miktarı % 11.81 civarında bulunmuştur. 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki numunede SO_3 miktarı % 17.96 seviyelerine çıkmaktadır. Özellikle 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki numunede MgO yüzdesinin %0.54 seviyelerine düşmesi ile MgSO_4 oluşma olasılığı ortaya çıkmaktadır. Bu da belirli bir aşamadan sonra MgO içeriğinin de etkin olabileceğini düşündürmektedir. Temelde dolomitlerin etkinliği içerdikleri CaCO_3 miktarları ile de orantılı olmaktadır. Termal gravimetrik analizlerden de görülebileceği gibi öncelikle yapıda MgCO_3 -MgO dönüşmesi gerçekleşmektedir. Kızdırma kaybı ile 1041-1043 K civarında gerçekleşen bu dönüşme sonrası 1101-1122 K civarında CaCO_3 CaO 'e dönüşmektedir. Özellikle önceden kalsine edilmiş numunelerde aktif yatak sıcaklığında aktif yatak sıcaklığında göreceli olarak ağır gerçekleşmesine rağmen tutma etkinliğinin daha iyi olabileceği sonucuna varılabilmektedir. Bununla birlikte, ön işlemlerde ortaya

ıkan ekonomik yükler n-kalsinasyon yerine yaş numune ile çalışmayı zorunlu kılmaktadır. Yine de yaş dolomitin aktif yatak sıcaklığında belirli bir düşüş ile soğumaya neden olduğu ve bu şekilde yanma sıcaklıklarını kararlı bir şekilde istenilen aralıkta tutmanın zorluğu inkar edilemeyecek bir gerçektir. Dolaşımlı akışkan yatakların bu zorlukları gidermede etkin oldukları bilinmektedir.

Taramalı elektron mikroskobunda $6 \times 10^{-4} - 10^{-3}$ m tane boyutunda sentetik olarak hazırlanan pelletlenmiş tronanın 1500 kez büyütülen mikrografında 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki tronanın aksine daha girift bir yapı vardır. Burada da gözeneksiz bir yapı hakimdir. Kırık ubukukların bulunması dikkat çekicidir (şekil 4-17) 423 K (150°C) de yapıda farklılık göstermemektedir (şekil 4-18).

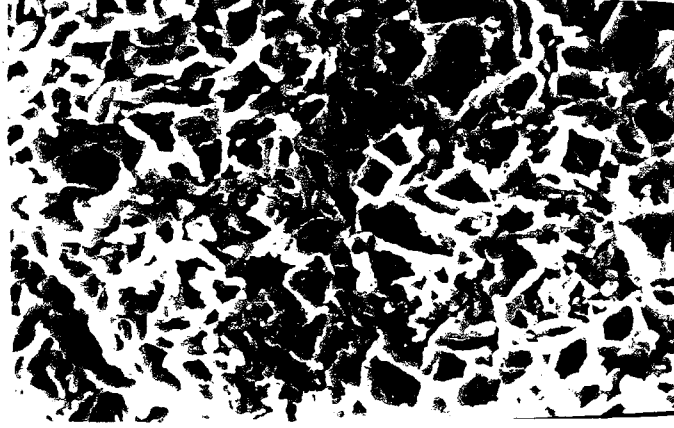


şekil 4-17 6×10^{-4} - 10^{-3} m tronanın SEM mikrografı (1500 büyütme)



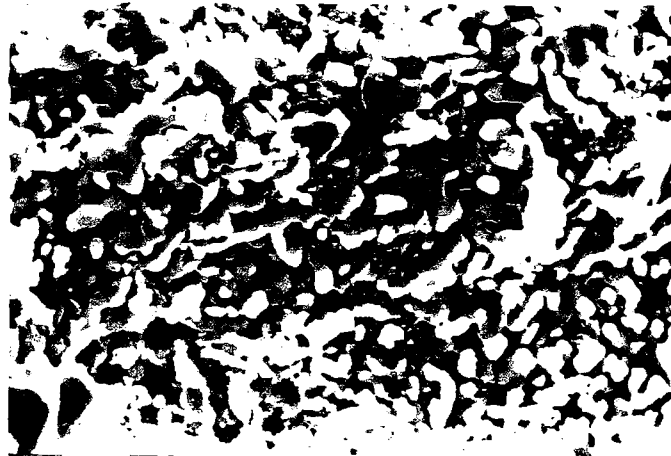
şekil 4-18 6×10^{-4} - 10^{-3} m tronanın 423 K de kalsine edilmiş halinin SEM mikrografı (1500 büyütme)

Aynı pelletlenmiş trona numunesinin 523 K (250 °C) de ısıtılma uğratılması ile elde edilen numunenin taramalı elektron mikroskopunda incelenmesi sonucu elde edilen 1500 kat büyütülmüş görüntüsünde oldukça gözenekli bir yapı gözlenmektedir (Şekil 4-19). Gözenek çapları 1 μm ile 14 μm arasında değişmektedir. 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m

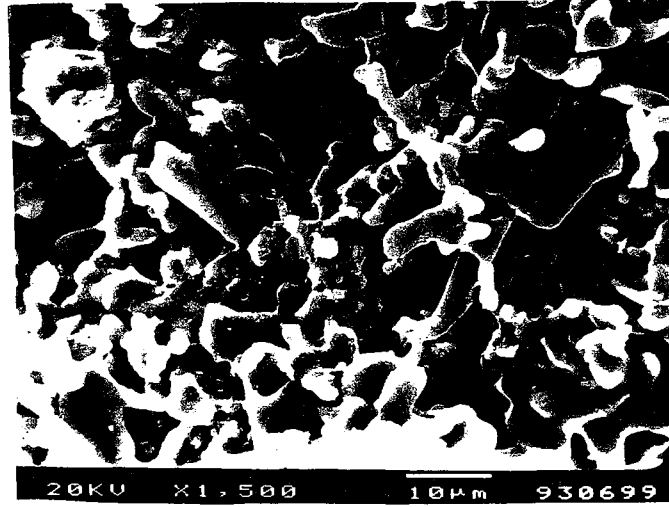


Şekil 4-19 6×10^{-4} - 10^{-3} m trona numunesinin 523 K de kalsine edilmesi ile oluşan aktif sodanın SEM mikrografi (1500 büyütme)

tane boyutundaki pelletlenmiş trona numunesinin 523 K (250 °C) de ısıtılma işlemiyle aktif sodaya dönüşmüş halinin elektron mikrografi ile benzerlik göstermektedir. Gözenek duvarları yapının sağlam durumda olduğunu ve sürüklenmeye neden olmayacağı izlenimini vermektedirler. Gözeneklerin daha çok olması tane boyutunun küçülmesine bağlı olarak özgül yüzey alanının artması ile açıklanabilir. Aynı numunenin 973 K (700 °C) ve 1103 K (830 °C) da çekilen mikrografları gözeneklerin kısmen kapandığı parmaklı yapıda bir görüntü vermektedir. 1103 K (830 °C) deki yapı 973 K (700 °C) de elde edilen yapıya oranla daha gözeneklidir. Burada gözenek çapları 2 μm ile 15 μm arasında değişmektedir. İrili ufaklı parmaklı yapılar gözlenmektedir (Şekil 4-20, Şekil 4-21).



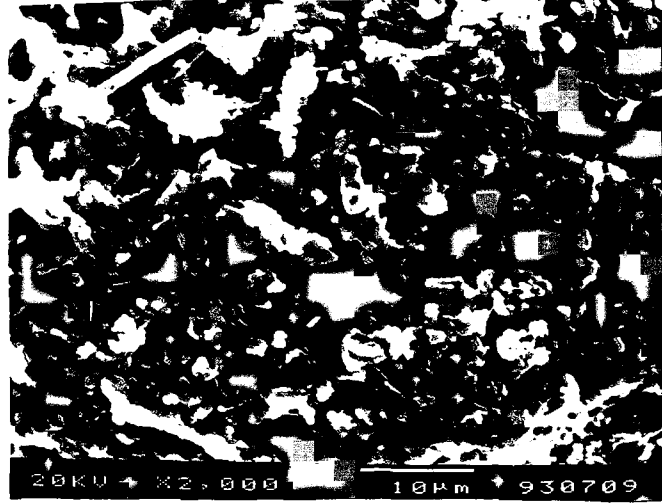
Şekil 4-20 6×10^{-4} - 10^{-3} m aktif sodanın 973 K de kalsine edilmesi ile oluşan yapının SEM mikrografi (1500 büyütme)



Şekil 4-21 6×10^{-4} - 10^{-3} m aktif sodanın 1093 K de kalsine edilmesi ile elde edilen yapının SEM mikrografi (1500 büyütme)

Kararlı yanma şartları sağlanarak oluşturulan akışkan yataкта yanma deneylerinde Elbistan linyitinin yakılması sırasında linyitle karıştırılarak ortama ilave edilen pelletlenmiş aktif soda numuneleri (523 K) deney sonrası yataktan alınarak yatak malzemesinden ayıklanmış ve elde edilen numune taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Elde edilen bulgular ve mikrograflardan görünen yapı kısmen düz, kısmen çukurlu ve engebeli bir görüntüdedir. Kireçtaşı ilavesi sonucunda Na,Ca silikat oranları dengelenen yataktan alınan numunelerde 2 μm ile 30 μm arasında değişen kısmen gözenekli ,kireçtaşı açısından yoğun bir yapı göze çarpmaktadır. Burada gözenekler genellikle kapanmıştır.

Taramalı elektron mikroskobunda 2000 defa büyütülerek çekilen mikrograflarda 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki peletlenmiş trona numunesi genel anlamda gözeneksiz bir yapıya sahiptir. Ancak bütünü oluşturan küçük taneciklerin yapıları tepecikler halinde görülebilmektedir (Şekil 4-22). 473 K (200° C) gözeneklerin en açık olduğu sıcaklıktır (25 μm) (Şekil 4-23). 523 K (250 ° C) de kalsine edilerek aktif sodaya dönüşen peletlenmiş trona numunesinde, boyutları 1 - 10 μm arasında değişen kanalcıkların olduğu görülmektedir (Şekil 4-24).



Şekil 4-22 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki orijinal tronanın SEM mikrografi (2000 büyütme)

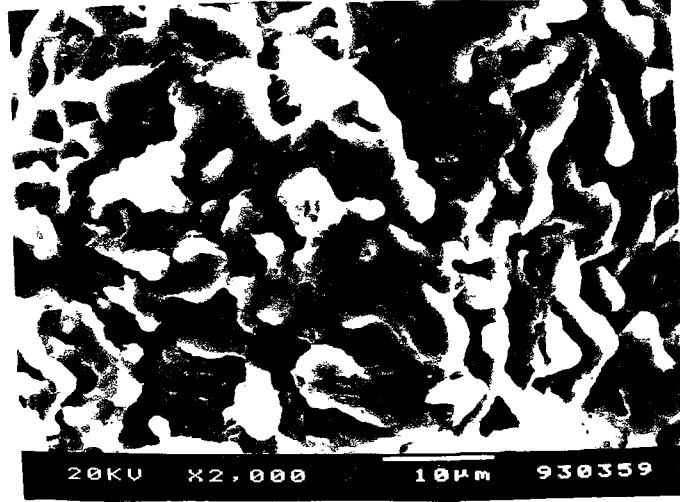


Şekil 4-23 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki tronanın 473 K de kalsine edilmesi ile elde edilen yapının SEM mikrografi (2000 büyütme)

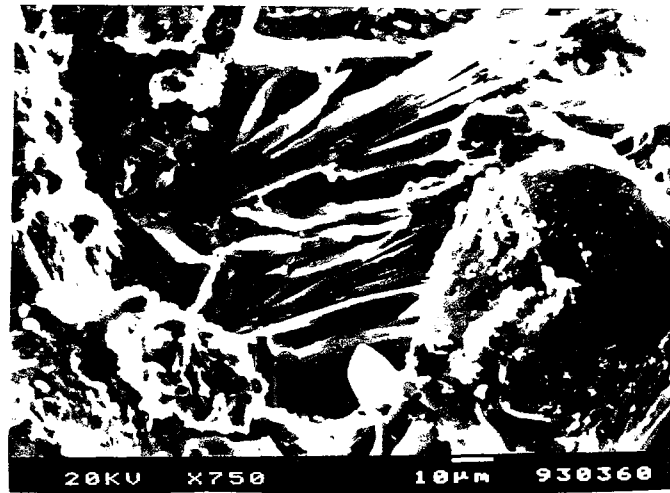


Şekil 4-24 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki aktif sodanın (523 K) SEM mikrografi (2000 büyütme)

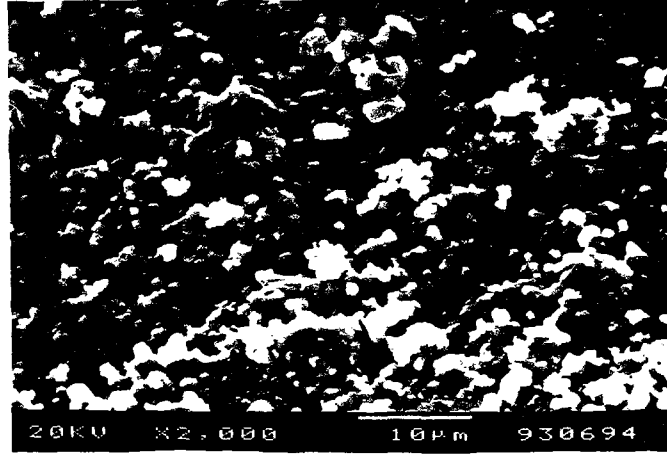
Mikrografta görünen üçüncü boyut derinliğin yüzeyden çok uzaklaşmadığının anlaşılmasına neden olmaktadır. Kanalcıkların arasındaki duvarlar yapının sağlam olduğunu ve elutriasyon olayına yatkın olmayacağı izlenimini vermektedir. Aynı pelletlenmiş soda numunesinin 973 K (700 °C) de ısıtılmasına tutulması ile elde edilen elektron mikrografi yapının eriyerek kanallaşmayı ortadan kaldıracak bir şekilleşmeye doğru gittiği görülmektedir. Geriye kalan gözeneklerin çapları 1-2 μm mertebelerine düşmüştür ve gözeneklerin derinliği 523 K (250 °C) ye kıyasla hemen hemen kaybolmuştur (Şekil 4-25). Duvarcıkların ısıtılma etkisi ile belli doğrultularda yönelme eğilimi gösterdikleri görülmektedir. 1133 K (860 °C) de ise gözenek yapısının tamamen kaybolup tabakalar halinde lamine yapılaşma ve tabakaların ayrışması görülmektedir (Şekil 4-26). Bu 4 ayrı sıcaklıktaki soda dağılımına bakıldığında zaman zaman pelletlenmiş sodanın akışkan yatak sıcaklıklarında kullanılabileceği ancak özgül yüzeyinin bu sıcaklıklarda 523 K (250 °C) ye oranla önemli ölçüde azalacağı anlaşılmaktadır. Nitekim, cıva porozimetresi ile yapılan analizlerde 1073 K (800°C) da kalsine edilen aktif sodanın toplam yüzey alanı $0.4749 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak ölçülmüştür. Bu da son derece küçük bir değerdir. Yukarıda sözü edilen 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki pelletlenmiş soda numunesinin akışkan yatakta 1053-1093 K (780-820 °C) arasında kararlı yanma sağlanarak yakılan Elbistan linyitine ilave edildiğinde elde edilen yapının mikrogramf gözeneklerin tamamen kapandığı, buna karşın düzgün ,az çukurlu bir yapı gözlenmektedir (Şekil 4-27). Linyit bünyesindeki CaO içeriğinin etkisi büyüktür [92] .



Şekil 4-25 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m aktif sodanın (973 K) SEM mikrografi (2000 büyütme)



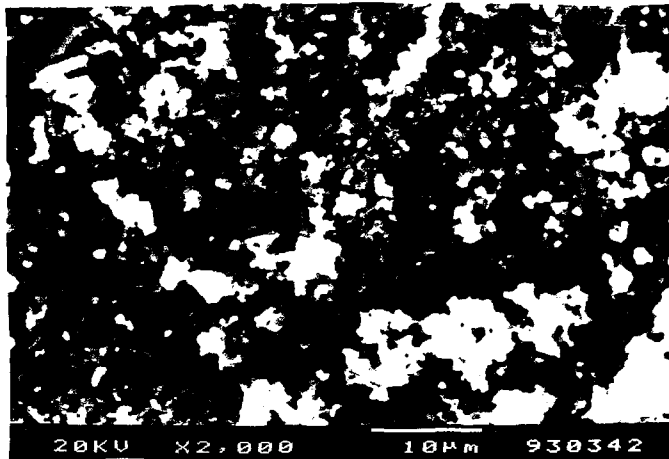
Şekil 4-26 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m aktif sodanın (1123 K) SEM mikrografi (750 büyütme)



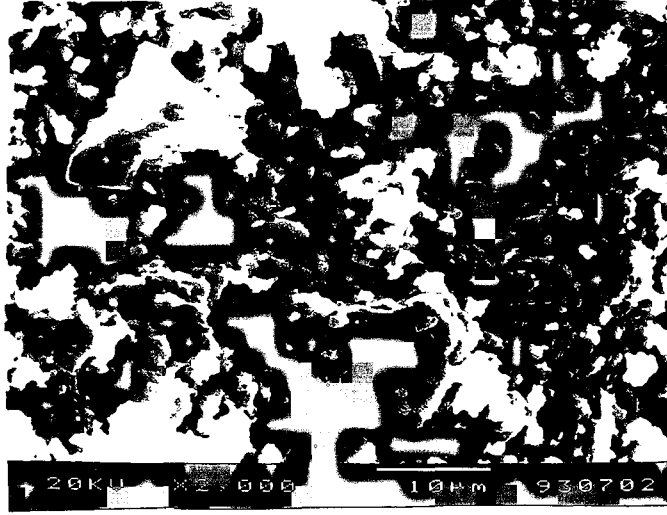
Şekil 4-27 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m aktif soda + SO₂ SEM mikrografi (2000 büyütme)

4.3.2. Farklı tane boyutundaki Elbistan linyitine uygulanan analizler

Taramalı elektron mikroskobu ile 2000 büyütme ile çekilen mikrograflarda N1 tane boyutundaki Elbistan linyitinin orijinal ve kalsine edilmiş numuneleri arasında belirgin bir farklılık gözlenmemektedir. (Şekil 4-28, Şekil 4-29). Kalsine edilmiş yapıda CaO varlığı görülebilmektedir. Belirgin bir gözeneklilikten çok grift bir yapı göze çarpmaktadır.

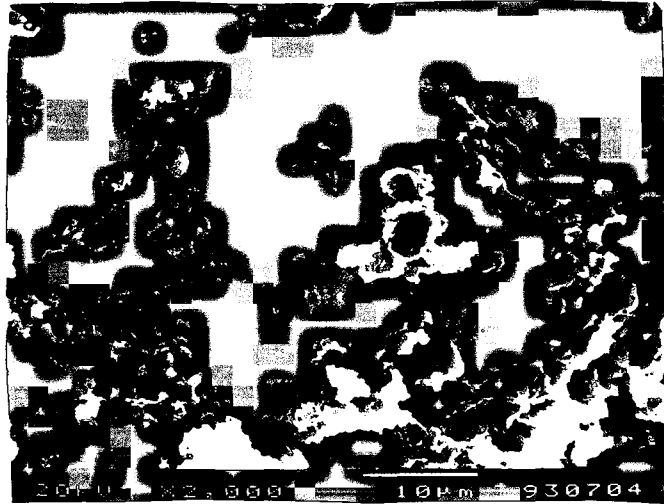


Şekil 4-28 Orijinal N1 linyit numunesinin SEM mikrografi (2000 büyütme)

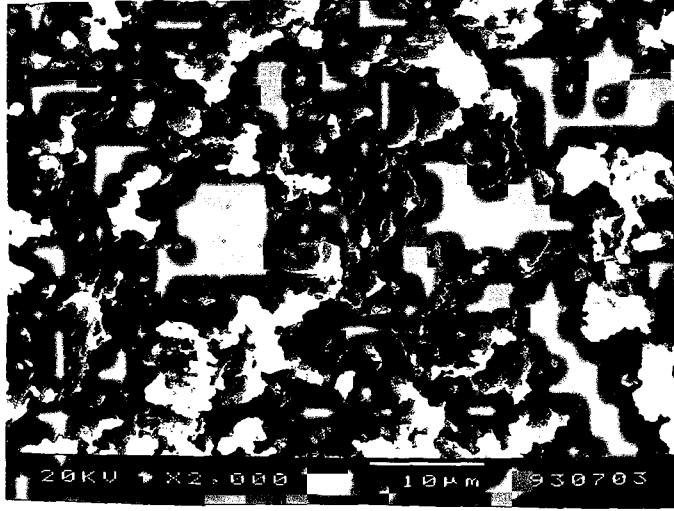


Şekil 4-29 N1 linyit külünün SEM mikrografi (2000 büyütme)

Benzer bir durum N2 tane boyutundaki Elbistan linyit numunesi için de geçerlidir. CaO'in yapıda hakim olduğu ve $3\mu\text{m}$ civarında gözeneklerin varlığı tespit edilmektedir. Mevcut CaO'in yapıda linyitin yapısındaki yüksek miktardaki kabuklu deniz hayvanlarından kaynaklanması kuvvetle olasıdır (Şekil 4-30). Şekil 4-31 deki mikrografta görülebileceği gibi kalsine edilmiş numunede farklı bir yapı gözlenmemektedir.



Şekil 4-30 Orijinal N2 linyit numunesinin SEM mikrografi (2000 büyütme)

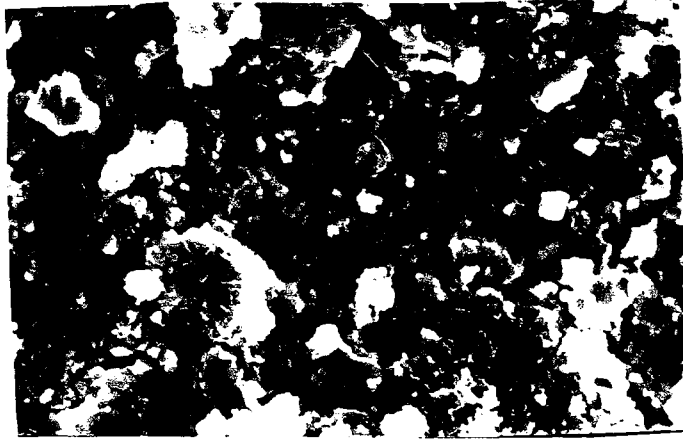


Şekil 4-31 N2 linyit külünün SEM mikrografi (2000 büyütme)

N3 tane boyutundaki Elbistan linyitinin orijinal halde 8-9 μm -ye ulaşan gözenekleri bulunmaktadır. Şekil 4-32 de verilen yapıdaki beyaz kristal maddelerin CaCO_3 olması olası görülmektedir. Kalsine edilmiş yapıda CaO varlığı artmakta 2-3 μm -ye varan gözenekler farkedilmektedir (Şekil 4-33).



Şekil 4-32 Orijinal N3 linyit numunesinin SEM mikrografi (2000 büyütme)



Şekil 4-33 N3 linyit külünün SEM mikrografi (2000 büyütme)

4.4. Elbistan Linyitinin Yanabilirliği

Kömürlerin yaşları ve anorganik yapılarına bağlı olarak, diferansiyel termogravimetrik analiz yöntemi kullanılarak yanma profillerinin çıkartılabildiği daha önceki çalışmalarda verilmiştir[93]. Yapılan çalışmalarda tipik bir yanma profilinde 7 farklı nokta bulunabileceği ve nem çıkışını ifade eden pikin ardından bazı organik maddelerin katı hal oksidasyonundan kaynaklanan bir çöküntünün gözleneceği ifade edilmiştir. BS ile simgelenen yanmanın başlangıç sıcaklığı ağırlık kaybı ile ortaya çıkmaktadır. Eğimin değiştiği nokta BS_{sk} ile simgelenen sabit karbon yanması başlama sıcaklığı, bunu takip eden pik nokta EYS ile gösterilen yanmanın en yüksek sıcaklığa ulaştığı durumu ifade etmektedir. Eğrinin yeniden başlangıç seviyesine düştüğü nokta TS ile simgelenen yanmanın tamamlandığı sıcaklıktır. Diğer çalışmada yapılan bir Amerikan linyiti, Yatağan, Çan ve Göynük linyitlerinin yanma profillerinin incelenmesi sonucu yapılan karşılaştırma Tablo 4-1 de verilmektedir.

Tablo 4-1 Değişik Linyitlere Ait Yanma Profillerinin Karşılaştırılması [93]

Yakıt	BS (°C)	BS_{sk} (°C)	EYS (°C)	TS (°C)
Amerikan	215	435	500	540
Göynük	240	320	430	600
Yatağan	180	285	370	600
Çan	90	300	370	600
N1	250	350	410	525
N2	240	330	348	470
İngiliz	290	450	560	650

Tablo 4-1 den de anlaşılabileceği gibi Elbistan linyitinin N1 ve N2 fraksiyonlarının diferansiyel termogravimetrik analiz sonuçları diğer linyitlere oranla farklılıklar göstermektedir. EYS ve TS sıcaklıkları arasında beklenen omuz oluşumu belirgin değildir. Bu da aglomerasyon açısından Elbistan linyitinin daha az riskli olduğunu göstermektedir. Deneysel çalışmalarda bu durum oldukça açık bir şekilde gözlenmiştir. Anorganik yapıda bulunan yüksek CaO miktarı özellikle orta fraksiyon olarak saptanan N2 fraksiyonunda yoğunlaşmaktadır. Bunun nedeni elek analizine bağlanmaktadır. N1 ve N2 fraksiyonlarının EYS sıcaklıkları arasındaki belirgin fark bu durum ile açıklanabilmektedir. Yanmanın tamamlanma sıcaklığı olarak bilinen TS sıcaklığı N1 için 525 °C, N2 için ise 470 °C olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklık, diğer bütün linyitlerden daha düşüktür ve Elbistan linyitinin akışkan yataklı yakma sisteminde kararlı bir şekilde uzun süre yakılabilmesini açıklayabilmektedir.



BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

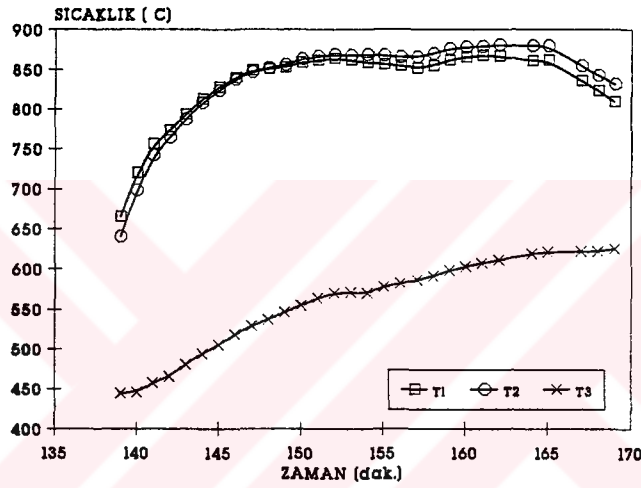
5.1. Elbistan Linyitinin Akışkan Yatakta Yanması, Yanma Stabilitesi ve Yayınım

5.1.1. Farklı Tane Boyutlarındaki Elbistan Linyitinin Yanma Sürecindeki Davranımı

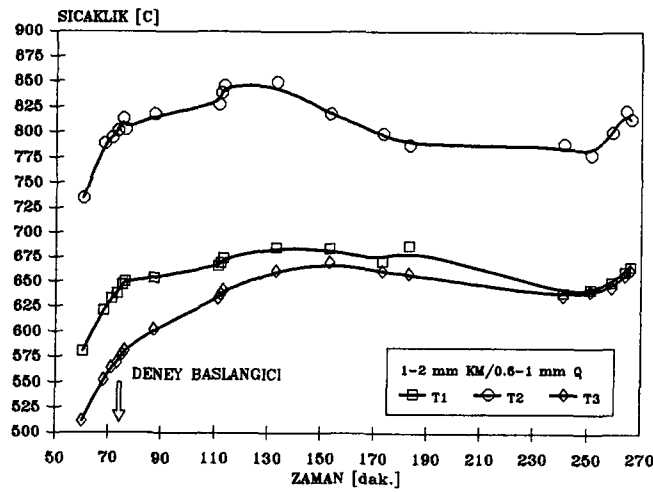
Tanecik boyutunun yanma stabilitesine olan etkisini görmek amacıyla farklı tanecik boyutundaki linyit numuneleri yakılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla linyit 10^{-3} - 2×10^{-3} , 2×10^{-3} - 3.33×10^{-3} ve 4×10^{-3} - 5×10^{-3} m boyutundaki fraksiyonlara ayrılmıştır. Bu fraksiyonlar sırası ile N1, N2 ve N3 olarak isimlendirilmiştir. 4603 kJ/kg üst ısı değere sahip olan numuneler akışkan yatakta ayrı ayrı yakılarak sıcaklık profilleri elde edilmiştir. Düşük ısı değeri ve kırılabilir yapıya rağmen her üç fraksiyonla da kararlı bir yanma sağlanmıştır. N1 tane boyutundaki linyit numunesi 3×10^{-4} - 6×10^{-4} m tane boyutundaki kuartz kumun içinde 0.85 m/s akışkanlaşma hızı ile yakılması sonucunda elde edilen sıcaklık profili Şekil 5-1 de gösterilmiştir. Bu deneyde aktif yatak sıcaklığı 900 K (627 °C), serbest bölge sıcaklığı ise 626 K (353 °C) olarak ölçülmüştür. Yanma ince fraksiyonlar için daha kolay bir şekilde gerçekleştirilmekte ve kararlı olmaktadır. Yanma 52-105 g/dakikalık linyit besleme debileri ile gerçekleştirilmiştir. Kömürün beslenmesinden itibaren kısa bir sürede sağlanan yanma stabilitesi deney boyunca devam etmiştir. Bunu sürekli olarak izlenen karbon monoksit değerlerinden de gözlemek mümkündür. 157. dakika ile 167. dakikalar arasında CO derişimleri 122 ile 170 mg/m³ arasında değişmektedir. Aktif yatak sıcaklıkları maksimum 1156 K (883 C) civarında ölçülmüştür. ΔT olarak verilen aktif yatak sıcaklığı ile serbest bölge sıcaklığı arasındaki fark 542 K (269 °C) civarında ölçülmüştür.

Aynı tane boyutuna sahip numunenin 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kuartz kumundan oluşmuş yatakta yakılması ile elde edilen yanma stabilitesinin yüksek hızlarda sağlandığı bunun temel nedeninin ise kuartz kumunun tane boyutu büyüdükçe yoğunluğunun artması sonucu akışkanlaştırıcı hava hızının artırılması gerekliliği olmuştur.

3×10^{-4} - 6×10^{-4} m tane boyutundaki kuartz kum kullanılan deneylerde hava hızı 0.61 ile 0.92 m/s. arasında tutulurken, kum tane boyutu 6×10^{-4} - 10^{-3} m olarak seçildiğinde akışkanlaştırıcı hava hızı 1.1 ile 1.35 m/s. arasında tutulmuştur (Şekil 5-2). Daha yoğun bileşen olan kuartz kumunun küçük tane boyutunun kullanılması durumunda yatak içi karışma artacağı için buna bağlı olarak büyük tane boyutundaki kuartz kumunun kullanılmasına oranla yanma stabilitesinin daha iyi olması beklenir. İnce kumun akışkanlaşması sırasında göze çarpan diğer bir nokta akışkan yatak ve dağıtıcı elek basınç düşüşlerinin iri taneli kuartz kumu ile yapılan deneye oranla daha büyük olmasıdır.



Şekil 5-1 N1 linyiti - 3×10^{-4} - 6×10^{-4} m kuartz kum ikili sistemi için sıcaklık dağılımları

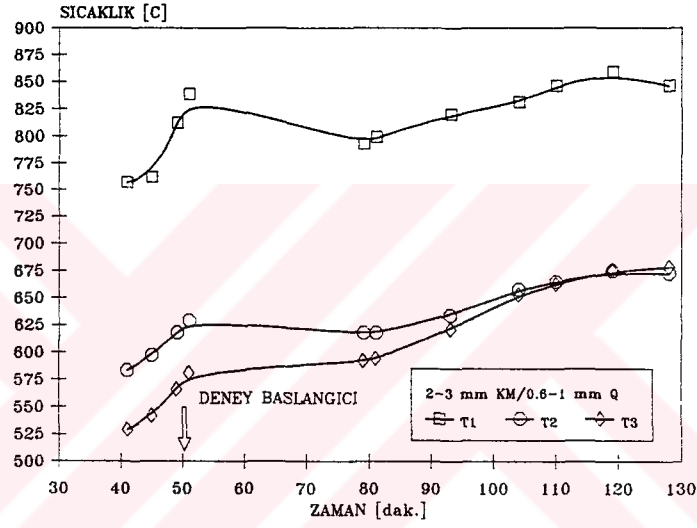


Şekil 5-2 N1 linyiti - 6×10^{-4} - 10^{-3} m kuartz kum ikili sistemi için sıcaklık dağılımları

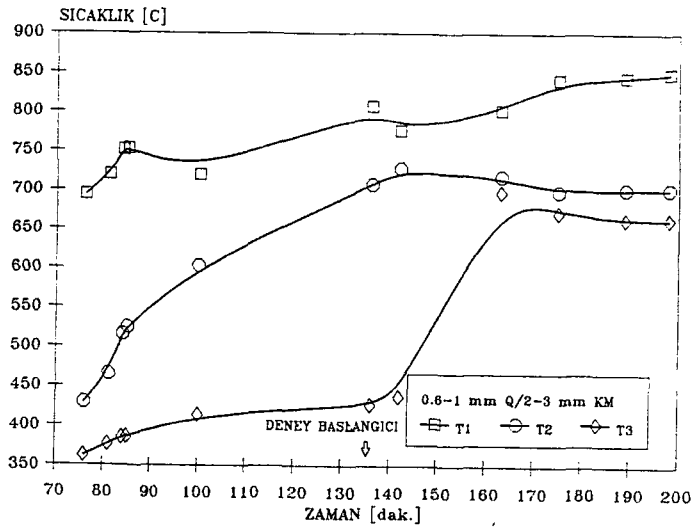
N1 tane boyutundaki Elbistan linyitinin 3×10^{-4} - 6×10^{-4} m ve 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutlarındaki kuartz kumu kullanılarak yakıldığı deneylerde akışkan yatak basınç düşüşleri arasında belirgin bir farklılık gözlenmezken dağıtıcı elek basınç düşüşlerinde büyük tane boyutundaki kuartz kumu için 0.7 N/m^2 , küçük tane boyutu için ise 0.35 N/m^2 seviyelerinde basınç farkı ölçülmüştür. Burada her iki durumda da kül davranımının etkisi de söz konusu olabilmektedir. Küçük çaplı bir akışkan yatak kullanılarak yapılan bir çalışmada Elbistan linyitinin hava kirletme potansiyelinin yanında CO miktarlarına bağlı olarak yanması detaylı şekilde incelenmemiştir [92]. Türkiye'deki en büyük linyit rezervine sahip olan bu linyitin akışkan yatakta kararlı bir şekilde yakılabileceği konusunda olumlu düşüncelere sahip olmak için diğer tane boyutlarındaki linyit numuneleri ile yapılan çalışmalarda yanmanın genellikle kararlı olduğu gözlenmiştir.

N2 tane boyutundaki Elbistan linyitinin 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kuartz kumu ile yakılması sırasında elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 5-3 de verilmektedir. Hava hızının 1.22 m/s . olarak tutulduğu 41. dakikadan itibaren akışkan yatağa linyit beslenerek yürütülen deneyde elde edilen sıcaklık dağılımları aktif yatak sıcaklığının 1030 K (757°C), serbest bölge sıcaklığının ise 802 K (529°C) civarında seyrettiğini göstermiştir. Bu deneyde linyit besleme debisi 60 g/dak. olarak sabit tutulmuştur. Linyit besleme debisi artırılarak çift yakıtla devam ettirilen deneyin 51. dakikasında 225 g/dak. sabit linyit besleme debisi ile tek yakıtla indirilen bölümünde LPG kesilerek çalışma devam ettirilmiştir. 68 dakika süren yakma sırasında 1.22 m/s . hava hızı ile elde edilen aktif yatak sıcaklıkları 1111 K (838°C) ile 1119 K (859°C) arasında değişirken serbest bölge sıcaklıkları 854 K (581°C) ile 949 K (676°C) arasında ölçülmüştür. Yanma genel olarak kararlı olarak izlenmiştir (Şekil 5-3). N2 tane boyutundaki Elbistan linyit numunesi ile yürütülen bir başka çalışmada yatak malzemesi olarak 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kuartz kum kullanılarak 72 g/dak. sabit debi ile linyit beslemesi yapılmıştır. LPG kesilerek devam ettirilen deneylerde 202 g/dak. linyit beslemesi, 1.32 m/s . hava hızı ile aktif yatak sıcaklıkları 1080 K (807°C) ile 1122 K (849°C) arasında ölçülmüştür. Serbest bölge sıcaklıkları ise 973 K (700°C) civarında seyretmektedir (Şekil 5-4). Dağıtıcı elek ve tüm yatak basınç düşüşleri 0.1 ile 0.45 N/m^2 arasında değişmektedir. Diğerine oranla 23 g/dak. fazla linyit besleme yapılmasına karşın elde edilen aktif yatak sıcaklıkları her iki deneyde de paralellikler göstermektedir. Aktif yatak sıcaklıkları ise dakikada 225 gram linyit besleme yapılan deneyde 202 g/dak. besleme yapılan deneye oranla $30\text{-}32 \text{ K}$ ($30\text{-}32^\circ \text{C}$) artış göstermektedir. Aynı tane boyutuna sahip Elbistan linyit numunesi ile yürütülen bir başka deneyde yatak malzemesi olarak kireçtaşı seçilmiş ve yanma

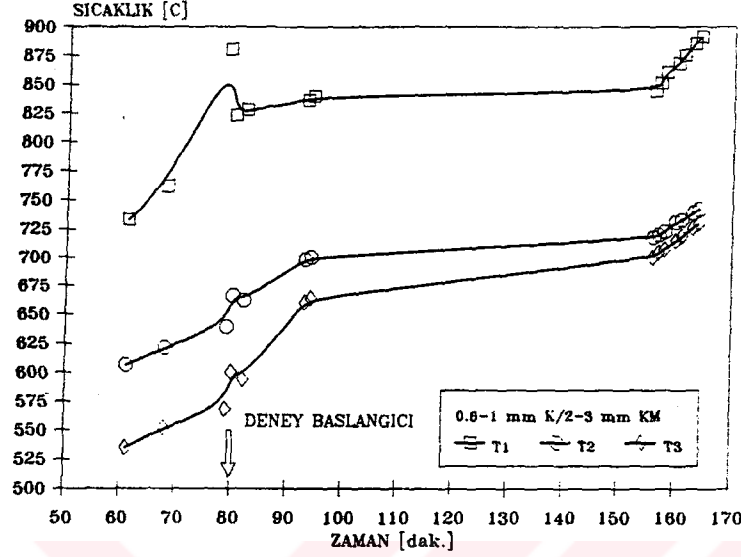
stabilitesi incelenmiştir. Elde edilen sıcaklık profilleri Şekil 5-5 de görülmektedir. Şekil 5-5 ten de görülebileceği gibi 61 dakika civarında linyit tutuşma sıcaklığına ulaşan aktif yatak ve serbest bölge sıcaklıkları LPG kesilerek tek yakıtla yanma sürecine kadar yaklaşık 18 dakika 1006 K (733 ° C) ve 879 K (606 ° C) civarında tutulmuş daha sonra Elbistan linyitinin tek başına yakılması sırasındaki 98,120 ve 172 g/dakikalık kademeli artışlar sonucu 1113 K (840 ° C) ve 973 K (700 ° C) arasında değişmiştir. Bu şekildeki yanma yaklaşık 77 dakika sürmüş ve deneyin son kısmı olan 8 dakikalık bölümde 190 g/dak. sabit linyit besleme debisi ile aktif yatak sıcaklığında belirgin bir artış görülmektedir. Aktif yatak sıcaklığı 1117 K (844 ° C) ile 1164 K (891 ° C) arasında değişmektedir.



Şekil 5-3 N2 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m kuartz kum ikili sistemi için sıcaklık dağılımları

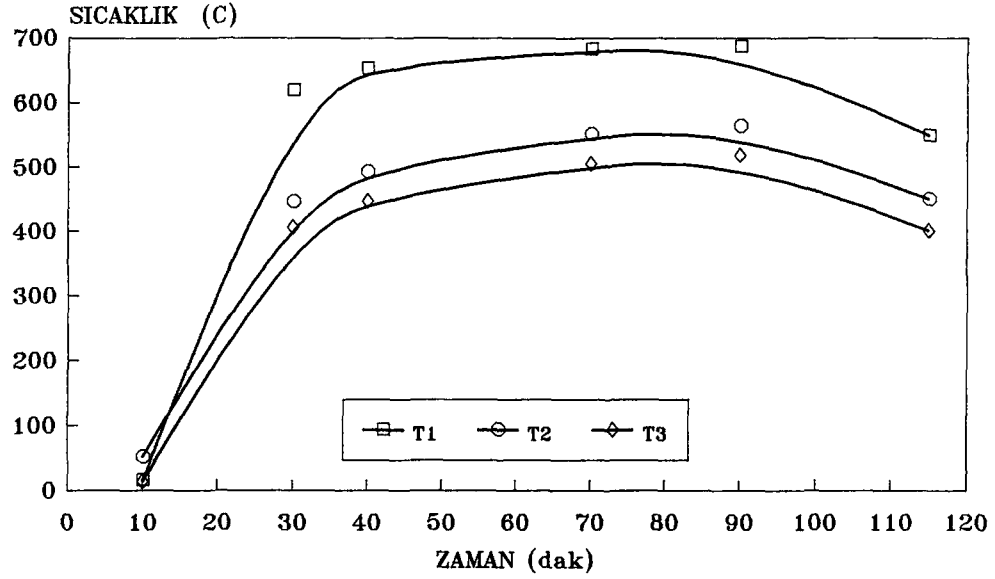


Şekil 5-4 N2 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m kuartz kum ikili sistemi için sıcaklık dağılımları



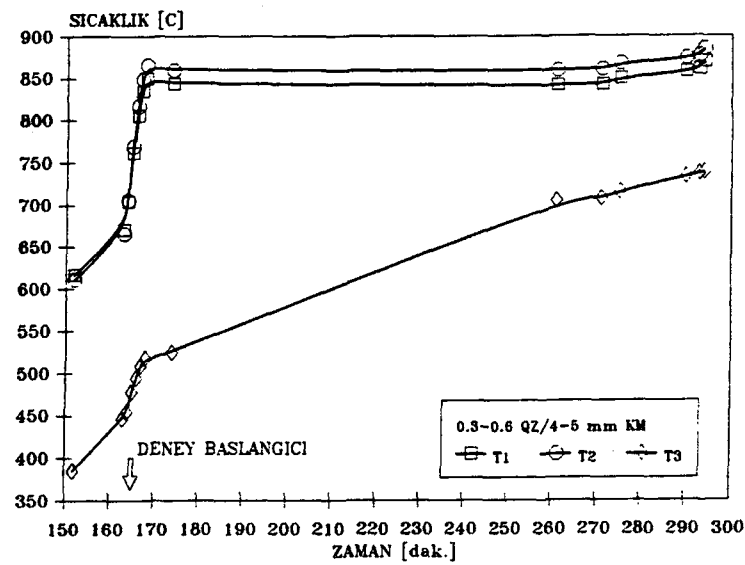
Şekil 5-5 N2 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m kireçtaşı ikili sistemi için sıcaklık dağılımları

Optimum tane boyutu olarak seçilen 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı numunesinin yatak malzemesi olarak kullanıldığı akışkan yatak yanma deneyleri sırasında kireçtaşı kalsinasyonu ve kızdırma kaybı sonucu yüzde 46.8 oranında ağırlık kaybına uğradığı anlaşılmıştır (Tablo 3-3). Bu nedenle kum kullanıldığında yatak sıcaklığı 45 dakika civarında linyit tutuşma sıcaklığına ulaşırken kireçtaşı ile 60 dakika sonunda linyit beslemesi başlatılabilmektedir. Yatağın göreceli olarak daha uzun sürede ısınması yatak malzemesinin endotermik özellik göstermesine bağlanmalıdır. Nitekim Yardım [93] yatak malzemesi olarak kireçtaşı kullanıldığında ön ısıtma sürecinde ortalama tanecik boyutu ve yoğunluğunda azalma olduğunu ve linyit ile kireçtaşı arasındaki yoğunluk farkının küçülmesi sonucu karışma etkinliğinin arttığını belirtmektedir. Yoğunluk farkındaki azalmaya paralel olarak da iyi bir karışma etkinliğinin sağlanabileceği yine aynı çalışmada vurgulanmaktadır. 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşının kalsinasyonu ayrı bir deneyde gerçekleştirilmiş ve yatak ısıtma başlatıldıktan sonra 1.28 m/s. ortalama operasyon hızı ile 45 dakika içerisinde 1126 K (853° C) aktif yatak sıcaklığına ulaşılırken doğal olarak serbest bölge 648 K (375 ° C) seviyelerinde kalmıştır. 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki aynı kireçtaşı numunesinin kalsinasyonu ise ortalama 1.28 m/s. hava hızı ile gerçekleştirilmeye çalışılmış fakat yaklaşık 100 dakika süresince aktif yatak için maksimum 960 K (687 ° C) serbest bölge için ise 790 K (517 ° C) civarında olmuştur (Şekil 5-6).



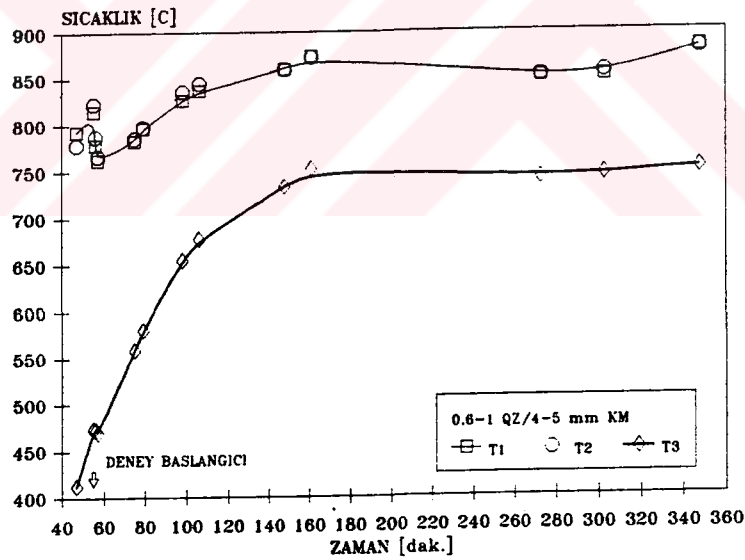
Şekil 5-6 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m kireçtaşı kalsinasyon sıcaklık dağılımları

N3 tane boyutundaki linyit numunesinin 3×10^{-4} - 6×10^{-4} m tane boyutundaki kuartz kum içeren akışkan yataкта yakılması sonucunda oluşan ikili sistemde elde edilen sıcaklık profilleri Şekil 5-7'de verilmektedir. Şekilden de anlaşılabileceği gibi düşük hava hızları ile çalışıldığından (0.61 m/s.) elde edilen sıcaklık artışı 152. dakika sonunda linyit besleme düzeyine ulaşmıştır. 104 g/dak. linyit besleme debisi ile başlayıp kademeli olarak 109 g/dak. ve 126 g/dak. ile devam ettirilen 130 dakikalık yanma sürecinde elde edilen sıcaklıklar 0.85 m/s. sabit operasyon hızı ile 1089 K (816 °C) ile 1157 K (884 °C) arasında ölçülmüştür.



Şekil 5-7 N3 linyiti - 3×10^{-4} - 6×10^{-4} m ikili sistemi için sıcaklık dağılımları

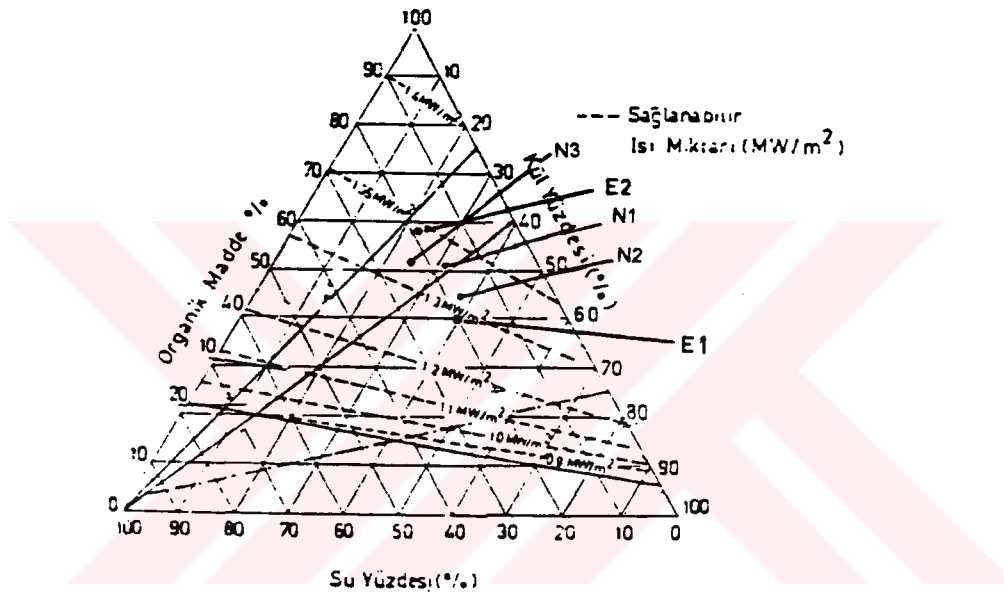
6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kuartz kumu ile N3 tane boyutundaki Elbistan linyiti ikili sistemi kullanılarak elde edilen sıcaklık profilleri Şekil 5-8 de verilmektedir. Hava hızı küçük tane boyutundaki kumun kullanıldığı koşullara oranla daha yüksek tutularak (1.22 m/s.) gerçekleştirilen deneyde ön ısıtma süresi 47 dakika civarında tutulmuş ve 55. dakikada başlatılan linyitin yakıldığı kısım yaklaşık olarak 300 dakika sürmüştür. 100 g/dak. ile 170 g/dak. arasında kademeli olarak arttırılan linyit besleme debisi, 1.16 m/s. civarında sabit tutulan hava hızı ile 100 dakikalık süreçte 1035 K (762 ° C) ile 1146 K (873 ° C) arasında ,aktif yatak sıcaklığı 742 K (469 ° C) ile 1025 K (752 ° C) arasında da serbest bölge sıcaklıkları saptanmıştır. Genellikle birbirinden değişik ancak sabit linyit besleme debilerinde yarımşar saatlik aralıklarda kararlı yanma sağlanmıştır. Kuartz kumun tane boyutu küçüldükçe yoğunluğunun azalması ile daha düşük operasyon hızları ile akışkanlandırılabilirdiği ve elde edilen sonuçlardan N3 tane boyutundaki linyitin yakılması sırasında 3×10^{-4} - 6×10^{-4} m ile 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kuartz kumu ile oluşturulan ikili sistemlerin genellikle kararlı yanma gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5-8 N3 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m kuartz kum ikili sistemi için sıcaklık dağılımları

La Nauze'un yanabilirlik diyagramında yakıtın içerdiği nem, kül ve organik madde miktarları gözönüne alınarak E1 ve E2 olarak kodlanan iki farklı Elbistan linyiti karşılaştırılmış ve 4600 kJ/kg ısı değere sahip ve bu çalışmada kullanılan E1 kodlu linyit 1.29 MW/m^2 ısı miktarı sağlarken, 14 000 kJ/kg ısı değere sahip E2 linyitinin m^2 başına 1.34 MW ısı sağlayabileceği görülmüştür (Şekil 5-9) . E1 kodlu linyitin üç farklı fraksiyonu N1, N2 ve N3 numunelerinin La Nauze diyagramı

linyitin üç farklı fraksiyonu N1, N2 ve N3 numunelerinin La Nauze diyagramı üzerindeki yerleri farklılıklar göstermektedir. Bunun nedeni, linyit numunelerinin kısa analizlerinin incelenmesi ile anlaşılabilir. Nitekim, N1 ve N3 fraksiyonları benzer analiz sonuçları verirken N2 fraksiyonu özellikle kül açısından oldukça yüksek bileşim göstermektedir. Ayrıca sabit karbon hesaplamaları da N2 numunesinin diğer fraksiyonlara oranla yüksek orana sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Isıl değer analiz sonuçları ise elementel analiz ile paralellik göstermekte ve büyük ihtimalle eleme sonucunda orta fraksiyon olan N2 de yüksek oranda rastlanan CaO içeriğinden dolayı ısı değerleri arasında en düşük olanı N2 fraksiyonu olmaktadır (Tablo 3-1).

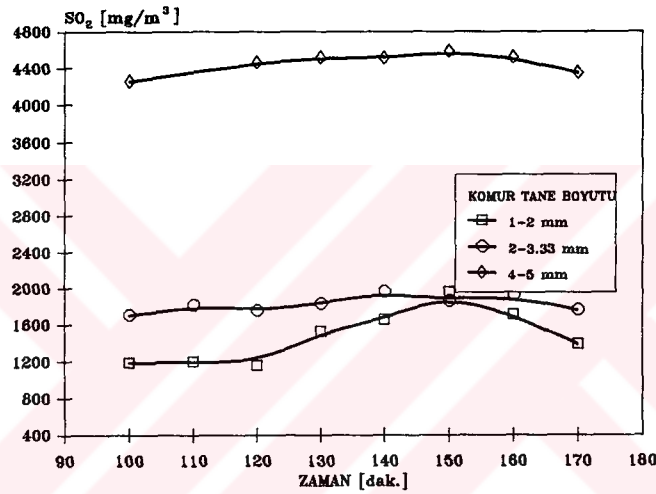


Şekil 5-9 La Nauze diyagramında Elbistan linyitlerinin yanabilirliği

5.1.2 Farklı Tane Boyutlarındaki Elbistan Linyitinin Yakılması ile Oluşan Yayınım

Hiçbir sorbent ilave edilmeksizin yürütülen deneylerde N1, N2 ve N3 tane boyutlarındaki Elbistan linyit numuneleri 0.2 m çapındaki akışkan yatakta 135 g/dak. sabit linyit besleme debisi ile yakılmıştır. Hartmann-Braun marka sabit gaz analiz sistemindeki SO₂ monitorünün ölçüm aralıklarının üst sınırı olan 2442 mg/m³ linyitin yanabilir kükürt içeriğinin oluşturabileceği teorik SO₂ yayılım miktarının altında olduğu için Elbistan linyitinin tek başına yakıldığı deneylerde SO₂ yayınımlarının izlenmesi MRU 95/3 marka taşınabilir gaz analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Linyitin besleme miktarına bağlı olarak farklı tane boyutlarının içerdikleri yanabilir kükürt miktarları göz önüne alındığında N1 için teorik SO₂ yayılım miktarı 2240 mg/m³, N2 için 2900 mg/m³, N3 için ise 5240 mg/m³ olarak hesaplanmaktadır.

N1 kodlu Elbistan linyiti için elde edilen SO_2 yayılım değerleri , 1.48 hava fazlası , 1123 K (850 ° C) aktif yatak sıcaklığı ve %7 O_2 bazında 1185 mg/m^3 e 1959 mg/m^3 seviyelerinde ölçülmüştür. Linyit besleme debisi 100 g/dak. olarak sabit tutulmuştur. Buna karşın NO_x yayılımının aynı şartlarda 334 ile 389 mg/m^3 civarında olduğu saptanmıştır. Burada ölçüm noktasında baca gazı sıcaklığı 463 K (190 ° C) ile 513 K (240 ° C) arasında değişmektedir(Şekil 5-10). N2 tane boyutundaki linyitin akışkan yatakta yakılması sonucunda elde edilen SO_2 yayılımı 1701 mg/m^3 ile 2012 mg/m^3 arasında değişmektedir. NO_x derişimleri ise 302 mg/m^3 ile 396 mg/m^3 arasındadır. Bu değerler %7 O_2 bazında indirgenmiş değerlerdir. Burada linyit besleme debisi 191 g/dak. olarak ayarlanmıştır. Elde edilen değerler Elbistan linyitinin yanabilir kükürt analizleri ile uyum içerisinde (Tablo 3-4).



Şekil 5-10 Farklı tane boyutlarındaki linyitin yakılması ile oluşan yayınımlar

Elbistan linyitinin N3 tane boyutundaki numunesi ile yürütülen deneylerde ise SO_2 yayılım değerleri 4254 mg/m^3 ile 4582 mg/m^3 (%7 O_2 bazında) ölçülmüştür. Burada baca gazı sıcaklığı 544 K (271 ° C) civarında, aktif yatak sıcaklığı ise 1121 K (850 ° C) civarındadır. Ortalama 146 g/dak. linyit besleme debisi ile yürütülen deneylerde elde edilen NO_x yayılım değerleri 302 mg/m^3 ile 370 mg/m^3 seviyelerindedir.

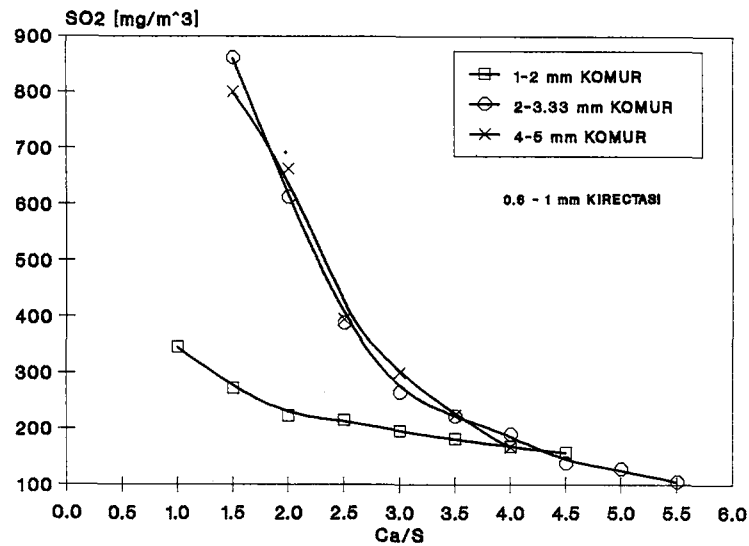
Yukarıda elde edilen SO_2 yayılım değerleri literatür ile uyum içinde görünmemektedir. Literatürde yapılan çeşitli saptamalar linyit tane boyutu küçüldükçe yayılımın artacağı şeklinde olmuştur. Bunun nedeninin de linyit taneciklerinin yatakta kalma sürelerinin küçük tane boyutları için kısa olması dolayısı ile yanmanın hemen gerçekleşmesi ve yayılımın artması, buna karşın büyük tane boyutlarında taneciklerin yatakta kalma sürelerinin uzun olması ve yanmanın daha uzun sürede gerçekleşerek yayılımı azaltacağı şeklinde açıklanmaktadır [71]. İkinci, taneciklerin yüksek çalışma

hızlarında ve yatak içi hareketlerle ufalanmaları sonucu taşınabileceklerini, bunun sonucu olarak da SO_2 yayınımlarında azalma olacağını belirtmiştir. Moss v.ç.a.[71], kükürt çeşitleri ve içeriklerinin etkisini incelediği çalışma sonuçları ile paralellik gösteren bu çalışmada N2 fraksiyonunun kükürt içeriğinin özellikle yanabilir kükürdünün N1 ve N3 fraksiyonlarına oranla düşük olduğu gözlenmektedir.

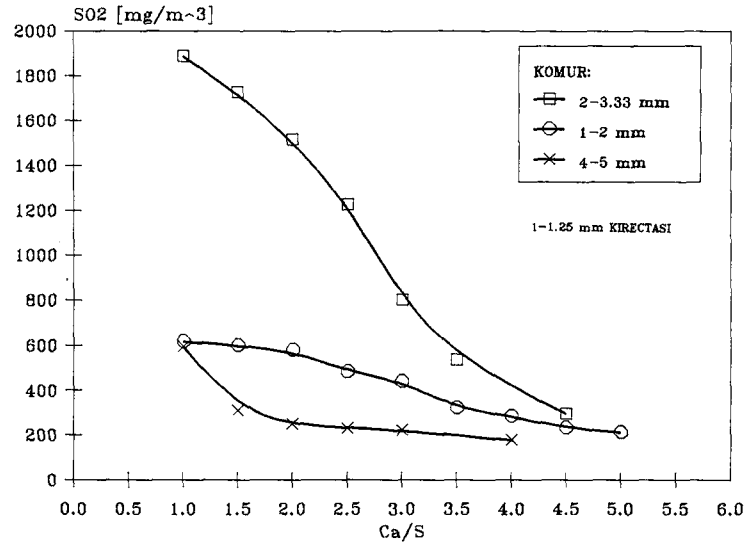
5.2. Çeşitli Parametrelerin SO_2 ve NO_x Üzerindeki Etkisi

5.2.1. Ca/S Oranının SO_2 ve NO_x Yayınımlarına Etkisi

Üç değişik tane boyutundaki linyitin yakılarak 6×10^{-4} - 10^{-3} m ve 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı numunesi ile SO_2 sıyırılması amacı ile yürütülen deneylerde Şekil 5-11 ve Şekil 5-12 de görüldüğü gibi küçük tane boyutlarındaki kireçtaşı kullanıldığında Ca/S mol oranına bağlı olarak önceleri yavaş ve zayıf bir tutma, Ca/S mol oranı 3.5 un üzerinde ise daha kararlı ve etkin bir tutma sağlanmıştır. Her üç tane boyutu için de 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşının Şekil 5-12 den görülebileceği gibi 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşının kullanımına oranla daha değişik davranımda olduğu saptanmıştır. 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı numunesi kullanılarak elde edilen tutma verimi N2 için Ca/S mol oranı 1 ile 3 arasında daha az etkin, N1 ve N3 için ise genellikle etkin ve kararlı olduğu gözlenmiştir. Ca/S mol oranı 3.5 ve daha büyük değerler için ise üç tane boyutu için farklılıklar göstermemektedir. Burada kireçtaşı kalsinasyonu, yatakta kalma zamanı ve kireçtaşı gözenekliliğinin büyük önemi vardır. Gözeneklilik ile ilgili bilgiler porozite, taramalı elektron mikroskobu ile yapılan inceleme ve mikrograflardan elde edilebilir (Bölüm 4).



Şekil 5-11 Farklı tane boyutlarındaki linyitin Ca/S mol oranına göre SO_2 yayınımları



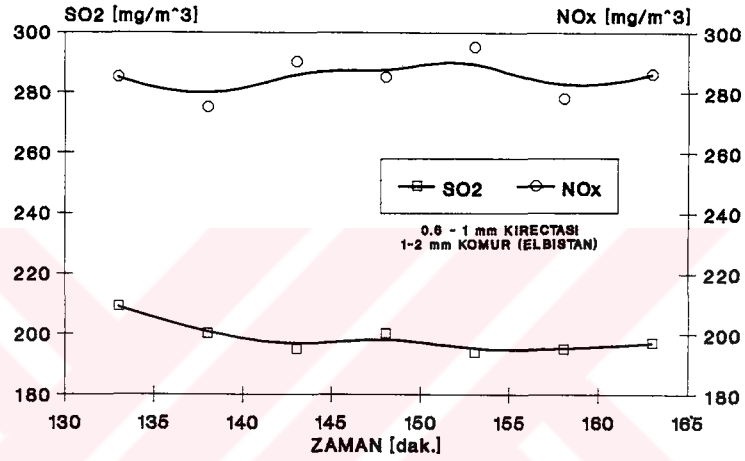
Şekil 5-12 Farklı tane boyutlarındaki linyitin Ca/S mol oranına göre SO₂ yayınımları

5.2.2. Kireçtaşı Tane Boyutunun Sıyırma Üzerindeki Etkisi

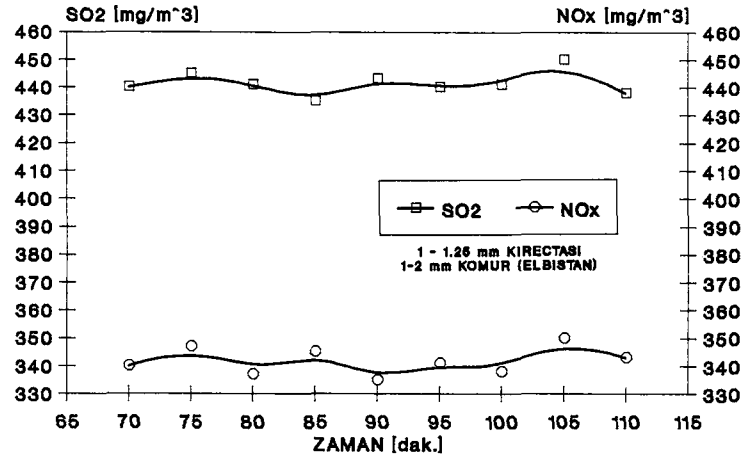
6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı numunesi ile N1 tane boyutundaki Elbistan linyitinin 1.22 m/s. hava hızı, ortalama 181 g/dak. linyit besleme debisi ve bu şekilde 1123 K (850 ° C) aktif yatak sıcaklığına ulaşılmasından sonra sıcaklığın bu değerde sabit tutulması ile yürütülen yakma deneylerinde SO₂ tutmaya yönelik olarak 143 dakika süre ile Ca/S oranı 3 olarak kireçtaşı beslemesi yapılmıştır. Elde edilen SO₂ yayınımlar değeri 195 mg/m³ NO_x değeri ise 285 mg/m³ civarında ölçülmüştür. Deney sonuçları Şekil 5-13 de görülmektedir. Bu deneyde yanma kademeli olarak gerçekleştirilmediği için NO_x yayınımlar değeri Ca/S oranına bağlı olarak azalma gözlenmemektedir. Şekil 5-13 de görülebileceği gibi N1 tane boyutundaki linyitin yanması sırasında oluşan SO₂ yayınımlarını sıyırmak için kullanılan 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı debisi Ca/S mol oranı 3 olacak şekilde ayarlanmıştır. Linyit besleme debisi 185 g/dak ve operasyon hızı 1.28 m/s. ile elde edilen SO₂ ve NO_x değeri sırası ile 440 mg/m³ ve 340 mg/m³ tür. Şekil 5-14 de SO₂ ve NO_x yayınımlarının 40 dakika süre ile gösterdikleri davranım görülmektedir. Kireçtaşının her iki tane boyutunun sonuçları gözönüne alındığında tutma etkinliği açısından Ca/S mol oranı 3 olarak sabit tutulduğunda (optimum değer) elde edilen bulgular literatür değeri ile uyum içindedir. Küçük tane boyutuna sahip kireçtaşının özgül yüzeyinin fazlalığı ve tutma kapasitesinin daha yüksek olması nedenleri ile 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı deneysel çalışmada daha etkin görülmektedir. Ufalanma ve taşınma riski olmasına karşın küçük tane boyutlu sorbent SO₂ sıyırma açısından avantajlıdır. Buna karşın kireçtaşının tane boyutu büyüdükçe yatakta kalma zamanı artmakta ve buna bağlı olarak SO₂ sıyırma verimi yükselmektedir. Bunun

yanısıra operasyon sırasında taneciklerin ufalanması sonucu gaz-katı temas yüzeyinin artmasının da sıyırma verimini artırdığı savunulmaktadır [60].

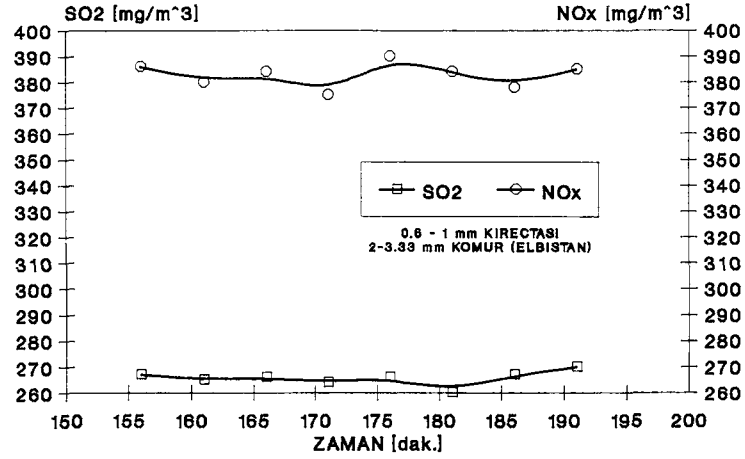
Kireçtaşının önceden kalsine edilerek akışkan yatağa beslenmesinin fazla bir avantaj sağlamadığı anlaşılmıştır. Ön denemelerde yatağın yaş kireçtaşı ile hafif soğumasına karşın kalsinasyonun gerçekleşmesi ile tutma etkinlikleri açısından farklılık gözlenmemiştir. Ön kalsinasyon işlemlerinin ekonomik açıdan da bir yük getireceği düşünülürse özellikle ticari ölçekteki sistemlerde, kireçtaşının yaş olarak kullanılmasının daha uygun bir yöntem olacağı düşünülmektedir..



Şekil 5-13 N1 linyiti - 6×10^{-4} - 10^{-3} m kireçtaşı sistemi ile yayınım değerlerinin sürekli izlenimleri



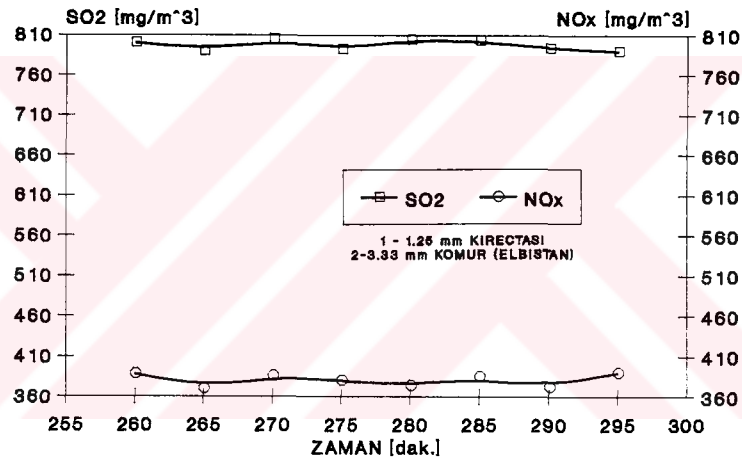
Şekil 5-14 N1 linyiti - 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m kireçtaşı sistemi ile yayınım değerlerinin sürekli izlenimleri



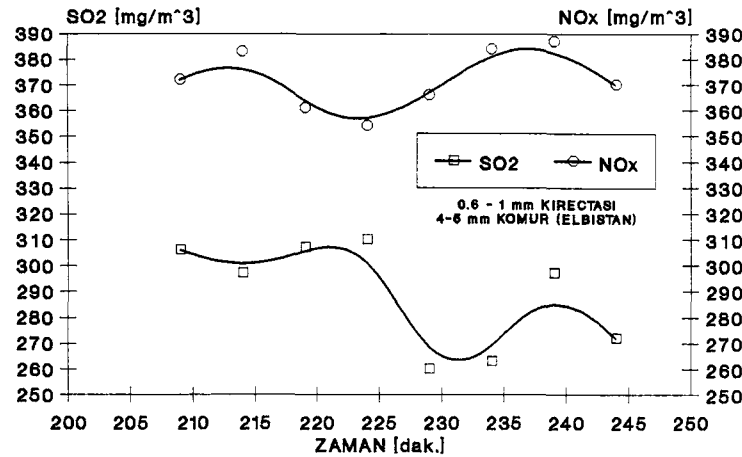
Şekil 5-15 N2 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m kireçtaşı sistemi ile yayılım değerlerinin sürekli izlenmeleri

N2 tane boyutundaki linyit numunesinin 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı numunesi ile birlikte 172 g/dak. linyit besleme debisi ve Ca/S oranı 3 olacak şekilde beslenmesi ile elde edilen SO₂ yayılım değerleri 264 mg/m³ seviyelerindedir. 1.16 m/s. hava hızı ve %7 O₂ bazında NOx yayınımları 386 mg/m³ olarak ölçülmüştür (Şekil 5-15). 1.28 m/s. hava hızı ile akışkanlaştırılan yatakta 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı numunesi kullanıldığında elde edilen SO₂ yayınımları 800 mg/m³, NOx yayınımları ise 388 mg/m³ seviyelerindedir (Şekil 5-16). Sıcaklığın 1123 K (850 ° C) civarında sabit tutulduğu deneyde 260 ile 295. dakikalar arasında sürekli izlenen SO₂ ve NOx yayılım değerleri yukarıda verilen değerlerden çok az sapma göstermiştir. Genel olarak dikkat çeken nokta kararsız hal deneyleri dışında, kireçtaşının yatağa linyit ile aynı anda beslenmeye başlanmasının özellikle SO₂ yayılımını hiçbir zaman maksimum değere çıkartmamasıdır. Ayrı ayrı bunkerlerden alınan linyit ve kireçtaşının besleme debileri, Ca/S mol oranına bağlı olarak bilgisayar vasıtası ile kontrol edilmiştir. SO₂ sıyımada önemli bir başka nokta ise kireçtaşının besleme noktasının yatağın hangi bölgesinde bulunduğuudur. Yatak altından besleme yatak üstü beslemeye oranla daha iyi sonuçlar vermekle birlikte bunun aksini iddia eden araştırmacılar da vardır [94]. N3 tane boyutundaki Elbistan linyitinin 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı ile birlikte beslendiği akışkan yatakta yanma sırasında oluşan SO₂ ve NOx yayınımlarının izlenmesi sırasında Şekil 5-17 de görülebileceği gibi Ca/S mol oranı 3 olacak şekilde sabit besleme yapılırken linyit besleme debisi 145 g/dak. civarında tutulmuş ve 67.dakikada başlatılan linyit besleme 75. dakikada LPG kesilerek 1.08 m/s. hava hızı ile tek yakıtla yanmaya devam edilmiştir. Elde edilen SO₂ yayılım değerleri önceleri 500 mg/m³ seviyelerinde izlendikten sonra 209.dakikadan itibaren 300 mg/m³ seviyelerinde gerçekleşmiştir. 33 dakika süre ile

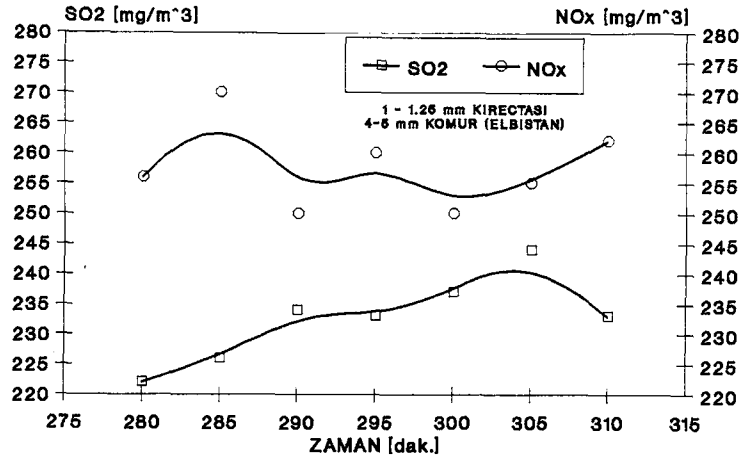
SO₂ yayınımları 300 mg/m³ (%7 O₂ bazında) , NO_x yayınımları ise 383 mg/m³ civarında ölçülmüştür. SO₂ tutma verimi % 94.27 olarak hesaplanmıştır. Aynı tane boyutundaki Elbistan linyitinin 10⁻³-1.25x10⁻³ m tane boyutundaki kireçtaşı ile Ca/S mol oranı 3 olacak şekilde beslenmesi ile yanma sırasında ortaya çıkan SO₂ ve NO_x yayınımları azaltılmaya çalışılmıştır. Elde edilen yayımların değerleri Şekil 5-18 de verilmektedir. Deneyin 280 ile 310. dakikaları arasında ölçülen değerler SO₂ için 222 mg/m³ (% 7 O₂) ve NO_x için de 256 mg/m³ (% 7 O₂) civarındadır. Bu sırada hava hızı 1.14 m/s., sıcaklık ise 1123 K (850 ° C) seviyelerinde tutulmuştur. Linyit besleme debisi 148 g/dak. olacak şekilde sabit tutulan deney boyunca N3 tane boyutundaki linyitin yanabilir kükürt oranı % 1.4 ve teorik SO₂ yayınımları 5240 mg/m³ seviyelerindedir. Burada elde edilen SO₂ tutma verimi % 95.76 olarak hesaplanmıştır. Büyük tane boyutundaki kireçtaşının daha etkin görünmesi büyük olasılıkla kireçtaşının termal şok sonucu uflanarak gözenekli yeni yüzeyler oluşturması ile açıklanabilir [60].



Şekil 5-16 N2 linyiti-10⁻³-1.25x10⁻³ m kireçtaşı sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi



Şekil 5-17 N3 linyiti-6x10⁻⁴-10⁻³ m kireçtaşı sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi

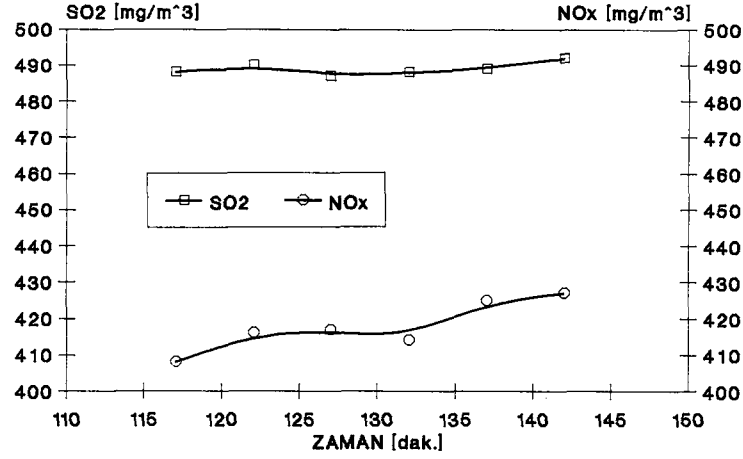


Şekil 5-18 N3 linyiti- 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m kireçtaşı sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi

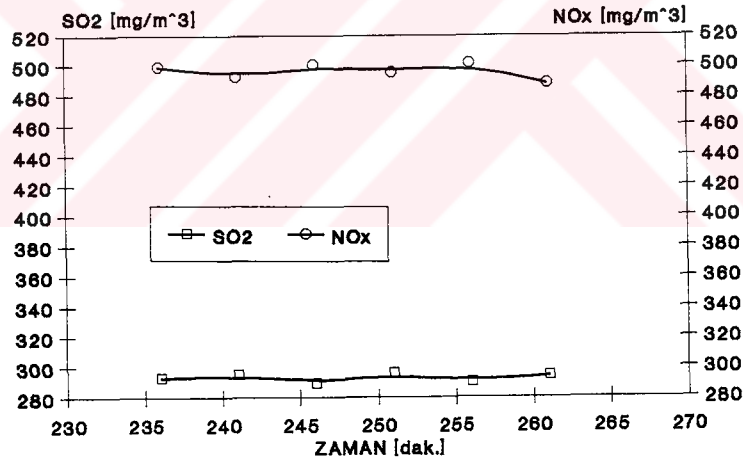
5.2.3. Dolomit Tane Boyutunun SO₂ Sıyırmasına Etkisi

Üç farklı tane boyutundaki Elbistan linyiti 6×10^{-4} - 10^{-3} m ve 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki iki farklı dolomit ile birlikte yakılarak ortaya çıkan SO₂ ve NO_x yayınımları izlenmiştir. Ca/S mol oranı 3 olacak şekilde sabit tutularak ve operasyon hızı ortalama olarak 1.22 m/s. civarında tutulduğunda N1 tane boyutundaki linyit numunesi için küçük tane boyutundaki D1 kodlu dolomit kullanılarak elde edilen SO₂ ve NO_x yayınımları sırası ile 488 ve 418 mg/m³ seviyelerindedir. Aynı linyit numunesinin yayımladığı SO₂ miktarı 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki dolomit (D1) ile tutulmaya çalışıldığında elde edilen SO₂ yayılım değerleri 293 mg/m³, NO_x yayılımı ise 499 mg/m³ olarak ölçülmüştür. Şekil 5-19 ve Şekil 5-20 de görülen veriler her iki deneyin de 173 g/dak. linyit besleme debisi, 1.22 m/s. hava hızı ve 1123 K (850 ° C) sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmesi sonucu elde edilmiştir. Küçük tane boyutundaki D1 dolomiti için 236. dakika ile 261. dakikalar arasında elde edilen değerler Şekil 5-19 da verilmektedir. Tutma etkinliği % 78.21 olarak bulunmuştur. 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki dolomit D1 numunesi ile gerçekleştirilen çalışma 75.dakikada başlayan tek yakıtla yanma sonrası 117.dakikadan 142. dakikaya kadar izlenmiştir. Şekil 5-20 den de görülebileceği gibi SO₂ sıyırma etkinliği % 86.91 olarak bulunmaktadır. Porozite ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) sonuçlarına göre SO₂ tutma açısından orta derecede etkin olması beklenen D1 numunesinin küçük tane boyutunun daha az etkin olması ufaalanmaya bağlanabilir. Nitekim kalsine olmuş numunelerde büyük tane boyutunun toplam yüzey alanı küçüğe oranla 6 m²/g daha büyüktür. Aslında bunun tersi beklenmektedir. Bunun nedeni numune hazırlanması

sırasında ufalanma sonucu analiz edilen numunelerin küçük yüzey alanına sahip olmalarıyla açıklanabilmektedir.



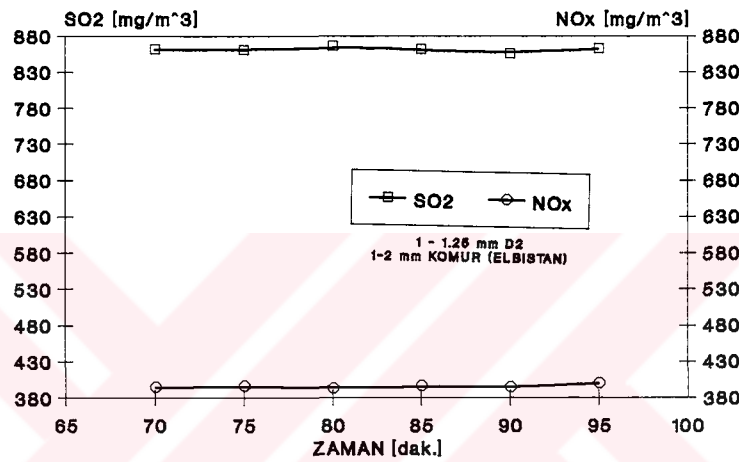
Şekil 5-19 N1 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m D1 sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi



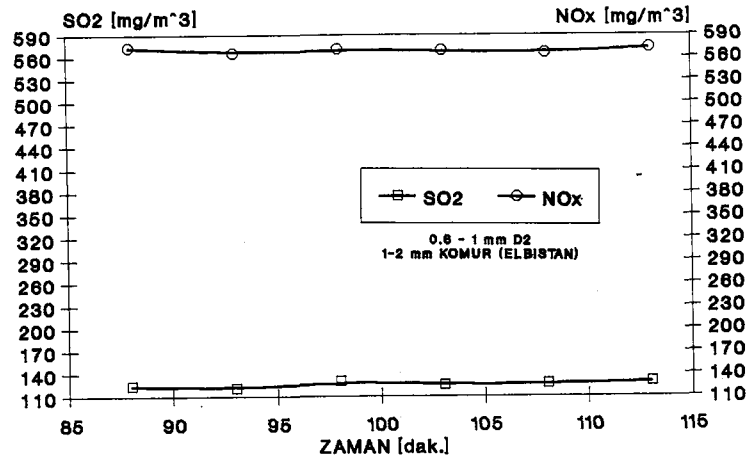
Şekil 5-20 N1 linyiti- 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m D1 sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi

Gerçekleştirilen bir deneyde N1 tane boyutundaki linyit 1.16 m/s. ile akışkanlaştırılmış yatakta yakılmıştır. SO₂ sıyırmak amacı ile D2 dolomit numunesi kullanılmıştır. Ca/S mol oranının 3 ve operasyon sıcaklığının 1123 K olduğu koşullarda saptanan SO₂ miktarı 124 mg/m³, NO_x miktarı ise 565 mg/m³ olmuştur. Linyit besleme debisinin 166 g/dak. olduğu deneyde 75.dakikada LPG kesilerek 88. dakika ile 113. dakikalar arasında kararlı bir yanma izlenmiştir (Şekil 5-21). İri taneli D2 dolomit numunesinin kullanıldığı deneylerde ölçülen SO₂ miktarı 861 mg/m³, NO_x miktarı ise 394 mg/m³ olmuştur. Burada kullanılan D2 kodlu dolomit

numunesinin orijininin farklı olması, mermerimsi yapıda olması ve bu yüzden ufalanmaya daha az meyilli olması ile kalsinasyon sonucu yoğunluk azalmasının etkisi gözönüne alınmalıdır. Kullanılan dolomit numunelerinin her ikisi de CaO miktarları yüksek dolomitlerdir. TG ve DTA sonuçlarından da görülebileceği gibi yapıda önce $MgCO_3$ bozunmaktadır. Fakat SO_2 sıyırma işlemi temel olarak CaO vasıtası ile gerçekleşmektedir. 52.dakikada başlayan deneyde 70.dakikadan sonra 25 dakika süre ile kararlı bir SO_2 sıyırma süreci izlenmiştir. Elde edilen değerler Şekil 5-22 de görülmektedir.

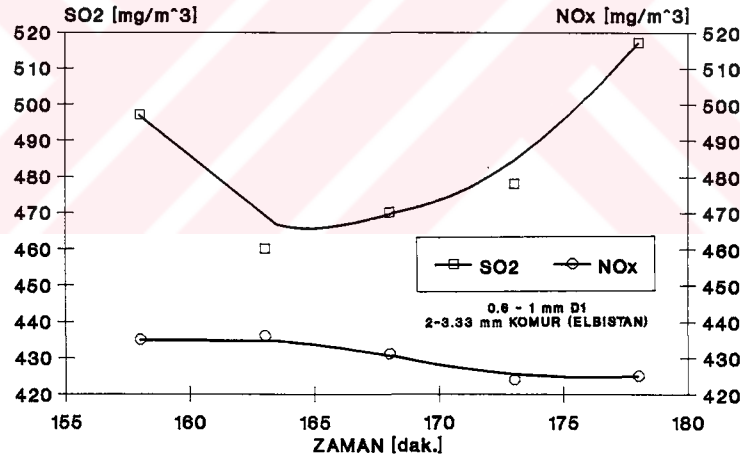


Şekil 5-21 N1 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m D2 sistemi ile yayınımları sürekli izlenmesi



Şekil 5-22 N1 linyiti- 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m D2 sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi

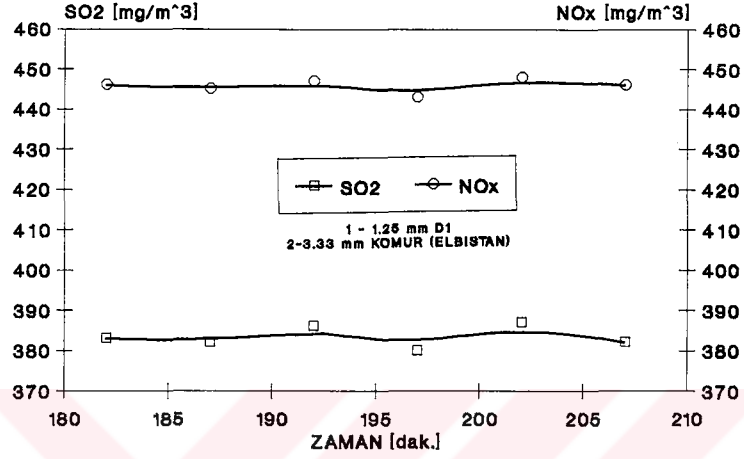
Diğer bir deneyde N2 tane boyutundaki linyit yakılarak, 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki D1 numunesi ile SO₂ sıyırma yapılmış ve yayılım miktarları sürekli olarak izlenmiştir. 1113 K (840 ° C) civarında ve Ca/S mol oranı 3 olacak şekilde 173 g/dak. linyit besleme debisi ile yürütülen deneylerde 497 mg/m³ SO₂ ve 435 mg/m³ NO_x yayılımı elde edilmiştir. 158 ile 178. dakikalar arasında elde edilen değerler Şekil 5-23 de görülebilir. SO₂ değerlerindeki dalgalanmalar ufalanmaya bağlı olarak taşınmaya bağlanabilir. Ayrıca kireçtaşı sürekli olarak beslenmesine karşın serbest bölgede sıyırma olmayabilmektedir[55]. Aynı tane boyutundaki linyitin 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki D1 numunesi ile SO₂ giderme amacı ile yakılması sırasında akışkan yataklı sistemden baca gazına yansıyan yayılım değerleri Şekil 5-24 de görülmektedir. 1113 -1123 K (840-850 ° C) arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneyde Ca/S mol oranı 3 olacak şekilde dolomit beslemesi (D2) yapıldığında gözlenen SO₂ değerleri 182 ile 207. dakikalar arasında 383 mg/m³ (% 7 O₂) , NO_x yayılımı ise 446 mg/m³ tür.



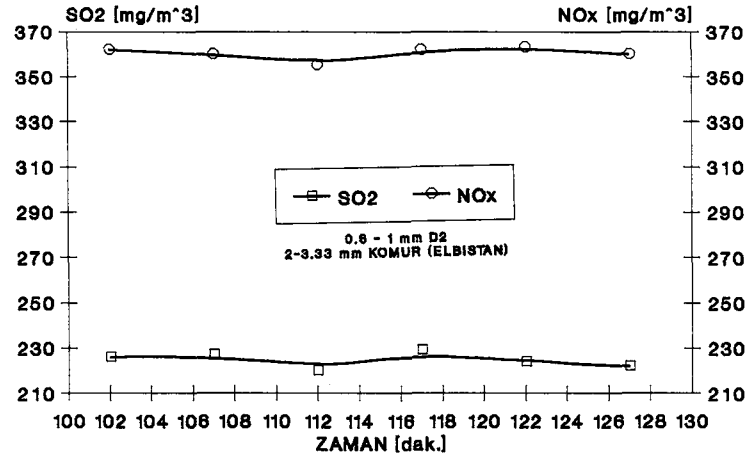
Şekil 5-23 N2 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m D1 sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi

N2 tane boyutundaki Elbistan linyitinin yakıldığı deneyde 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki D2 dolomiti SO₂ sıyırma amacı ile eklenmiş ve Ca/S mol oranı 3 ve 1123 K (850 ° C) deki deney koşullarında baca gazında saptanan yanma gazlarının SO₂ ve NO_x içerikleri sırasıyla 226 mg/m³ ve 362 mg/m³ olarak ölçülmüştür. Şekil 5-25 den görülebileceği gibi 102 ve 127. dakikalar arasında kararlı bir sıyırma sağlanmıştır. Aynı tane boyutundaki linyitin, 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki D2 dolomitinin SO₂ sıyırmak amacı ile yatağa eklenerek, yakıldığı deneylerde SO₂ tutma etkinliğinin incelenmesi sırasında elde edilen SO₂ ve NO_x yayınımları Şekil 5-26 da

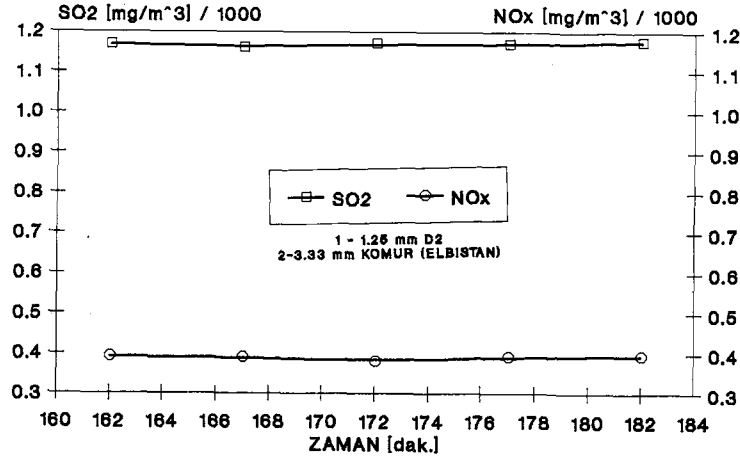
verilmektedir. 162. dakika ile 182 dakika arasında elde edilen SO_2 yayılım değerleri 200 g/dak. linyit beslemesi, Ca/S mol oranı 3 olarak sabit tutularak 1168 mg/m^3 , NO_x yayılımı ise 391 mg/m^3 olarak ölçülmüştür. Burada tutma verimi düşük olmakla birlikte kararlı bir yanma göze çarpmaktadır.



Şekil 5-24 N_2 linyiti- 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m D1 sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi

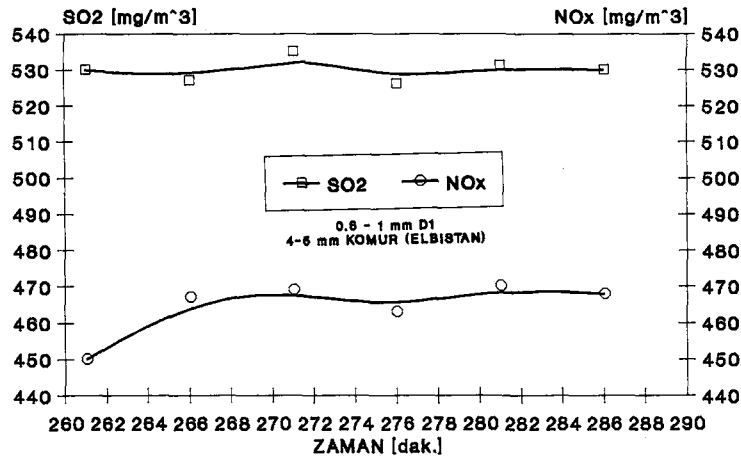


Şekil 5-25 N_2 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m D2 sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi

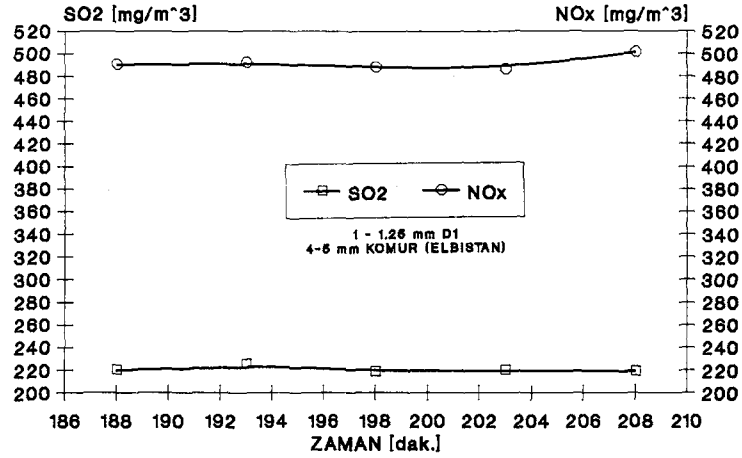


Şekil 5-26 N2 linyiti- 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m D2 sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi

N3 tane boyutundaki Elbistan linyitinin 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki D1 dolomiti ile Ca/S mol oranı 3 olacak şekilde karıştırılarak akışkan yatağa beslenmesi ile yürütülen yakma ve yayılım kontrolü deneylerinde elde edilen SO_2 ve NO_x değerleri Şekil 5-27 de verilmiştir. SO_2 yayınımları 530 mg/m^3 , NO_x yayınımları ise 465 mg/m^3 seviyelerinde ölçülmüştür. 261. dakika ile 286. dakikalar arasında elde edilen yayılım değerleri Şekil 5-27 de görülmektedir.. Aynı linyit numunesinin yayımladığı SO_2 nin 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki D1 dolomiti ile tutulması sırasında 188.dakika ile 208. dakika arasında 1.22 m/s . hava hızı ve 1123 K (850°C) de sabit tutulan yataktan baca gazına geçen SO_2 ve NO_x yayınımları sırası ile 220 mg/m^3 ve 490 mg/m^3 olarak izlenmiştir (Şekil 5-28).

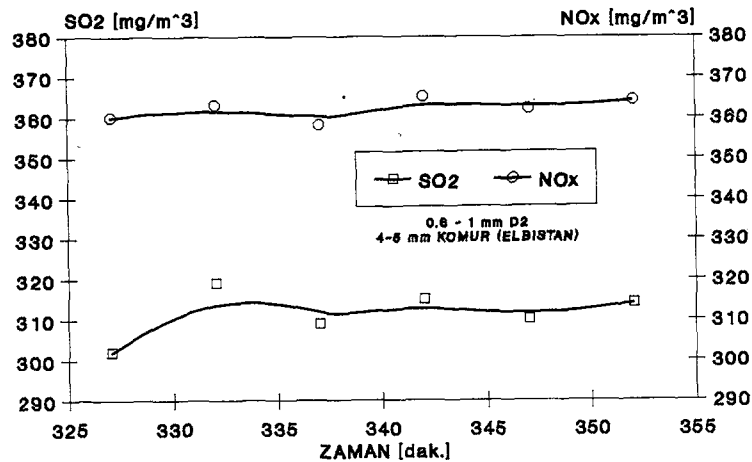


Şekil 5-27 N3 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m D1 sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi

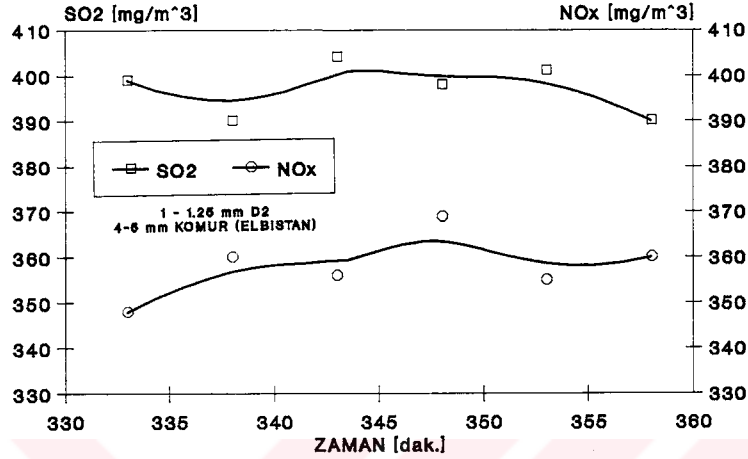


Şekil 5-28 N3 linyiti- 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m D1 sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi

N3 tane boyutundaki linyit numunesinin 1123 K (850 ° C) sıcaklık, 1.22 m/s. hava hızı ve 145 g/dak. linyit besleme debisi ile yürütülen SO₂ tutma deneylerinde Ca/S mol oranı 3 olacak şekilde 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki D2 dolomiti kullanılarak elde SO₂ yayınımları %7 O₂ bazında 312 mg/m³, buna karşın aynı şartlarda NOx yayınımları 360 mg/m³ olarak ölçülmüştür. 327 ile 352. dakikalar arasındaki yayınımlar Şekil 5-29 da verilmektedir. Şekil 5-30 da ise aynı tane boyutundaki linyitin 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki D2 dolomiti ile SO₂ yayınımlarının azaltılmasına yönelik olarak yapılan çalışmanın sonuçları görülmektedir. Burada 3 olarak sabit tutulan Ca/S mol oranında elde edilen SO₂ yayınımları 360 mg/m³, NOx ise 358 mg/m³ tür.



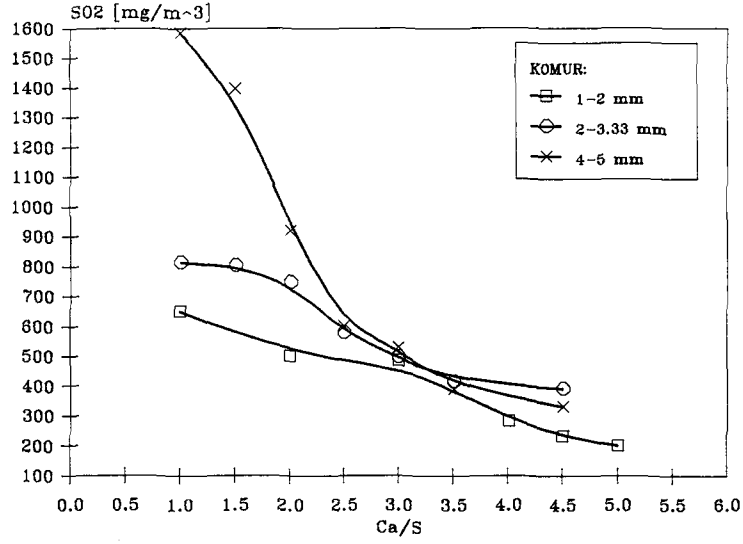
Şekil 5-29 N3 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m D2 sistemi ile yayınımların sürekli izlenmesi



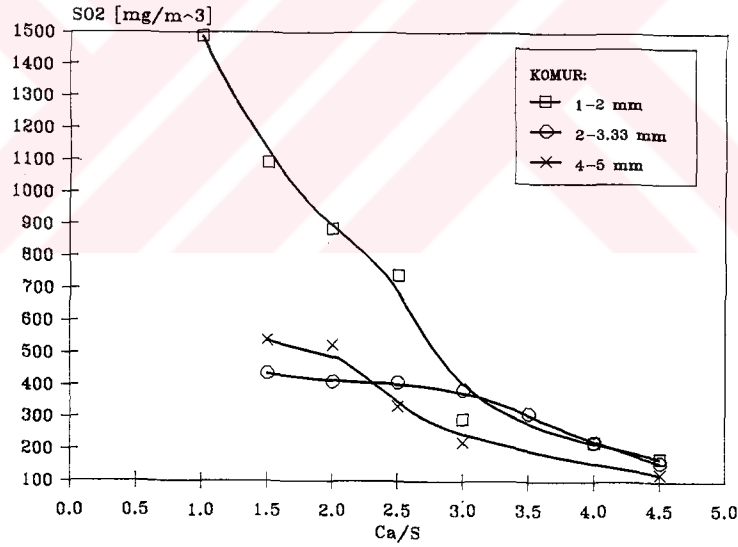
Şekil 5-30 N3 linyiti- 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m D2 sistemi ile yayınımaların sürekli izlenmesi

5.2.4. Dolomit Kullanıldığında Ca/S Mol Oranının SO₂ Sıyırma Üzerine Etkisi

6×10^{-4} - 10^{-3} m ve 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki D1 dolomiti kullanılarak yürütülen tutma deneylerinde Ca/S mol oranı 1 ile 3 arasında yayınımlar daha yüksek gerçekleşirken, Ca/S mol oranının artması ile yatakta biriken dolomit miktarının artması ile sürücü kuvvet etkin olmakta ve daha yüksek sıyırma verimleri elde edilmektedir. N1 ve N2 fraksiyonlarındaki linyit numuneleri bu davranımı gösterirken iri tane boyutuna sahip N3 kodlu linyit numunesi özellikle 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki dolomit (D1) ile 1 ile 3 arasındaki mol oranlarında düşük sıyırma etkinliği göstermiştir (Şekil 5-31). Dolomit yoğunluğu linyitten daha yüksek olduğu için linyit tanecik büyüklüğündeki artış yüzüştür zengin rejimine karşı işleyen bir dinamiği devreye almaktadır. Bu açıdan yanmanın yatak içine doğru çekildiği bir süreç içerisinde, bu aşamada daha olumlu bir karışma anlamında bulunulduğu anlaşılmaktadır.



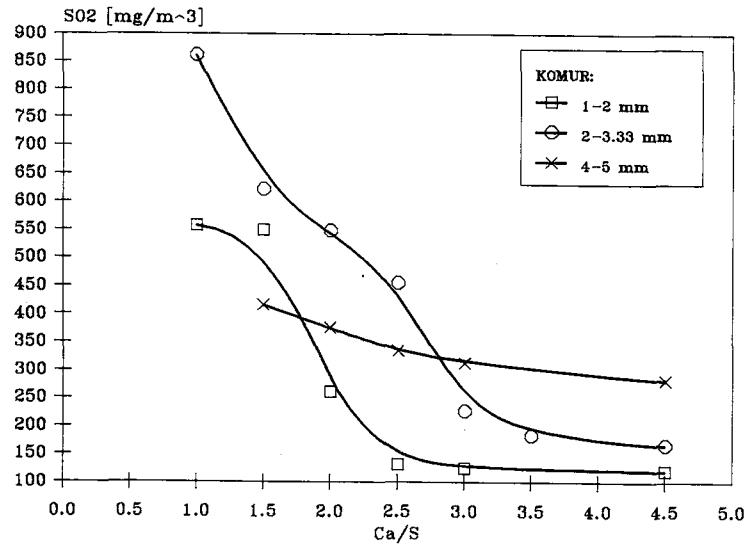
Şekil 5-31 Farklı tane boyutlarındaki linyit numunelerinin 6×10^{-4} - 10^{-3} m D1 ile Ca/S mol oranına göre SO₂ yayınımlarının sıyrılması



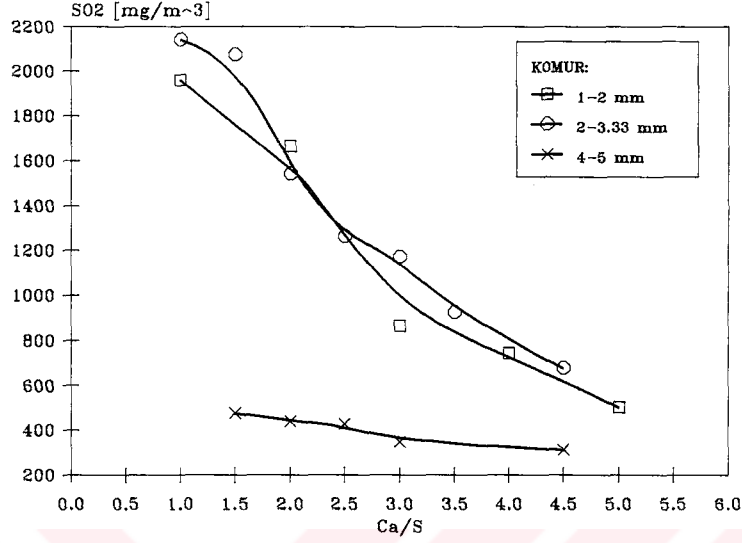
Şekil 5-32 Farklı tane boyutundaki linyit numunelerinin 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m D1 ile SO₂ yayınımlarının sıyrılması

Şekil 5-32 de N1, N2 ve N3 tane boyutlarındaki Elbistan linyitinin yakılarak 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki D2 dolomit numunesi kullanılarak oluşturduğu SO₂ yayınımlarının azaltılması ile ilgili deney sonuçları verilmiştir. N1 tane boyutundaki linyit numunesinin Ca/S mol oranı 0 ile 2.5 arasında değiştirildiğinde sıyrmanın düşük olduğu buna karşın oran 2.5 ile 4.5 arasında değiştirildiğinde yataktaki dolomit miktarının artması ile sıyrmanın daha yüksek seviyelerde gerçekleştiği

gözlenmektedir. Diğer iki linyit numunesinin davranımları benzer olup, Ca/S mol oranı 3 civarında kararlı olmak üzere genellikle düzenli bir sıyırma sağlanmaktadır. Her üç tane boyutu için de 173 g/dak. linyit ve ortalama 1.22 m/s. operasyon hızı kullanılmıştır. Şekil 5-33 de ise üç farklı tane boyutundaki linyitin 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki D2 kodlu dolomit numunesi ile SO₂ sıyırılması ile ilgili deney sonuçları verilmektedir. Deneyler ortalama 165 g/dak. linyit ve 1.22 m/s. hava beslemesi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler her üç tane boyutundaki Elbistan linyit numunelerinde Ca/S mol oranı 2.5 civarında olacak şekilde yapılan dolomit (D2) beslemesi ile etkin bir tutma eğilimi sağlandığı şeklindedir. Buna karşın Ca/S mol oranı 0 ile 4 arasında tutulan deneylerde küçük tane boyutundaki N1 ve N2 linyit numunelerinin 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki D2 dolomiti ile etkin bir şekilde SO₂ tutmanın gerçekleştirilemediği gözlenmiştir (Şekil 5-34). Aynı tane boyutlarındaki linyit numunelerinin 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki D2 dolomiti ile yakılarak SO₂ kontrolünde elde edilen sonuçlar Ca/S mol oranı 4 olana değin artırılmasına karşın etkin SO₂ sıyırmanın küçük tane boyutlarındaki linyitlerde sağlandığı saptanmıştır. N3 tane boyutundaki linyitin ise Ca/S mol oranı 1 ile 4 arasında değiştirilen küçük tane boyutundaki D2 dolomiti kullanılarak elde edilen sonuçlarla paralellik gösterdiği ve kararlı tutma sağladığı yolundadır. Deneyler 173 g/dak. linyit beslenerek ve operasyon hızı 1.22 m/s. civarında tutulmak suretiyle 1123 K (850 ° C) sıcaklıkta yürütülmüştür .



Şekil 5-33 Farklı tane boyutlarındaki linyit numunelerinin 6×10^{-4} - 10^{-3} m D2 ile SO₂ yayınımlarının sıyırılması



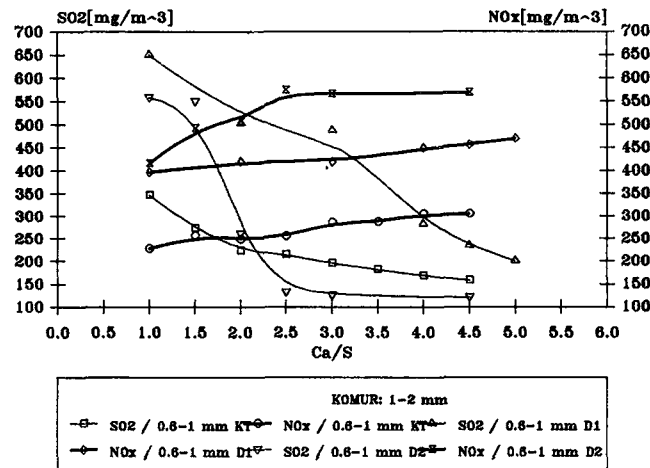
Şekil 5-34 Farklı tane boyutlarındaki linyit numunelerinin 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m D2 ile SO_2 yayınımlarının sıyırılması

5.2.5. Ca/S Mol Oranı- NO_x - SO_2 Etkileşimi

Ca/S mol oranının NO_x yayınımlarına etkisi incelendiğinde hemen hemen tüm deneylerde SO_2 yayınımlarındaki azalmaya karşın NO_x yayınımlarındaki genel bir artış gözlenmiştir (Şekil 5-35). Bunun nedeni, Lin v.ç.a.[88], ve Khan v.ç.a.[94] larının savundukları gibi SO_2 yayınımlarının azaltılması sırasında NO_x yayınımlarının özellikle kademeli yanma yapılmayan durumlarda artma eğiliminde olmaları bulgusu ile uyum göstermektedir. Ekinci[33], bunun aksini ispatlayan bulgular elde etmiştir. Son yıllardaki araştırmaların birçoğu ikincil hava beslemesinin son derece önemli olduğu şeklindedir [64]. Azot oksitleri yayınımları karşılaştırılırken yakıtların değişik olması (asfaltit, bitümlü kömür, linyit bilhassa yakıt bazlı azot kaynağı değiştiğinden önemli olabilir) önem kazanmaktadır. NO_x yayınımlarının kıyaslanması ancak reaktör geometrisi, hava fazlalık katsayısı, besleme sistemi, yakıt özellikleri ve ikincil hava beslemesinin etkilerinin göz önüne alındığı durumlarda anlamlı olmaktadır.

Her iki dolomit (D1 ve D2) sıyırma etkinlikleri incelendiğinde elde edilen sonuçlardan özellikle D2 dolomitinin beyaz mermerimsi yapıda olmasından dolayı, kızdırma kaybı ve anorganik yapılarının benzer özelliklerde olmalarına rağmen, gözenekliliğinin göreceli olarak düşük olduğudur. Fakat sıyırma etkinliğinin düşük

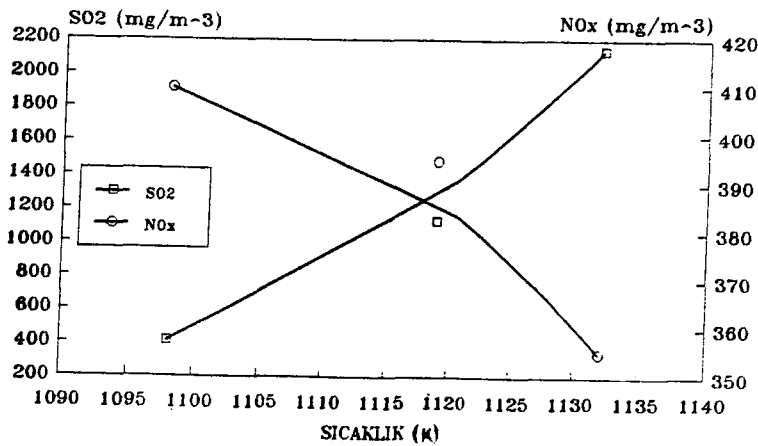
olduğu düşünölen D2 dolomit numunesi ile farklı yapıdaki D1 dolomit numunelerinin kalsine edildikten sonra yapılan gözeneklilik analizlerinden de anlaşılabileceği gibi özellikle büyük tane boyutundaki (10^{-3} - 1.25×10^{-3} m) dolomit numunelerinin yatakta kalma zamanına bağılı olarak etkinliklerinin artması ve yine ufalanmaya bağılı olarak SO_2 tutma etkinlikleri açısından özellikle Ca/S mol oranı 3.5 un üzerinde farklılık göstermemelerine neden olmaktadır (Tablo 3-6 ve Tablo 3-7). Dolomit tane boyutunun değışmesi ile özellikle kalsine olmuş numunelerde gözenekliliğın büyük farklılık gösterdiği göze çarpmaktadır. Kireçtaşı ve dolomit karakterizasyon çalışmalarında birçok araştırmacı küçük tane boyutuna sahip olan numunelerin özgül yüzey alanlarının artması ile SO_2 sıyırma da daha etkin olduklarını saptamışlardır [60] . Ufalanmanın etkisi ile sürüklenmeye bağılı olarak kireçtaşı ve dolomitin serbest bölgede SO_2 tutmada etkin oldukları bilinmektedir [60] . Porozite ölçümleri, 6×10^{-4} - 10^{-3} m ve 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşlarında beklenenin aksine iri tane boyutundaki kireçtaşı numunesinin gözenekliliğının daha yüksek olduğunu göstermektedir (Tablo 3-7). Bunun temel nedeni, kullanılan kireçtaşının kırılğan bir yapıda olmasından dolayı ısısal şoka bağılı olarak ufalanma sonucu toplam yüzey alanındaki artmaya bağlanabilir. Nitekim, iri taneli yaş ve kalsine kireçtaşı numunesinin elek analiz sonuçları yaş numunenin % 75 inin 10^{-3} m den büyük olduğunu , kalsine numunede bu oranın % 60 seviyelerine düştüğünü ortaya koymaktadır. Arada % 15 civarında bir kayıp söz konusudur. Bu azalmanın ufalanmaya bağılı olduğu düşünölmektedir. Ufalanma oranı, kireçtaşı numunesinin yatakta kalma zamanına, operasyon hızına ve yatak geometrisine bağılı olarak artacaktır. Ufalanmış taneciklerin serbest bölgede geçirdikleri süreçte etkin SO_2 tuttıkları bilinmektedir [95].



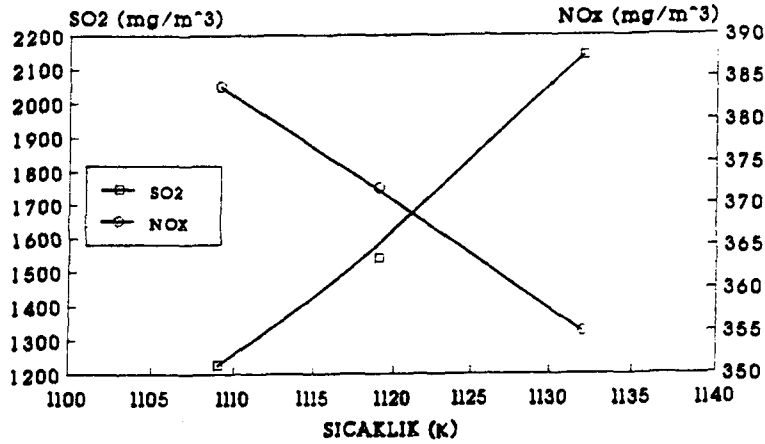
Şekil 5-35 Farklı sorbentlerin kullanılması durumunda SO_2 - NO_x yayınımlarının Ca/S mol oranına göre değışimleri

5.2.6. Sıcaklığın SO₂ ve NO_x Yayınımı Üzerindeki Etkisi

Deneyler sırasında gözlenen önemli olaylardan birisi de sıcaklığın sabit tutulmadığı bir dizi deney boyunca sıcaklığın artırılmasının NO_x yayınının düşmesine neden olması olmuştur. Şekil 5-36 da görüldüğü gibi D2 dolomitinin sorbent olarak kullanıldığı (Ca/S=3) deneylerde 225 g/dak. linyit besleme debisi ile yürütülen yanma sonucu oluşan SO₂ miktarları azaltılmaya çalışılmış, 1098 K (825 °C) de 410 mg/m³ seviyelerinde ölçülen NO_x yayını değeri 1119 K (846 °C) da 395 mg/m³, 1132 K (859 °C) da ise 355 mg/m³ değerine düşmüştür. Operasyon hızı 1.22 m/s. civarında tutulan deneylerde SO₂ yayınımları 1098 K de 410 mg/m³, 1119 K de 1130 mg/m³, 1132 K (859 °C) de ise 2139 mg/m³ olarak ölçülmüştür. Burada sıcaklığın doğrudan etkisinin yanabilir kükürt miktarına bağlı olarak SO₂ yayınımlarını arttırdığını söyleyebilmek mümkündür. Sıcaklığın azalması durumunda ise NO_x ve SO₂ yayınımlar değeri ters yönde etkilenmektedirler. Şekil 5-37 de verildiği şekilde aktif yatak sıcaklığının 1132 K (859 °C) den 1119 K (846 °C) ye düşürülmesi sırasında izlenen NO_x yayınımlar değeri 355 mg/m³ den 372 mg/m³ e çıkarken sıcaklık 1109 K (836 °C) e düşürüldüğünde 384 mg/m³ olarak ölçülmektedir. Aynı süreçte izlenen SO₂ yayınımlar değeri 1132 K de 2139 mg/m³ iken 1109 K de 1226 mg/m³ e düşmüştür. Dolayısı ile, Khan v.ç.a. [94] ile Lin v.ç.a.[88] bulguları ile paralellik gösteren bu sonuçlar SO₂ yayınımlarındaki artışın NO_x yayınımlarında azalmaya neden olduğu ve bunun aksine SO₂ tutma veriminin artması ile NO_x yayınımlarında artma gözlemlendiği şeklindedir. Sıcaklığın NO_x yayınımları üzerindeki etkisi ise Tatebayashi v.ç.a.[56], Botting v.ç.a.[80] ve Marshall v.ç.a.[64] ile uyum içinde olup sıcaklık artışı ile NO_x yayınımlarının artması ile açıklanabilmektedir. Elde edilen sonuçlar Hansen v.ç.a.[78] ların sonuçları ile uyum sağlamamaktadır. Adı geçen araştırmacılar, indirgen şartların sağlandığı hallerde sıcaklıkların artışı ile NO_x yayınımlarının azaltılabileceği fikrini savunmaktadırlar.



Şekil 5-36 Sıcaklığın artırılmasının SO₂ ve NO_x yayınımları üzerindeki etkisi



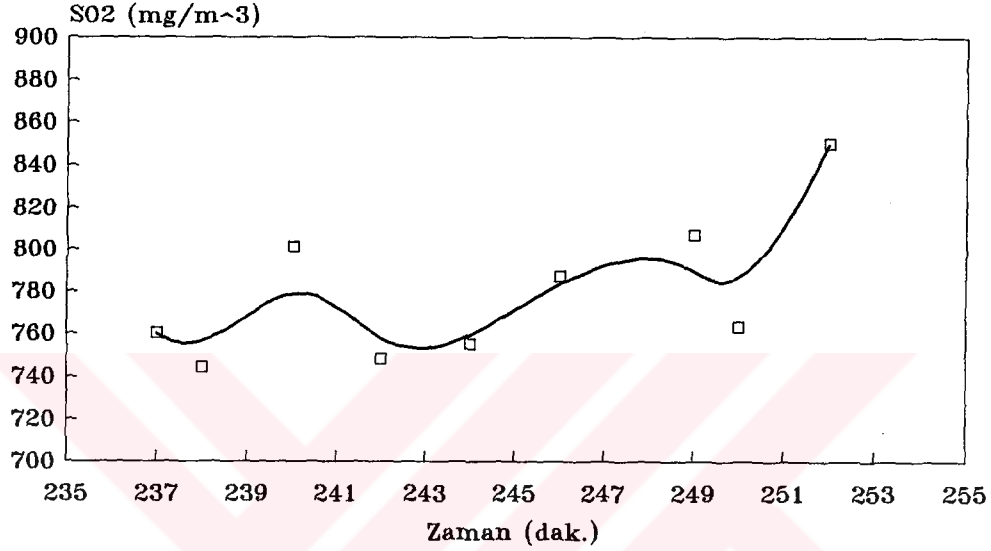
Şekil 5-37 Sıcaklığın azaltılmasının SO₂ ve NO_x yayınımları üzerindeki etkisi

5.3. Trona'nın SO₂ Sıyırma Üzerindeki Etkisi

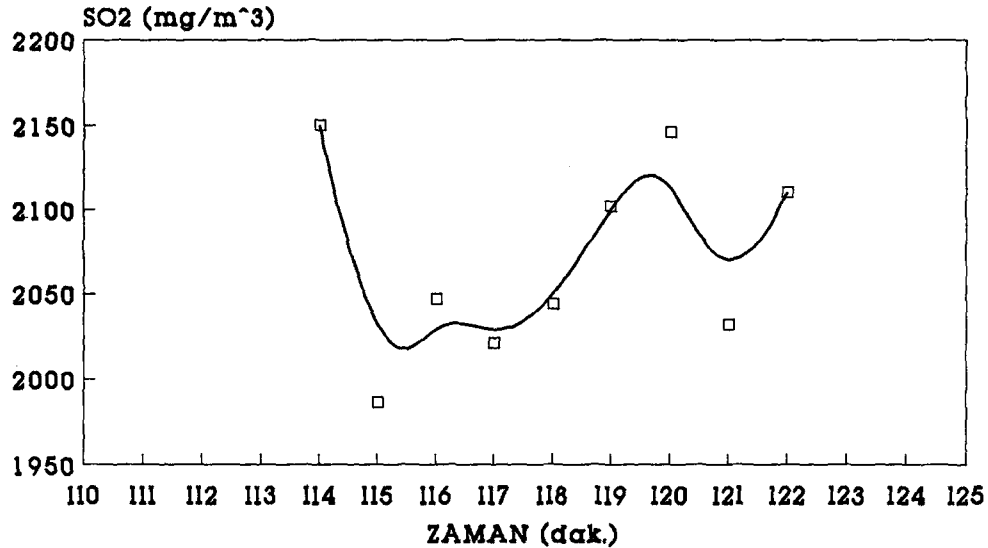
Trona mineralinin (NaHCO_3) SO₂ sıyırma üzerindeki etkisi uzun yıllardan beri bilinmektedir [91,96]. Bununla birlikte sabit veya akışkan yataklı sistemlerde doğrudan kullanılmasından çok , baca gazlarından SO₂ sıyırılması uygulamaları ve kinetik çalışmalarında kullanılması daha yaygındır [49,59,97,98]. Trona 473-513 K (200-250 ° C) sıcaklıklarda optimum bir gözenekliliğe sahip olmaktadır. 1138 K (865 °C) civarında ergimektedir. Bu özelliklerinden dolayı yüksek operasyon sıcaklıklarında sorun yarattığından akışkan yatak uygulamalarında pek kullanılmamıştır. Bu çalışmada trona bir sorbent olarak SO₂ tutulması amacı ile kullanımı sınırlı olmuştur. N1 tane boyutundaki Elbistan linyitinin 6×10^{-4} - 10^{-3} m ve 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutlarındaki trona ile reaksiyona girmesi sonucu elde edilen SO₂ yayınım değerleri Şekil 5-38 ve 5-39 da verilmektedir. Dakikada 204 gram linyit beslemesi ve 1.35 m/s. hava hızı ile 1088-1093 K (815-820 °C) arasında yakılan linyitin ortaya çıkardığı SO₂ yayınımları, 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki trona ile tutulmaya çalışılmıştır. Trona numunesi kalsine edildiğinde 473 K (200 °C) civarında aktif sodaya (Na_2CO_3) dönüşmektedir. Aktif soda SO₂ ile reaksiyona girerek Na_2SO_3 ve Na_2SO_4 dönüşmektedir. Bu reaksiyon 333 K (60 °C) üzerinde gerçekleşmektedir. Tronanın kullanılmasında ortaya çıkan en önemli güçlük akışkan yatakta biriken sodyum miktarının zamanla artması ve aglomerasyon eğilimini artırmasıdır. Şekil 5-39 da N1 tane boyutundaki linyitin iri taneli trona kullanılarak gerçekleştirilen deney sonuçları verilmektedir. Zamana bağlı olarak sıyırmanın oldukça düşük seviyelerde gerçekleştiği göze çarpmaktadır. Aglomerasyon ile sonuçlanan deneylerde dikkati çeken nokta, özellikle aktif yatak sıcaklıklarının hızlı bir şekilde

artması ve hidrodinamik özelliklerin bozulmasıdır. Hidrodinamik yapının bozulması zaman içinde aglomerasyon riskini gittikçe arttırmaktadır. Elektron mikrograflarından da görülebileceği gibi bu tür durumlarda Elbistan linyitinin bünyesinde bulunan yüksek CaO miktarı Ca/Na oranları dengelenmekte ve aglomerasyon süreci gecikmektedir. Kuartz kumun yatak malzemesi olarak kullanıldığı deneylerde taramalı elektron mikroskobu ile birlikte yürütülen X ışınları analizi büyük zorluklar içinde yapılabilmektedir. Bunun temel nedeni kuartz kumun aktif sodanın ergime sıcaklığına ulaşması ile sodyum-kalsiyum silikatların oluşmasıdır. Bu yapı, soda-kireç camı adı verilen yapıyı oluşturmakta ve kumun içinde yer alarak yapışmayı sağlayan sodyumun taranmasını zorlaştırmakta , hatta imkansız kılmaktadır. Şekil 5-40 da verilen mikrografta görülebileceği gibi çubuklu yapıdaki kuartz kumunda hakim olan SiO_2 yanında ergimiş Na_2CO_3 yer almaktadır. Fiziksel olarak yataktan alınan numunelerin büyük kısmının deniz kestanesi yapısında olduğu ve kumun, sodyum ile küle yapışmış bir şekilde bulunduğu gözlenmiştir. Yapıda 30 μm çapında gözeneklere rastlanmaktadır. Demir oksit ve alüminosilikatların oluşması ile yatak malzemesinde yapışma görülebileceği ve akışkanlaşmanın sona erebileceği birçok araştırmacılar tarafından bildirilmektedir [99]. Sisteme kireçtaşı eklenmesinin yukarıdaki durumu pek etkilemediği de vurgulanmaktadır. Yüksek sodyum ve yüksek kükürt içeren düşük kaliteli linyitlerde organik olarak bağlanan kalsiyum, magnezyum ve sodyumun bir kısmının asitte çözünmeyen bileşiklere dönüşebileceği de yine literatürde belirtilmektedir [100]. Bu durumun çeşitli alüminosilikatların oluşmasında kaynaklandığı belirtilmektedir. Alüminosilikatlar, düşük sıcaklıklarda ergiyen bileşiklerdir. Dolayısı ile Na, Ca ve Mg dan dolayı kuartz taneciklerde yapışma oluşmaktadır. Daha önce sözü edilen çubuklu yapı için elektron mikroskop ile birlikte yürütülen X ışınları analizi ile taranan bölgede Na aranmış fakat son derece zor bir analiz sonucunda sodyum içeren bölge saptanmıştır. Burada zorluğu oluşturan temel neden X ışınlarının numunenin taranan yüzeyinde sadece birkaç mikron derine inebilmesi ile açıklanabilmektedir. X ışınları analizi sonuçları bu bölgenin % 42.35 Na_2O , % 20.84 CaO , % 0.43 FeO ve % 34.92 SO_3 içerdiğini göstermektedir (Şekil 5-41) . Bu sonuçlardan da anlaşılabileceği gibi aglomerasyonun önlenememesine rağmen deney sırasında SO_2 nin tutulduğu ve işlemde sodyumun belirgin bir payının olabileceği düşünülmektedir. Elektron mikroskop sonuçlarından görülebileceği gibi, Na_2O oranı beklenmedik ölçüde yüksek olmuştur. Bununla birlikte , küle bulunan Na, K ve Ca, yatak sıcaklığı ve dolayısı ile kalsinasyon sıcaklığını düşürmektedirler. Dawson v.ç.a [99] yapışkan özellikteki kütlenin petrografik analizlerinin ergime sonucunda mineral yapıda bazı kayıplar ortaya çıkardığını, fakat bunun o kadar yaygın olmadığını ortaya koymuşlardır. Bu araştırmacılar, feldspar parçacıklarının sodyum ve potasyum içeren ve cama benzeyen ergimiş bir yapıda bağlayıcı bir malzeme

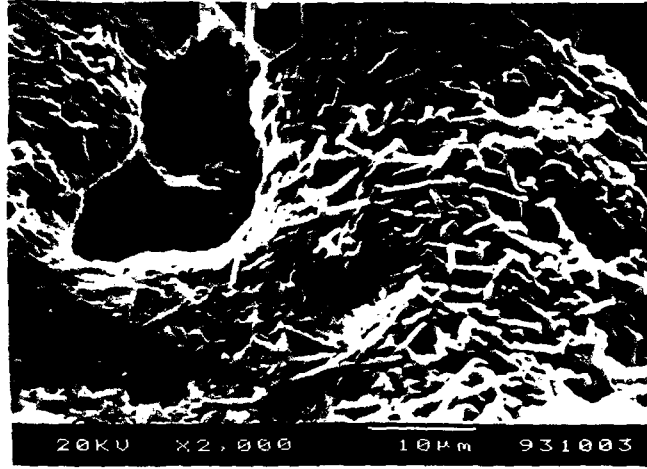
oluşturduklarını saptamışlardır. Yanma sıcaklıkları, Na-feldspar olarak bilinen albitin ve K-feldspar ortoklasın ergime noktalarının - (albit için 1388-1393 K (1115-1120°C) ve ortoklasın ise 1400 K nin üstünde olduğu bilinmektedir)- altında tutulmaktadır. Buna karşın bu minerallerin yanma sıcaklığında ergimesi, ortamda bulunan katalizörlerin ergime sıcaklığını düşürmesi veya lokalize sıcaklık artımlarının aglomerasyon sonrasında ergime sıcaklıkları seviyesine ulaşması ile açıklanmaktadır.



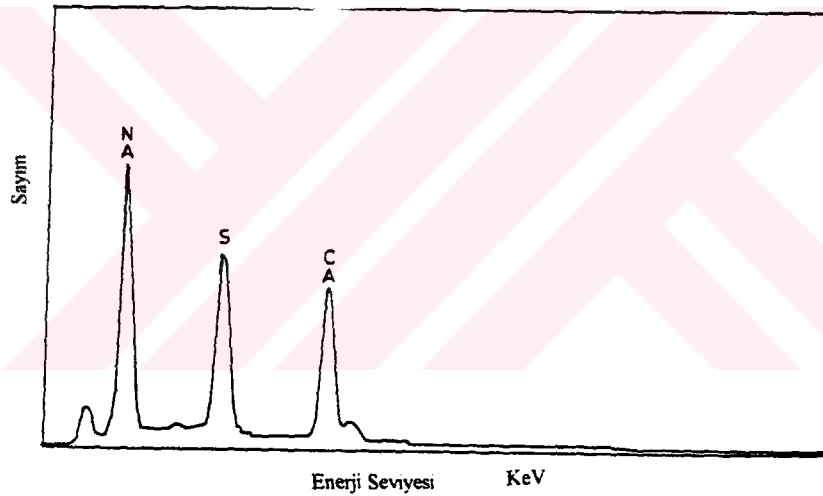
Şekil 5-38 Trona kullanımında SO₂ yayınımlarının zamanla değişimi



Şekil 5-39 N1 linyiti- 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m aktif soda sistemi ile elde edilen SO₂ yayınımlarının değerleri (1073 K, 1.22 m/s. ve 186 g./dak. linyit besleme debisi)



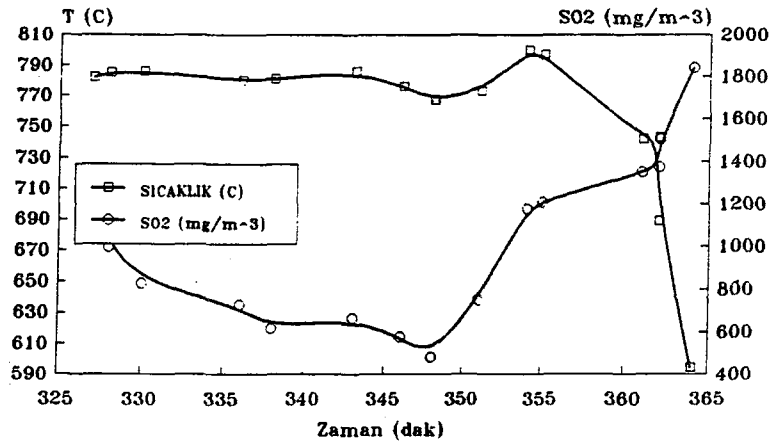
Şekil 5-40 Soda- kireç camı adı verilen yapının SEM mikrografi (2000 büyütme)



Şekil 5-41 Soda- kireç camı oluşturan bölgenin EDX analizi sonuçları

Aktif soda ile yürütülen deneylerde gözönüne alınması gereken bir başka nokta da deneysel ve termodinamik verilere dayanılarak bir katı-katı tepkimesi olan wollastonit [CaSiO_3] oluşumunun CaCO_3 ile SiO_2 arasında meydana geldiği ve CO_2 mol fraksiyonunun etkisi ile 943 K de (670°C) gerçekleşmesi beklenirken 723 K (450°C) de gerçekleşen bir tepkime olmasıdır. Mazza v.ç.a [101] yataktaki Ca un uçucu küldeki alüminosilikat ile kristal Ca-alüminosilikatı Dawson v.ç.a [99] ise yüksek sodyum içeren linyitlerin yakılması sırasında kalsine kireçtaşının kuartz kum ile tepkimeye girerek kalsiyum silikatı oluşturdıklarını belirtmişlerdir. Buradaki yapıda da benzer durumları görmek mümkündür. X ışınları kırınımı yöntemi ile analiz edilen

kum-kireçtaşı-soda üçlüsü CaSiO_3 içermektedir. Elbistan linyitinin yapısındaki anorganik maddenin kül analizi ile saptanan Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarları CaSiO_3 yapısını etkilemekte ve kalsiyum-alüminyum silikatları oluşturmaktadır. Burada diğer bir önemli nokta Dawson v.ç.a [99] tarafından saptanan $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ oranıdır. Bu oranın 0.2 ile 10 arasında olması durumunda kömür külünün ergime sıcaklığı önemli ölçüde düşürülebilmektedir. Bu oranın 0.3 ile 3 arasında olması ile daha da düşük sıcaklıklar elde edilebilmektedir. Ayrıca Haji-Sulaiman v.ç.a [102] kireçtaşı ve dolomit bünyesindeki Fe_2O_3 ve NaCl miktarlarının artması ile sinterleşme eğiliminin arttığını saptamışlardır. Alfvors v.ç.a [87] sinterleşmenin yüzey alanını azalttığını ve bunun da porozitede düşmeye neden olduğunu vurgulamışlardır. Bu çalışmada kullanılan dolomit ve kireçtaşı numuneleri incelendiğinde, Tablo 3-4 de görülebileceği gibi D1 ve D2 dolomitlerinin Fe_2O_3 içeriklerinin sırası ile % 0.036 ve % 0.087 olduğu ve optimum Fe_2O_3 miktarı olarak belirtilen % 0.5 (ağırlıkça) değerinin altında bulunduğu görülmektedir. Kireçtaşı numunesi için durum farklıdır ve Fe_2O_3 içeriği % 1.93 gibi oldukça yüksek bir değerdedir. Ancak kırma sırasında kırıcıların fiziksel aşınması sonucunda bir miktar elementel demirin kireçtaşına katılmış olabileceğini gözönünde bulundurmak gerekir. Şekil 5-42 de N2 tane boyutundaki linyitin yarattığı SO_2 yayınımasının iri tane boyutlu aktif soda ile tutulması sonuçları verilmektedir. 202 g/dak. linyit besleme debisi ve 1.28 m/s. operasyon hızı ile gerçekleştirilen deneyde 1058 ile 1073 K (785-800 °C) arasında tutulan aktif yatak sıcaklığında SO_2 derişimi 480 mg/m^3 seviyelerinde izlenmiştir. Buna karşın NO_x değerleri 510 mg/m^3 civarındadır. N1 tane boyutundaki Elbistan linyit numunesinin 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki aktif soda ile SO_2 den arındırılması sırasında Ca/Na oranları kontrol edilmeye çalışılmasına rağmen hidrodinamik dengenin büyük çapta taşınma ve ufalanmaya bağlı olarak bozulması ile aglomerasyon gözlenmiştir.



Şekil 5-42 N2 linyit- 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m aktif soda sistemi ile SO_2 sıyırılması sonuçları (1058-1073 K, 1.28 m/s., 202g/dak. linyit besleme debisi)

5.4. Kararsız Hal Deneyleri

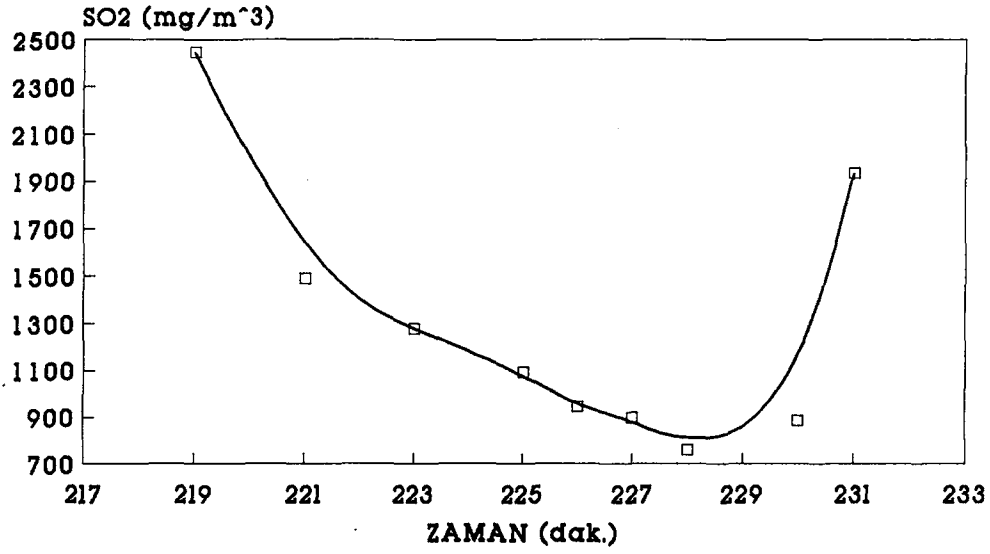
Akışkan yataklı yakma sistemlerinin geleneksel sistemlere tercih edilmelerinin en önemli nedeni hava kirliliği açısından temiz sistemler olmalarıdır. Akışkan yataklı sistemlerde çeşitli sorbentler kullanılarak yakıt olarak kullanılan linyitin yayımladığı SO_2 ve NO_x gibi kirleticiler azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu tür sorbentlerin kullanılmalarındaki en önemli etken ucuz ve kolay bulunabilmeleri olmaktadır. Kalsiyum bazlı kireçtaşı ve dolomitin birincil kullanıma sahip oldukları sorbentlere sodyum bazlı sorbentler de eklenebilmektedir.

Sodyum bazlı sorbentlerin aglomerasyon riski göz önüne alındığında baca gazı sıyırma sistemlerinde kullanılmaları daha uygun olmaktadır.

Sorbentlerin linyit ile birlikte akışkan yatak ön ısıtma süreci bittikten ve çift yakıtla yanma aşamasında beslenmeleri çoğunlukla tercih edilen bir yöntemdir. Burada 1023 K (750 °C) sıcaklıktan itibaren linyit ile birlikte Ca/S mol oranına bağlı olarak potansiyometreden ayarlanarak bilgisayardan kontrol edilen ve beslenen sorbent , yatak sıcaklığının artması ile kalsinasyona uğramakta ve CaO'e dönüşen kireçtaşı SO_2 absorpsiyonu ile sülfatlanmakta ve bu şekilde SO_2 yayınımları hiçbir zaman maksimum değere ulaşmamaktadır. Kararsız hal deneylerinde, aktif yatak sıcaklığı 1123 K (850 °C) civarına getirildikten sonra tek yakıtla yanma aşamasında Ca/S mol oranına göre sorbent beslemesi yapılmış ve SO_2 tutma etkinliği incelenmiştir.

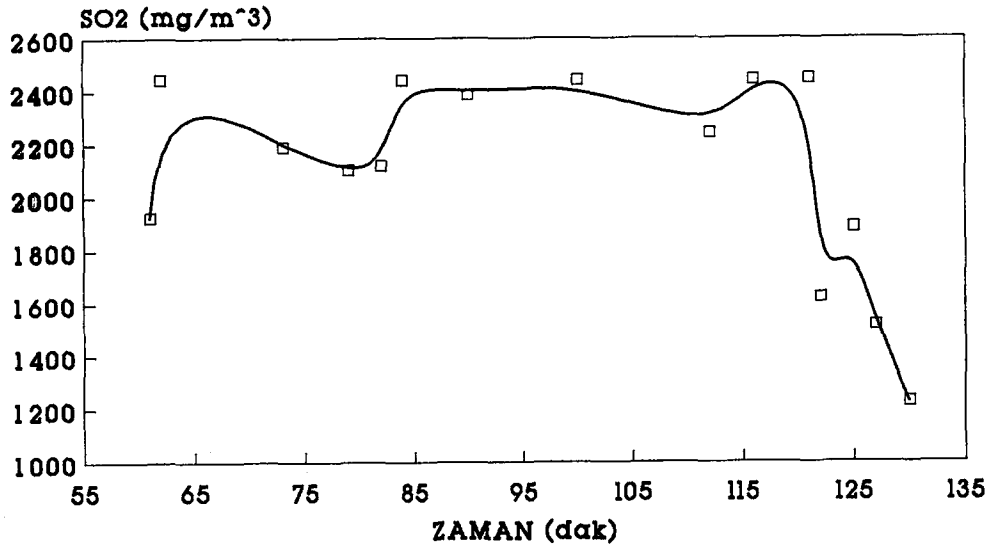
Yatağın kuartz kum ile akışkanlaştırıldığı deneylerde, aktif yatak sıcaklığı 1123 K (850 °C) civarına getirilmiş ve bu esnada N_2 tane boyutuna sahip olan Elbistan linyiti 173 g/dak , 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m tane boyutundaki yaş kireçtaşı ise 11 g/dak besleme debileri ile yatağa verilmiştir.

Yataktaki hafif bir soğuma sonrası kalsine olan kireçtaşı etkinliğini 221. dakikadan itibaren göstermeye başlamıştır. 9 dakikalık kararsız bir süreçten sonra SO_2 yayınımları 884 mg/m^3 (773.5 mg/m^3 , % 7 O_2 bazında) değerine düşürülmüştür. Bu sırada ölçülen NO_x değerleri 355 mg/m^3 (310 mg/m^3 , % 7 O_2) civarındadır. Sıcaklıklara bağlı olarak SO_2 yayılım değerleri 200 mg/m^3 seviyelerinde gerçekleşmiştir (Şekil 5-43).



Şekil 5-43 N2 linyiti- 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m kireçtaşı sistemi ile kararsız hal SO_2 sıyırma sonuçları

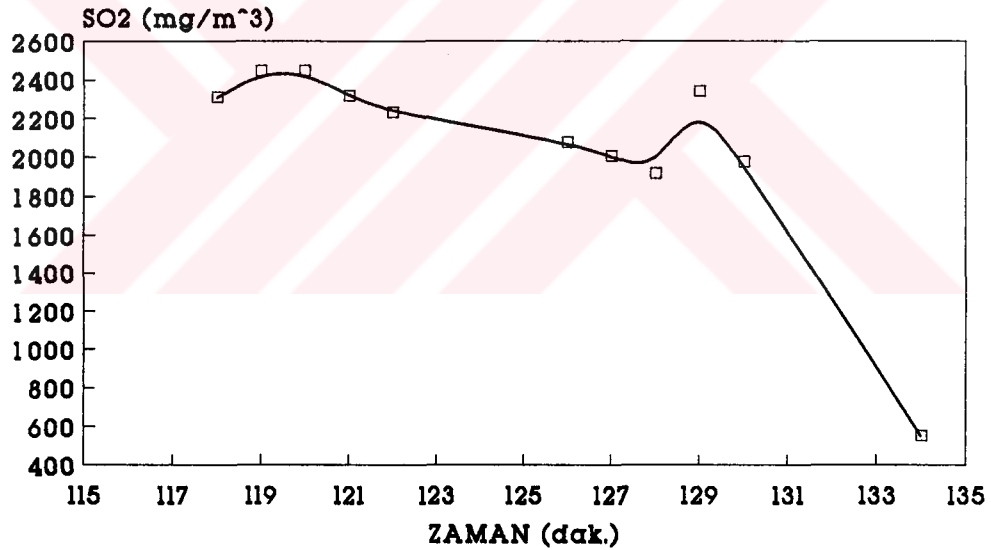
N2 tane boyutundaki Elbistan linyitinin 1123 K (850 °C) civarına kadar tek başına yakılmasının ardından D2 dolomitinin 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki fraksiyonunun 11 g/dak besleme debisi ile eklenmesi sonucu yatakta belirgin bir soğuma izlenmiş 59 ile 73. dakikalar arasında gözlenen bu sıcaklık düşüşü ve SO_2 tutma etkinliğinin olmayışı, 73. dakikadan sonra değişerek tutma etkinliği % 5.6 seviyelerinde gerçekleşmiştir. Fakat istenen tutma etkinliğine ancak 123. dakikada ulaşılabilmiş ve tutma etkinliği % 50 seviyelerinde gerçekleşmiştir(Şekil 5-44)



Şekil 5-44 N2 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m D2 dolomiti sistemi ile kararsız hal SO_2 sıyırma deney sonuçları

Aynı şartlarda N2 tane boyutundaki Elbistan linyiti ile birlikte 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki D2 dolomiti kararlı şartlarda yürütülen deney süresince çift yakıtla yanma başlatıldıktan sonra Ca/S mol oranına göre yatağa beslenmiştir. (Ca/S=2). Burada kararsız hal deneyinin aksine gözlenen en belirgin olay SO₂ yayının değerlerinin hiçbir zaman maksimum değere çıkmaması ve tek yakıtla yanmanın başlatıldığı 115. dakikadan itibaren 500 mg/m³ seviyelerinde izlenmiştir.

D1 dolomitinin, kullanıldığı kararsız hal deneylerinde son derece etkin olduğu görülmüş, bunun nedeni toplam yüzey alanının kalsinasyon sonucu büyümesi ve kırılma yapının ufalanma sonucu SO₂ tutmadaki etkinliği ile açıklanmıştır. N2 tane boyutundaki Elbistan linyitinin ortaya çıkarttığı SO₂ yayınının D1 dolomiti (6×10^{-4} - 10^{-3} m) kullanılarak tutulması 118.dakikada başlatılmış ve 16 dakika içerisinde SO₂ yayını 2444 mg/m³ den 552 mg/m³ (%7 O₂) değerine düşürülmüştür (Şekil 5-45).



Şekil 5-45 N2 linyiti- 6×10^{-4} - 10^{-3} m D1 dolomiti sistemi ile kararsız hal SO₂ sıyırma deney sonuçları

Kararsız hal deneylerinde elde edilen bir başka bulgu ise yatak malzemesinin 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı olarak seçildiği deneylerde 190 g/dak besleme debisi ile yatağa verilen N2 tane boyutundaki Elbistan linyitinin yayımladığı NO_x ların 11 g/dak besleme debisi ile yatağa beslenen kireçtaşı yardımı ile 235 mg/m³ seviyelerine düşürülmesi olmuştur. Kuartz kumunun yatak malzemesi olarak kullanıldığı deneylerin hiçbirisinde NO_x yayınımları bu

seviyelerde gerçekleşmemiştir. Bu durum Ca/S mol oranının NO_x üzerindeki etkisi ile açıklanabilmektedir. Yatak malzemesi olarak kullanılan kireçtaşı kalsine olarak CaO' e dönüşmekte ve Hammons v.ç.a. [103] belirttikleri gibi CaSO₃ e dönüşen sülfatlanmış numune NO ile reaksiyona girerek ortam şartları ile CaSO₄, elementel azot ve O₂' e parçalanabilmektedir. Bu da NO_x yayınımlarını azaltıcı bir etkidir.

5.5. Regresyon Analizleri, Model Denklemler Oluşturma Çalışmaları

Akışkan yataklı sistemlerde yapılan modelleme çalışmaları birincil kabullerden hareketle yapılmakta ve sistem parametrelerinin çokluğu ve çeşitliliği nedeni ile oldukça zor ve karmaşık bir durum göstermektedir.

Akışkan yataklı sistemlerde yapılan modelleme çalışmaları genellikle yanmanın modellenmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır [82,84,85]. Bununla birlikte kaynak taraması sırasında verildiği şekilde sorbentlere ve SO₂ ile NO_x yayınımlarına bağlı olarak da bazı çalışmalar yapılmıştır [86,87].

Birincil kabullerden hareketle yapılan çalışmaların zorluğu ve ayrı bir çalışma konusu olması nedeni ile regresyon analizleri ile Ca/S mol oranı ile SO₂ yayılım miktarları arasında bir bağıntı kurulmaya çalışılmıştır. Elde edilen model denklemin $SO_2 = K + A X + B X^2 + C X^3$ şeklinde olduğu ve X in ise Ca/S mol oranını simgelediği görülmektedir. 3 değişik linyit tane boyutu ve 3 farklı sorbent için elde edilen A, B ve C katsayıları ile korelasyon katsayıları Tablo 5-1 de verilmektedir.

Tablo 5-1 den de görüleceği gibi model denklem aynı olup sadece katsayılar değişmektedir. Korelasyon katsayıları 0.95 ile 0.99 arasında ve oldukça yüksek bulunmuştur. Model denklemleri linyit ve sorbent tane boyutları da eklenerek yapılan çoklu regresyon analizinde Tablo 5-2 den görülebileceği gibi korelasyon katsayısı 0.80 civarına düşerken beklenenin aksine, linyit tane boyutunun SO₂ yayılım ve sıyırma üzerinde etkili olduğu buna karşın sorbent tane boyutunun etkisinin olmadığı ortaya çıkmıştır. Regresyon analizi ve parametrelerin çokluğu ve çeşitliliği gözönüne alındığında bu durumun kabul edilebilirliği konusunda kuşku vardır. Bu durum model denklemin güvenilirlik değeri olan 0.649 ile de açıklanabilmektedir. Deneysel ve hesaplanan SO₂ yayılım değerlerinin karşılaştırılması ile yapılan hata analizi yukarıda belirtilen durumu doğrulayıcı sonuçlar vermiştir.

Linyit tane boyutu, Ca/S mol oranı ile yapılan regresyon analizinde sorbent tane boyutu değerlendirmeye alınmamış ve bu şekilde yapılan regresyon analizinde korelasyon katsayısı 0.73'e düşerken güvenilirlik değeri 0.54 civarında hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmalarda Ca/S mol oranının 2.5 in altında olduğu durumlarda elde edilen SO₂ değerlerinin tane boyutu ve sorbent farklılıklarına bağlı olarak değişmesi, Ca/S mol oranı 2.5 ile 5 arasında elde edilen yayılım değerlerinin model denklem oluşturma açısından daha olumlu olacağı sonucuna varılmasına neden olmuştur. Yapılan regresyon analizi kireçtaşı kullanılan deney sonuçları ile gerçekleştirilmiş fakat elde edilen korelasyon katsayısı 0.52, güvenilirlik katsayısı ise 0.27 civarında kalmıştır. Dolomitler ile gerçekleştirilen çalışmada Ca/S mol oranları 2.5 ile 5 arasında kabul edilmiş ve elde edilen korelasyon katsayısı 0.36, güvenilirlik katsayısı ise 0.13 civarında ve oldukça küçük kalmıştır.

Bütün bu sonuçlar gözönüne alınarak yapılan değerlendirmeler Ca/S mol oranı ile SO₂ arasında yapılan model denklem oluşturma çalışmalarının tek bir sorbent ve linyit tanecik boyutu için yapılmasının olumlu sonuçlar vereceği, ancak bu durumda linyit ve sorbent tanecik boyutlarının denklemde yer alabilecekleri sonucunu ortaya çıkartmıştır. Model oluşturmak için yapılacak çalışmalarda yukarıda belirtilen hususlara dikkat edilmesi gerektiği ve bu çalışmada elde edilemeyen NO_x ile sıcaklık arasındaki bağıntının da incelenmesi gerektiği düşünülmektedir.

Tablo 5-1 Ca/S mol oranı ile SO₂ arasında oluşturulan model denklem katsayıları

Sorbent	K	A	B	C	R	Linyit
1. KT1	584	-323	91	-9	0.996	N1
2. KT1	2355	-1392	299	-21	0.998	N2
3. KT1	1358	-280	-85	-20	0.992	N3
4. KT2	484	250	-134	14	0.996	N1
5. KT2	1442	986	-637	80	0.999	N2
6. KT2	1723	-1673	606	-71	0.993	N3
7. D1.1	719	-69	-11	0.71	0.980	N1
8. D1.1	548	524	-293	37	0.995	N2
9. D1.1	2438	-845	27	12	0.989	N3
10. D1.2	2079	-594	-39	17	0.987	N1
11. D1.2	302	154	-49	1.77	0.992	N2
12. D1.2	-354	1348	-609	74	0.992	N3
13. D2.1	750	-53	-133	25	0.959	N1
14. D2.1	1089	-199	-70	15	0.986	N2
15. D2.1	594	-143	15	0.09	0.999	N3
16. D2.2	2150	36	-233	32	0.981	N1
17. D2.2	2726	-464	-80	18	0.986	N2
18. D2.2	193	422	-192	23	0.983	N3

KT1: 6×10^{-4} - 10^{-3} m kireçtaşı, KT2: 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m kireçtaşı

D1.1: 6×10^{-4} - 10^{-3} m D1, D1.2: 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m D1

D2.1: 6×10^{-4} - 10^{-3} m D2, D2.2: 10^{-3} - 1.25×10^{-3} m D2

R: Korelasyon katsayısı , K: Sabit

N1, N2 ve N3 : 3 farklı linyit fraksiyonu

A, B, C : Katsayılar

Tablo 5-2 Ca/S mol oranı, linyit ve sorbent tane boyutları ile yapılan çoklu regresyon sonuçları

Katsayı	Değer
K	1637
A	133
B	-180
C	32
D	-6
E	172
F	-176
R	0.806

K: Sabit, A: Ca/S, B: $(Ca/S)^2$, C: $(Ca/S)^3$,
D: $\text{Exp}(Ca/S)$, E: Dpk^2 , F: Dpk^3 , Dpk: Linyit tane boyutu,
R: Korelasyon katsayısı.

BÖLÜM 6. GENEL SONUÇLAR

1. Termogravimetrik analizler kireçtaşı, D1 ve D2 dolomit numunelerinin kızdırma kayıpları ve kalsinasyon sıcaklıklarının belirlenmesi düşüncesi ile yürütülmüş ve deneylere ışık tutmuştur.

2. Taramalı elektron mikrografları, X ışınları incelemesi sonuçları D1 ve D2 dolomit numunelerinin belirli bir SO₂ tutma kapasitesine sahip olduklarını , kireçtaşı gözenek yapısının mikrograflarda gözlenebildiği buna karşın dolomitlerin düz bir yapıda oldukları ve kalsinasyon sıcaklığının 1223 K civarına kadar çıkartılmasına rağmen her iki dolomit numunesinde de gözenekliliğe rastlanmamıştır. Ayrıca kireçtaşı bünyesindeki Fe₂O₃ varlığının sinterleşme eğilimini arttırıcı etkisi olduğunu saptanmıştır.

3. Yığın yoğunluğu, porozite ve özellikle toplam yüzey alanları değerleri kalsine edilmiş dolomit numunelerinin orijinal numunelere oranla gözeneklerinde belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Fakat kireçtaşı numunesinde 4 m²/g gibi oldukça küçük bir yüzey alanına ulaşılabilmesi kalsine edilen numunenin cıva porozimetresine verilmesi sırasında numune sıcaklığının 823 K (550 °C) altına düşmesi ile ortam neminden etkilenerek Ca(OH)₂ oluşumuna bağlanmaktadır. Numunede Ca(OH)₂ oluşumu gözlenmiştir. Bu durumun gözenekleri kapatması SEM mikrografları ile saptanmıştır.

4. Kireçtaşı, dolomitler ve tronanın SO₂ tutma etkinliği akışkan yatak koşullarında sorbent tane boyutu ile önemli ölçüde değişmektedir. Elde edilen sonuçlardan akışkan yatak koşullarında sorbent tane boyutunun ufalanmaya bağlı olarak önemli olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte, uzun vadede, sorbentlerin farklı tane boyutlarının, SO₂ tutma etkinliği açısından ortamdaki CO₂ miktarının etkisi ile sorbentin yatakta kalma süresi ve kalsinasyonuna bağlı olarak benzer sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.

5. Elbistan linyitinin bünyesinde bulunan CaO miktarının linyit havzasında bol miktarda rastlanan kabuklu deniz hayvanlarından kaynaklandığı CaO miktarının stokiometrik olarak 1 oranında bulunduğu ve SO₂ tutma etkinliği açısından olumlu etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

6. Tronanın 523 K (250 °C) civarında maksimum bir gözenekliliğe sahip olduğu ve kalsine olarak aktif sodaya dönüştüğünde 973 K civarına kadar özelliklerini koruduğu, 1133 K (860 °C) civarında ise ergiyerek gözeneklerinin kapandığı gözlenmiştir. 1073 K (800 °C) sıcaklıkta aktif sodanın ölçülen toplam yüzey alanı 0.4749 m²/g dır. Bu değer oldukça küçüktür.

7. Tronanın yüksek sıcaklıkta SO₂ tutmada etkin olmaması ve aglomerasyon riskini ortaya çıkarmasından dolayı kireçtaşı ilavesi ile yanmanın devamlılığı sağlanmıştır. Fakat aktif sodanın SO₂ tutmada etkin olmasının temel nedeni kireçtaşı-aktif soda ikilisinin kireçtaşının aktivitesini artırıcı özelliğe sahip olması ile açıklanmaktadır.

8. 10⁻³-2x10⁻³ m tane boyutundaki Elbistan linyitinin yayımladığı SO₂, Ca/S mol oranı 0 ile 5 arasında değiştirildiğinde, 6x10⁻⁴-10⁻³ m ve 10⁻³-1.25x10⁻³ m tane boyutundaki kireçtaşı ile 150 mg/m³ seviyelerine kadar düşürülmüştür. 2x10⁻³-3.33x10⁻³ m tane boyutundaki linyitin yayımlandığı SO₂ miktarının 6x10⁻⁴-10⁻³ m tane boyutundaki kireçtaşı ile tutulması sırasında Ca/S mol oranı 4.5 için SO₂ yayını 138 mg/m³ seviyesine düşürülebilmektedir. 4x10⁻³-5x10⁻³ m tane boyutundaki Elbistan linyitinin SO₂ yayını 296 mg/m³ civarına düşürülebilmektedir. 4x10⁻³-5x10⁻³ m tane boyutundaki Elbistan linyitinin SO₂ yayını her iki tane boyutundaki kireçtaşı ile 170 mg/m³ seviyelerine düşürülmüştür. Kireçtaşı tane boyutunun, yüksek Ca/S mol oranlarında benzer etki gösterdiği, bunun nedeninin ise termal şok sonucu numunenin ufalanmasına bağlanabileceği düşünülmektedir.

9. Dolomitin SO₂ sıyırma etkinliği dolomitin yapısına ve özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan D1 dolomiti D2 dolomitinden daha etkin bir sorbenttir. Dolomitlerin ufalanma özelliği SO₂ sıyırma etkinliğini etkileyen bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durumun D2 dolomitinin D1 dolomitinden farklı mermerimsi bir yapıda oluşu ve ufalanma özelliğinin az olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte ,elektron mikroskop mikrografları ve özellikle toplam yüzey alanı sonuçları incelendiğinde yaş ve kalsine olmuş numuneler arasında özellikle tanecik boyutu büyük olan D1 numunesi lehine bir durum gözlenmiştir.

Tanecik boyutu küçük olan numune kalsine edildiğinde D1 ve D2 dolomitlerinin her ikisi için de $10 \text{ m}^2/\text{g}$ civarında toplam yüzey alanı ölçülmüştür. D2 dolomitinin büyük tane boyutunun mermerimsi yapının kırılma ve ufalanma özelliğinin düşük olması nedeni ile $7 \text{ m}^2/\text{g}$ civarında yüzey alanı saptanmıştır.

10. Yapılan çalışmalarda, özellikle SO_2 tutulması ön planda tutulmuştur. NO_x yayılım değerleri artan Ca/S mol oranına bağlı olarak artma eğiliminde olmuşlardır. Yatağın hidrodinamik şartlarının sürekli değişmesi ve Ca/S mol oranına bağlı olarak ilave edilen kireçtaşı, dolomit gibi tutuculardan dolayı yatağın davranımı NO_x yayınımlarının yüksek değerlerde seyretmesine neden olmuştur.

11. Kararsız hal deneylerinde yatağa sorbent beslemesi, aktif yatak sıcaklığının 1123 K (850°C) e ulaşmasından sonra başlanmış ve sorbent beslemesinden 90 dakika sonra SO_2 yayınımlarında azalma sağlanabilmiştir. Burada sorbentin yatakta kalma süresi, son derece önem kazanmaktadır. Ayrıca ufalanmaya bağlı olarak sorbent tane boyutu önemlidir. Kireçtaşının sorbent olarak kullanıldığı bir seri deneyde ise anorganik yapının etkisi de gözönüne alınarak 21 dakika içerisinde SO_2 yayılım değeri maksimum $1114 \text{ mg}/\text{m}^3$ seviyelerine çekilebilmiştir. Yine 32 dakika içerisinde maksimum yayılım değerinden $1358 \text{ mg}/\text{m}^3$ seviyelerine çekilen deneyler yürütülmüştür. Dolomitin sorbent olarak kullanıldığı kararsız hal deneylerinde D2 dolomiti yaklaşık 100 dakika içerisinde SO_2 sıyırma açısından etkili olamaz iken D1 dolomiti SO_2 yayılımını 15 dakika içerisinde $884 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($773.5 \text{ mg}/\text{m}^3$, %7 O_2) civarına düşürmüştür.

12. Yatak malzemesi olarak kuartz kum yerine sorbent kullanılan deneylerde yatak içi karışmanın daha iyi olduğu, kalsinasyona bağlı olarak yığın yoğunluğundaki azalmaya rağmen daha düşük operasyon hızları ile akışkanlaşmanın sağlandığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlardan NO_x yayınımlarının daha düşük seviyelerde gerçekleştiği saptanmıştır. Kireçtaşının yatak malzemesi olarak kullanıldığı deneylerde 62. dakikada ateşlenen sisteme 124. dakikada linyit beslemesi yapılmış ve 138. dakikada deney başlatılmıştır. Aktif yatak sıcaklığı 157. dakikada 1123 K (850°C) civarına ulaşmış fakat 42 dakika içerisinde SO_2 değerleri düşürülebilmiştir. 6×10^{-4} - 10^{-3} m tane boyutundaki kireçtaşı beslenmesine rağmen 45 dakika içerisinde sıyırma gerçekleştirilebilmiştir.

13. Ca/S mol oranı ile SO₂ arasında yapılan regresyon analizlerinde mol oranı 0 ile 2.5 arasında bir yaklaşım sağlanamamış fakat 2.5 ile 5 arasında deney sonuçları genellikle benzer sonuçlar vermesine karşın korelasyon katsayıları kireçtaşı ve her iki dolomit için sırasıyla 0.52 ve 0.36 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar akışkan yatak modellemesinin yanında SO₂ sıyırma ile ilgili model çalışmaların da zorluğunu göstermesi açısından önemlidir. Deney şartları ne kadar benzer tutulmaya çalışılsa da akışkan yatak içi değişimler ve parametrelerin fazlalığı ve çeşitliliği modellemeyi zor bir hale getirmektedir.

14. Ca/S mol oranı ile SO₂ yayılım miktarları arasında bir korelasyon bulmak için yürütülen çalışmalarda tek bir denklem oluşturmak mümkün olmamıştır. Kireçtaşı ve iki farklı dolomit için yürütülen çalışmalarda elde edilen sonuçlar 0 ile 5 arasındaki Ca/S mol oranları için çoklu regresyonun, diğer parametrelerin gözönüne alınmaları durumunda beklenilmeyen sonuçlar verdiğini göstermiştir. Sorbent tane boyutuna oranla linyit tane boyutunun daha önemli olduğu ve sorbent tane boyutunun sıyırma üzerinde hiç etkisi olmadığı ortaya çıkmıştır. Deneysel ve teorik sonuçlar arasında uyum sağlanamamıştır.

15. Tüm deneyler gözönüne alınarak yapılan regresyon analizlerinde herbir deney ayrı ayrı deneylendirilmiş ve elde edilen korelasyon katsayıları 0.95 ile 0.99 arasında bulunmuştur. Ca/S ile SO₂ yayınımları arasında Ca/S mol oranı 0 ile 5 arasında elde edilen model denklem $SO_2 = K + AX + BX^2 + CX^3$ şeklinde bulunmuştur. Bu denklem farklı linyit ve sorbent tane boyutları için benzer sonuçlar vermekte fakat denklem katsayıları değişmektedir.

BÖLÜM 7. ÖNERİLER

1. SO₂ tutma etkinliği incelenirken kademeli yanma yapılarak birincil ve ikincil NO_x yayınına olan etkisi incelenmelidir.
2. Serbest bölgeye NH₃ beslenerek NO_x yayınına değişimi araştırılmalıdır.
3. Dolaşımli akışkan yatak tasarımına gidilerek uçucu küllerin sisteme geri beslenmesi ve sorbent etkinliği incelenmelidir.
4. Son derece güncel olan N₂O yayınımları mevcut sisteme uygun numune alma sistemi eklenerek izlenmelidir.
5. Yatak geometrisi değiştirilerek, özellikle serbest bölge yüksekliği artırılmalı ve serbest bölgedeki SO₂ ve NO_x sürekli olarak izlenmelidir.
6. Gerçek şartlardaki sıcak akışkan yatak deneylerindeki zorluklar gözönüne alınarak simülasyon gazları bir karıştırma pompası yardımı ile sisteme beslenerek kireçtaşı ve dolomitin sıyırma etkinlikleri incelenmelidir.
7. Kömürün anorganik yapısına bağlı olarak külün SO₂ sıyırma etkinliği incelenmelidir.
8. Çeşitli analiz teknikleri kullanılarak akışkan yatakta oluşan aglomerasyon riski ve aglomerasyonu yaratan koşullar incelenmelidir.
9. Özellikle seri halde çalışan siklonlar arasındaki yatay hatlarda meydana gelen uçucu kül ve özellikle sorbent birikimleri önlenmelidir.
10. 18.56 g SO₂/10⁶ kal ile oldukça yüksek SO₂ yayınına sahip olan Elbistan linyitinin ortaya çıkaracağı katı atık problemine çözümler bulunmalı ve jipsin değerlendirilmesi yoluna gidilmelidir.

11. Ülkemizin farklı yörelerine ait sorbentlere yönelik karakterizasyon çalışmaları gözönüne alınarak optimum sıyırma etkinliğine sahip kireçtaşı ve dolomit numuneleri seçilerek linyit rezervine yakınlık ve ekonomikliği düşünülerek çalışmalar planlanmalıdır [104].



KAYNAKÇA

- [1] YEAGER, E. K., Coal in the 21th Century , Energy World, No.179, (1990).
- [2] BAUGE S., Quel Avenir Pour L'Energie Charbon?,Les Realites Industrielles, pp.15-20, Janvier (1992).
- [3] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ,Genel Enerji Planlaması Çalışmalarının İlk Sonuçları, Türkiye 5.Enerji Kongresi, Ankara , (1990).
- [4] MTA, Türkiye Kömür Envanteri, MTA Yayın No 171, Ankara, (1978).
- [5] EKİNCİ, E. , OKUTAN, H., Yanmadan Kaynaklanan Hava Kirliliği, Hava Kirliliği Okulu, Kimya Mühendisler Odası İstanbul Şubesi, (1991).
- [6] ATAĞÜL, H., ÖNER, G.,YARDIM, M.F., Fluidised Bed Combustion Research in Turkey, Energy Sources, 15, pp.1-15, (1993).
- [7] EKİNCİ, E., Fluidised Bed Combustion of Coals and Environmental Protection, Clean Utilization of Coal, Ed. by, YÜRÜM, Y., pp.247-259, Kluwer Ac. Publishers., (1992).
- [8] MADRALI, E. Ş., ESKİKAYA, T., KURAL, O., Akışkan Yataklı Sistemlerin Ülkemizdeki Durumu, İkinci Yanma Sempozyumu, İ.T.Ü. Makina Fakültesi, İstanbul, (1989).
- [9] ÇİTİROĞLU, M., YARDIM, M. F., EKİNCİ, E., Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in Cyclone and Bottom Ashes in a Fluidised Bed Combustor, Proc. of the 5th Conference on Fluidised Bed Combustion, pp. 311-318, London, (1991).
- [10] KUNIL, D.,LEVENSPIEL, O., Fluidisation Engineering, R.E. Krieger Publishing Company, New York, (1977).
- [11] DAVIDSON, J.E., HARRISON, D., Fluidised Particles, Cambridge University Press,(1963).
- [12] ZENZ, F.A., OTHMER, D.F., Fluidization and Fluid Particle Systems, Reinhold,(1960).
- [13] FAN, L.S., Gas-Liquid-Solid Fluidisation Engineering, Butterworth Publishers,(1989).

- [14] DAVIDSON, J.F., Fluidised Combustion: A Review of Papers on Fundamentals and New Ideas, Journal of the Institute of Energy, pp.178-186, (1989).
- [15] YATES, J.G., Fundamentals of Fluidised Bed Chemical Processes, Butterworths, London,(1983).
- [16] JAHNIG, C.E., CAMPBELL, D.L., MARTIN, H.Z, History of Fluidized Solids Development of Exxon, in Fluidization, Eds. GRACE, J. R., MATSEN J. M. , Plenum Press, New York, (1980).
- [17] CAMPBELL,E.K.,DAVIDSON,J.F., The Combustion of Coal in Fluidised Beds , Institute of Fuel Symp. Series, No.1, Fluidised Combustion, pp. A21-A29, London, (1975).
- [18] BEER, J.M., Advanced Combustion Methods for Low-Grade Coal Utilization, 7th. Symp. on Low- Grade Fuels, Pub. by Tech. Res. Centre, Vol.7 . pp. 83-112, Finland, (1989).
- [19] RUISARD, B.E., HARWAY, J.E., Unique Advantages of Fluidised Beds for Pollution Control and Clean Energy , No. 147, Vol.71, pp. 141-147, (1972).
- [20] COOK, M.J., HODGKINSON, N., The Fluidised Combustion of Low-Grade Material in Fluidised Beds, AIChE Symp. Ser., 73, 161. pp. 108-114., (1977).
- [21] GIBSON, J., Combustion of Fuels of Low Grade Calorific Value in Fluidised Beds, 10 th World Mining Congress, İstanbul, (1979).
- [22] ATAKÜL, H., Çan Bölgesi Linyitlerinin Akışkan Yatak Yanma Sürecindeki Davranımı, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul, (1986).
- [23] BAO. Y.L., YAND, M.X., YANG, L., CHIN, Y.K., Burning Lignite in Fluidised Boilers, Fluidised Bed Combustion and Applied Technology, The First Int. Symp. Paper 3-63, Ed. by SCHWIEGER, R.G., Hemisphere Pub.Corp., Mc.Graw Hill Pub. Corp., New York, (1984).
- [24] WILLIAMS, P.F., Introductory Lecture, Energy from Waste, Short Course, University of Leeds, (1988).
- [25] EKİNCİ, E., Katı Atıkların Yakılması, Katı Atık Tanımı, Toplanması ve Uzaklaştırılması Kurs Notları, KAKAD, (1990).
- [26] AVEDESİAN, M.M, DAVIDSON, J.F., Combustion of Carbon Particles in a Fluidised Bed, Trans. Instn. Chem. Engrs, 51, pp.121-131, (1973).

- [27] BEER, J.M., The Fluidised Bed Combustion of Coal, 16th International Symposium on Combustion, Cambridge, (1976).
- [28] HIGHLEY, J., The Design and Control of Fluidised Bed Fired Boilers, Journal of the Institute of Energy, December, pp. 208-216, (1980).
- [29] BEER, J. M., MASSIMILLA, L. , SAROFIM, A. F., Fluidised Bed Combustion: The Effect of Coal Type on Carbon Elutriation, Fluidised Bed Combustion: System and Applications, IV-5, London, November, (1980).
- [30] YATES, J.G., WALKER, P.R., Particle Temperature in a Fluidised Bed Combustor, Fluidization, Ed. by , DAVIDSON, J. F. and KEAIRNS , O. L. , Cambridge University Press, (1978).
- [31] PRASAD, R.V.R., Combustion of High Ash Indian Coals, Institute of Fuel Symp. Ser. No. 1, Fluidised Combustion, Paper C1, London, (1975).
- [32] STUBINGTON, J.F., Comparison of Techniques for Measuring the Temperature of Char Particles Burning in a Fluidised Bed, Chem. Eng. Res. Des., 63, pp. 241-249, July, (1985).
- [33] EKİNCİ, E., Akışkan Yatakta Avgamasya Asfaltinin Yakılması, Doçentlik Tezi, İTÜ, İstanbul, Mart, (1981).
- [34] BERMAN, I.M, Fluidised Bed Combustion System, Progress and Outlook, Power Engineering, pp. 46-55, November, (1979).
- [35] CHAKRABORTY, R.K., HOWARD, J.R., Burning Rates and Temperatures of Carbon Particles in a Shallow Fluidised-Bed Combustor, J. Inst.of Fuel, 51, pp. 120-124, December, (1978).
- [36] Mc.KENZI, E.C., Burning Coal in Fluidised Beds, Chemical Engineering, pp. 116-127, August, (1978).
- [37] LA NAUZE, R.D., MINCHENER, A.J., ROGERS, E.A., STRINGER, J., High Temperature Corrosion in Fluidised Bed Combustors, J. Inst. of Energy, pp.79-85, June, (1979).
- [38] HOWARD, J.R., Fluidised Bed Technology, Principles and Applications, Adam Hilger, Bristol, (1989).
- [39] DAVIDSON, J.R., CLIFT, R., HARRISON, D., Fluidization, 2nd Edition, Academic Press, (1985).

- [40] STUBINGTON, J.F., The Role of Coal Volatiles in Fluidised Bed Combustion, Journal of the Institute of Energy, pp. 191-195, December, (1980).
- [41] PILLAI, K.K., Devolatilization and Combustion of Large Coal Particles in a Fluidized Bed, Journal of the Institute of Energy, pp. 3-7, March, (1985).
- [42] BUCHTELA, G., HOFBAUER, H., Mechanism of NO and N₂O Formation and Destruction in Fluidised Bed Combustion, Proc. of the Institute of Energy's 5th Int. Fluidised Bed Combustion Conference, pp. 213-220, London, December, (1991).
- [43] SLACK, A.V., Control of Pollution from Combustion Processes, Chemistry of Coal Utilization, Ed. by., ELLIOTT, M.A., Second Supplementary Volume, pp. 1447-1490, John Wiley and Sons Inc., (1981).
- [44] LEMPEREUR, J.D., Les Pluies Tournent Vraiment a' L'aigre, Science et Vie, No.7778, Juin, (1982).
- [45] GÜRÜZ, K., ÇELEBİ, S., Sulphur Removal by Pyrolysis of Turkish Lignites, Fuel, Vol.58, pp. 893-895, December, (1979).
- [46] TEKİN, A., EKİNCİ, E., Sulphur in Turkish Lignites and Possible Remedies, Int. Journal of Env. Studies, Vol 34, pp. 105-114, (1989).
- [47] LEES, B., Problems and Policies Associated with Acid Rain, Energy World, August-September, (1984).
- [48] ELSWORTH, S., Acid Rain, Pluto Press, London, (1984).
- [49] KINAYYIĞİT, G., Kömür Yakılan Termik Santrallerde Kükürtdioksit Emisyonunun Kontrolü, Uluslararası Çevre Sorunları Sempozyumu Tebliğleri, Ed. CURI, K., İstanbul Marmara Rotary Club, pp. 161-175, (1991).
- [50] TEK Çayırhan Santralinde Yapılan İnceleme ve Özel Görüşmeler, Çayırhan, (1992).
- [51] KÜÇÜKBAYRAK, S., Farklı Kükürt Giderme Yöntemlerinin Çeşitli Türk Linyitlerine Uygulanması, Doktora Tezi, İTÜ, (1984).
- [52] HAMDULLAHPUR, F., Fluidised Bed Combustion Modelling, Seminar at İ.T.Ü., (1990).

- [53] CHOPRA, O. K., SMITH, G. W., LENC, J. F. , SHEARER, J. A., MYLES, K. M., JOHNSON, I., Effects of Salt Treatment of Limestone on Sulfation and on the Corrosion Behavior of Materials in AFBC Systems, Proc. of the 6th Int. Conf. on FBC, pp. 496-505, Atlanta, (1980).
- [54] RAJAN, R., KRISHNAN R., WEN, Y.C., Simulation of Fluidised Bed Combustors, Part 2, Coal Devolatilization and Sulphur Oxides Retention, AIChE Symposium Series, No.176, Vol.74, (1978).
- [55] WILLIAMS, P.T., GIBBS, M.B., The Emission of SO₂ and SO₃ from Fluidized Beds, Symp.on Fluidisation, Japan, June,(1983).
- [56] TATEBAYASHI, J., OKADA, Y., YANA, K., IKEDA, S., Simultaneous NO_x and SO₂ Emission Reduction with Fluidised Bed Combustion, Proc. of the Sixth Int. Conf.on FBC, Vol III , pp. 986-996, August, (1980).
- [57] SPITSBERGEN, U., VAN WERVEN, W.C., KASE., H.A., Proc. of Fund. of Coal Combustion , Ed. SCARONI, A.W., pp.650-697, (1988).
- [58] LYNKFELT, A., LECKNER, B., SO₂ Capture in Fluidised Bed Boilers: Re-emission of SO₂ due to Reduction of CaSO₄ , Chemical Engineering Science, 44, 2, pp. 207-213, (1979).
- [59] DOĞU, T., Yanma Sırasında Oluşan Kükürt Dioksidin Kireçtaşı ve Aktif Soda ile Tutulması, Çevre, No.1, pp. 1-8, (1986).
- [60] FORD, N.W.J., SAGE, P.W., The Characterization of Limestone for Use as SO₂ Sorbents in Coal Combustion , Proc. of the Institute of Energy's Fifth International FBC Conference, pp. 159-170, London, (1991).
- [61] MUNZNER, H., BONN, B., SCHILLING, H.D., Reduction of SO₂ Emission by Addition of Limestone in Fluidised Bed Combustion, German Chem. Eng., 8, pp. 104-112, (1985).
- [62] HAQUE, R., DUTTA, M.L., CHAKRABARTI, R.K., Fluidised Bed Combustion of High Sulphur Coals, Journal of the Institute of Energy, 173, pp. 173-177, December (1979).
- [63] VICKERS, M.A., MILNER, C.N., A Commercial Demonstration of Reduced NO_x and SO₂ Emission From a 1.8 MW Industrial Fluidised Bed Boiler, Proc.of the Institute of Energy's Fifth International Fluidised Combustion Conference, pp. 249 -260, London, (1991).

- [64] MARSHALL, A.R., MELLING, P.J., The Effect of Staged Combustion on Performance and Emissions from a Solids Circulation Boiler, Proc. of Institute Energy's Fifth International Fluidised Combustion Conference, pp. 269-280, London, (1991).
- [65] KRISHNAN, R.P., DAW, C.S., JONES, J.E., A Review of Fluidised Bed Combustion Technology in the United States, Heat and Mass Transfer in Fixed and Fluidised Beds, Eds. VAN SWAAIJ, V.P., AFGAN, N.H., Hemisphere Publ. Corp, pp. 433-455, (1986).
- [66] MODRAK, T.M., TANG, J.T., AULISIO, C.J., Sulphur Capture and Nitrogen Oxide Reduction on the 6'x6' Atmospheric Fluidised Bed Combustion Test Facility, Symposium on Combustion Chemistry, Las Vegas, Nevada, March-April, (1982).
- [67] KÜÇÜKBAYRAK, S., BOERSMA, D., VAN DEN BERG, P.J., Freeboard Sulphur Capture in a Fluidised Bed Combustor, Proc. of 5th. Engineering Foundation Conference on Fluidised Bed Conference, pp. 587- 594, Elsinore, (1986).
- [68] ANTHONY, E.J., DESAI, D.L., FRIEDRICK, F.D., RAZBIN, V.V., The Fluidised-Bed Combustion of a High-Sulphur Maritime Coal In a Pilot Scale and Industrial FBC Boiler, Proc. of 8th. International Conf. on FBC, pp. 241-254, (1985).
- [69] AĞABAY, M., Tipik Türk Linyitlerinin Akışkan Yataklı Yakıcıda Yakılmasıyla Oluşan SO₂'nin Tutulması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran, (1987).
- [70] ÖNER, M.T., Çan Linyitinin Akışkan Yatakta Yakılması Sırasında Oluşan SO₂ Yayınımı ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran, (1986).
- [71] MOSS, G., The Mechanism of Sulphur Absorption in Fluidised Beds of Lime Institute of Fuel Symposium Series, No. 1, Fluidised Combustion, London, (1975).
- [72] HELLER, H., WAGNER, R., CFB Selection and Operation in a District Heating Power Station Furbishment in Germany, Fluidised Combustion in Practice: Clean, Versatile, Economic?, Proceedings of the 4th. International Fluidised Combustion Conference, Vol 2., pp. III /1-18, London, December, (1988).

- [73] MINCHENER, A.J., CROSS, P.J.I., SMITH, M.A., GALE, J.J., and DAWES, S.G., Advanced Clean Coal Technology for Power Generation, Proc. of the Energy's 5th. International FBC Conference, pp. 331-342, London, December, (1991).
- [74] HORIO, M., MORI, S., FURUSAWA, T., TAMANUKI, S., Research and Development of NO_x Emission Abatement in a Fluidised Bed Coal Combuster in Japan, The Proc. of the 6th. International Conference on FBC, pp. 968-979, Atlanta, August, (1980).
- [75] FENNELLY, P.F., HALL, R.R., YOUNG, C.W., ROBINSON, J.M. KINDYA, R.J., HUNT, G., Update on Emission Measurement from Fluidised-Bed Combustion Facilities, Proc. of the 6th. International Conference on FBC, pp. 1236-1245, Atlanta, August, (1980).
- [76] WITTNER, W., SCHÜTTE, K., ROTZOLL, G., SCHÜGERL, K., Heterogenous Reduction of Nitric Oxide by Carbon Monoxide on Quartz Surfaces, Fuel, Vol.67, pp. 438-440, March, (1988).
- [77] SHIMIZU, T., TACHIYAMA, Y., KURODA, A., INAGAKI, M., Effect of SO_2 Removal on NO_x and N_2O Emission from a Bubbling Fluidised-Bed Combustor, Fuel, Vol.71, pp. 841-844, July, (1992).
- [78] HANSEN, P.F.B., DAM-JOHANSEN, K., JOHNSON, J.E., HULGAARD, T., Catalytic Reduction of NO and N_2O on Limestone during Sulphur Capture under Fluidised-Bed Combustion Conditions, Chemical Engineering Science, Vol. 47, No. 9-11, pp. 2419-2424, (1992).
- [79] OUDE LOHUIS, J.A., TROMP, P.J.J., MOULIJN, J.A., Parametric Study of N_2O Formation in Coal Combustion, Fuel, Vol.71, pp. 9-14, January, (1992).
- [80] BOTTING, A.J., GAVIN, D.G, HUGHES, I.S.C., Emission of Nitrous Oxide from Coal-Fired Fluidised-Bed Boilers, Proc. of the Institute of 5th. International Fluidised Combustion Conference, pp. 239-248, London, December, (1991).
- [81] KRISHNAN, R.P., ANTONY, J., RAJAVEL, M., SRINIVASAN, S.V., RAO, A.V.J., Combustion of High Ash Indian Coals in a Fluidised Bed Combustor, Fuel, Vol. 70, pp.1125-1135, October, (1991).
- [82] BARON, R. E. , BEER, J. M. , BORGHI, G., HODGES, J. L. , SAROFIM, A. F. , A Model of Coal Combustion in FBC, 5th Int. Symp. on Combustion, Combustion Institute, Vol III., pp. 437-456, (1977).

- [83] LA NAUZE, R. D., JUNG, K., Combustion Kinetics in Fluidised Beds, Proc. of the 7th Int. Conf. on Fluidised Bed Combustion, Philadelphia, (1982).
- [84] DE SOUZA-SANTOS, M. L., Comprehensive Modelling and Simulation of Fluidised Bed Boilers and Gasifiers, Fuel, Vol. 68, pp. 1507-1521, December, (1989).
- [85] VAN DEN BERG, P. J., Sulfur Capture in a FBC, Eds. OKUTAN, F., OKUTAN, H., Gübre Fabrikaları T.A.Ş., Istanbul, (1985).
- [86] HENTTONEN, J., KOJO, I.V., KORTELA, U., NO_x and SO₂ Emission Control Optimisation in the FBC Process, Proc. of the Conf. on Fluidised Bed Combustion, pp. 261-268, London, (1991).
- [87] ALVFORS, P., SVEDBERG, G., Modelling of the Simultaneous Calcination, Sintering and Sulphation of Limestone and Dolomite, Chemical Engineering Science, Vol.47, No.8, pp.1903-1912, (1992).
- [88] LIN, W., SVOBODA, K., VAN DEN BLEEK, C.M., Sulphur Capture and its Interactions with NO_x Emissions in Fluidized-Bed Combustion of Coal: General Analytical Model Based on Partial Gas-Solid Reactions, Chemical Engineering Science, Vol. 47, No.9-11, pp.2425-2430,(1992).
- [89] LYNGFELT, A., LECKNER, B., Sulphur Capture in Fluidised Bed Boilers, Temperature Dependence and Lime Conversion, J. Institute of Energy, pp. 62-72, Vol. LXII, No. 450, March, (1989).
- [90] SAXENA, S.C., Mathematical Models for Fluidised Bed Coal Combustion and Sulfur Retention, Energy (Oxford), Vol.13, No.7, pp. 557-607, (1988).
- [91] DOĞU, T., Effect of Pore Structure on the Mechanism of SO₂ Sorption on Activated Soda, Frontiers in Chemical Reaction Engineering, Ed. by, MASHELKER, R.A., pp.152-162, John Wiley Publ. Comp., (1984).
- [92] TOGAY, M., Fluidised-Bed Combustion of Elbistan Lignite and Its Pollution Characteristics, Msc Thesis, METU, (1984).
- [93] YARDIM, M. F., Linyit Yakan Değişik Dağıtıcı Elekli Akışkan Yataklarda Ayrışma ve Aglomerasyon, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart, (1992).

- [94] KHAN, W. U. Z., GIBBS, B. M., Optimization of Staged Combustion Conditions in a Fluidised-Bed for Simultaneous Reduction in NO_x and SO_2 Emission, Proc. of 1991 International Conference on Coal Science, pp. 327-330, Newcastle-upon-Tyne, September, (1991).
- [95] LIN, W., JOHNSON, J.E., JOHANSEN, K.D., VAN DEN BLEEK, C.M., Interactions Between Emissions of Sulphur Dioxide and Nitrogen Oxides in Fluidized-Bed Combustion of Coal, Proc. of Coal Utilization and The Environment, Fuel, Vol.72, pp. 716, May, (1993).
- [96] GENCO, J. M., ROSENBERG, H. S., Sorption of SO_2 on Ground Nahcolite ore, Journal of the Air Pollution Control Association, Vol. 26, No.10, pp. 989-990, October, (1976).
- [97] DOĞU, T., KESKİN, A., DOĞU, G., SMITH, J. M., Single Pellet, Moment Method for Analysis of Gas-Solid Reactions, Journal of American Institute of Chemical Engineers, Vol.32, No.5, pp.743-750, May, (1986).
- [98] HARTMAN, M., SVOBODA, K., Mass Transfer Between a Moving Gas Stream and Single Particles of Some Important Sorbents for Sulphur Dioxide, Collection of Czechoslovak Chemical Communications, Vol.46, pp.72-78,(1981).
- [99] DAWSON, M.R., BROWN, R.C., Bed Material Cohesion and Loss of Fluidization During Fluidised-Bed Combustion of Midwestern Coal, Fuel, Vol.71, pp.585-592, May, (1992).
- [100] MANZOORI, A. R., AGARWALL, P. K., The Fate of Organically Bound Inorganic Elements and Sodium Chloride During Fluidised-Bed Combustion of High Sodium, High Sulphur Low Rank Coals, Fuel, Vol.71, pp. 513-522, May, (1992).
- [101] MAZZA, M. H., GREEN, D.A., PARRIS, M.W., NEWTON, G. J., Mineral Characterization of Fluidised-Bed Combustion Aerosol Ash-Montana Rosebud Subbituminous Coal, US Dept. of Energy, Morgantown Research Center Report, MERC/TPR-78/1, Morgantown, pp.1-20, (1978).
- [102] HAJI-SULAIMAN, M. Z., SCARONI, A. W., The Calcination and Sulphation Behavior of Sorbents in Fluidized-Bed Combustion, Fuel, Vol.70, pp.169-176, February, (1991).
- [103] HAMMONS, G.A., SKOPP, A., NO_x Formation and Control in Fluidised Bed Coal Combustion Processes, ASME, Paper 71, WA/ AP C-3, (1971).

- [104] ERSOY MERİÇBOYU, A., Sorbent Kalsinasyon ve Sülfatasyon Kinetiğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran, (1992).



EK_A

```

10 ! .....
20 ! *
30 ! *
40 ! *
50 ! .....
60 !
70 DIM Volt(1:20),Sicaklik(1:5000),Termo(1:3,1:5000),Deney_zaman(1:5000)
80 DIM Deger1(30),Bes_hiz(1:5000),Komur_hiz(1:5000),Fan_volt(1:5000),Bes_volt(1:5000),Kirec_hiz(1:5000),Kir_volt(1:5000)
90 DIM U_bas(1:5000),A_bas(1:5000),Anoc(1:5000),Asoc(1:5000),Ac2c(1:5000),Acoc(1:5000)
100 COM Deger,Deger1,Say1,Bilgi$(1:5000)(30),Kom_hiz,Fan_hiz,Bayrak2,Fan_cal,Kom_boys(10),Deger2,Kir_boys(10),Kir_hiz
110 CLEAR SCREEN
120 CALL Giris_ekrani(Dosya$,Kom_hiz,Fan_hiz,Kom_boy$,Kir_hiz,Kir_boy$)
130 OUTPUT 709:"RST"
140 OUTPUT 709:"USE 0"
150 READ Sayma1,Sayma2,Sayma3,Sayma4,Sayma5,Sayma6,K,Art,Sil,Sa,Say,Say1,Say2,Art1,Ilk_time,Bit_time,Ilk_temp,Bit_temp,Sinir,Say3,Artis,Bayrak1,Deger1,Deger2
160 DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,120,0,1200,0,2,0,0,0,0
170 READ Cizgi(1),Cizgi(2),Cizgi(3),Cizgi(4),Cizgi(5),Cizgi(6),Cizgi(7)
180 DATA 1,4,5,6,7,8,3
190 IF Kom_boys="1-2" THEN
200 !Deger1=.0267767*Kom_hiz
210 Deger1=.0221052*Kom_hiz
220 !ELBISTAN KALIBRASYON DEGERI
230 !Deger1=.0286615*Kom_hiz
240 ELSE
250 IF Kom_boys="4-5" THEN
260 !Deger1=.0281133*Kom_hiz
270 Deger1=.0230042*Kom_hiz
280 !ELBISTAN KALIBRASYON DEGERI
290 !Deger1=.0307881*Kom_hiz
300 ELSE
310 Deger1=Kom_hiz
320 END IF
330 END IF
340 IF Kir_boys=".3-.6" THEN
350 Deger2=.031*Kir_hiz
360 ELSE
370 IF Kir_boys=".6-1.0" THEN
380 Deger2=.038*Kir_hiz
390 ELSE
400 Deger2=Kir_hiz
410 END IF
420 END IF
430 ON ERROR GOTO End
440 GRAPHICS ON
450 GINIT
460 GCLEAR
470 !
480 ! .....
490 ! * EKRANIN OLUSTURULMASI *
500 ! .....
510 PLOTTER IS CRT,"INTERNAL"
520 X_gdu_max=100*MAX(1,RATIO)
530 Y_gdu_max=100*MAX(1,1/RATIO)
540 DEG
550 LDIR 90
560 CSIZE 2.5
570 MOVE 5,Y_gdu_max/2
580 LABEL "Sicaklik (oC)"
590 LORG 4
600 LDIR 0
610 MOVE X_gdu_max*.265,.07*Y_gdu_max
620 LABEL "ZAMAN (dak)"
630 VIEWPORT .1*X_gdu_max,.43*X_gdu_max,.15*Y_gdu_max,.95*Y_gdu_max
640 FRAME
650 WINDOW Ilk_time,Bit_time+5,Ilk_temp,Bit_temp
660 AXES 10,10,Bas_time,Bas_temp,6,5,1
670 CLIP OFF
680 CSIZE 2.5,.5
690 LORG 6
700 FOR I=Ilk_time TO Bit_time STEP 60
710 MOVE I,Ilk_temp-.01
720 LABEL USING "%.K":I/60
730 NEXT I
740 LORG 8
750 FOR I=Ilk_temp TO Bit_temp STEP 100
760 MOVE Ilk_time-5,I
770 LABEL USING "%.K":I
780 NEXT I

```

```

790 PRINT TABXY(38,13),"Fan Hava Hiz=",TABXY(55,13),"0",TABXY(62,13),"m/s",TABXY
(71,13),"0.0",TABXY(77,13),"V"
800 PRINT TABXY(38,14),"Kömür debisi=",TABXY(55,14),"0",TABXY(62,14),"g/min",TAB
XY(71,14),"0.0",TABXY(77,14),"V"
810 PRINT TABXY(38,15),"Fan Air Temp=",TABXY(55,15),"0",TABXY(62,15),"oC"
820 !PRINT TABXY(38,16),"Yatak deltaP=",TABXY(55,16),"0",TABXY(62,16),"mm H2O"
830 PRINT TABXY(38,16),"UST_BAS=",TABXY(55,16),"ALT_BAS="
840 PRINT TABXY(38,17),"Gazla Isitma="
850 PRINT TABXY(38,20),"Kirec Debisi=",TABXY(55,20),"0",TABXY(62,20),"g/min",TAB
XY(71,20),"0.0",TABXY(77,20),"V"
860 PRINT TABXY(38,1),T1 T2 T3 NO SO O2 CO
870 MOVE Bit_time+10,610
880 RECTANGLE 210,520
890 !
900 ! FONKSIYON TUSLARININ TANIMLANMASI
910 !
920 ON KEY 1 LABEL "FAN HIZ ARTIRMA" CALL Hiz_arttir
930 ON KEY 2 LABEL "FAN HIZ AZALTMA" CALL Hiz_azalt
940 ON KEY 3 LABEL "KOMOR B ARTIRMA" CALL Kom_yukle
950 ON KEY 4 LABEL "KOMOR B AZALTMA" CALL Kom_azalt
960 ON KEY 5 LABEL "FAN START" GOSUB Fan_bas
970 ON KEY 6 LABEL "EMIS FANCALISMA" GOSUB Emis_bas
980 ON KEY 7 LABEL "ALARM IPTAL" CALL Alarm_off
990 ON KEY 8 LABEL "EKTUSLAR" GOSUB Ektuslar
1000!
1010! *****
1020! * ANA PROGRAM *
1030! *****
1040 Devam: !
1050 ! VOLTAGE DEGERLERININ DATA ACQUISITION/CONTROL UNIT'TEN OKUNUP CEVRILMESI
1060 !
1070 OUTPUT 709;"CONFMEAS DCV";313
1080 Vo=0
1090 ENTER 709;Vo
1100 IF Vo>0 THEN
1110 T0=1000*Vo
1120 END IF
1130 OUTPUT 709;"CONFMEAS DCV";310,308,312,314,315,316,306,300,304,301
1140 FOR I=1 TO 10
1150 Volt(I)=0
1160 ENTER 709;Volt(I)
1170 NEXT I
1180 AleV=Volt(1)
1190 !Deltap=100*ABS(Volt(2))
1200 IF Volt(3)>0 THEN
1210 Hiz=50*Volt(3)
1220 ELSE
1230 Hiz=0
1240 END IF
1250 FOR I=1 TO 3
1260 T(I)=(Volt(I+3)*24429.86998096)+13
1270 NEXT I
1280 Noc=(Volt(7)-1)*250
1290 Soc=((Volt(8)-2)*250)
1300 O2c=(Volt(9)-1)*5.25
1310 Coc=((Volt(10)-2)*375)
1320 !Noc=((Volt(7)-1)*250)+1
1330 !Soc=(Volt(8)-2)*250+2
1340 !O2c=(Volt(9)-1)*5.25
1350 !Coc=((Volt(10)-2)*375)-26
1360 !Noc=Volt(7)
1370 !Soc=Volt(8)
1380 !O2c=Volt(9)
1390 !Coc=Volt(10)
1400 !
1410 PRINT TABXY(54,13)," "
1420 PRINT TABXY(54,13),PROUND(Hiz,-2)
1430 !PRINT TABXY(54,15)," "
1440 PRINT TABXY(54,15),PROUND(T0,-1)
1450 !PRINT TABXY(54,16)," "
1460 !PRINT TABXY(54,16),PROUND(Deltap,0)
1470 IF ABS(AleV)<12 THEN
1480 AleV$="OFF"
1490 ELSE
1500 AleV$="ON"
1510 END IF
1520 PRINT TABXY(54,17)," "
1530 PRINT TABXY(54,17),AleV$
1540 IF Sa=1 THEN
1550 Deney_basi=TIMEDATE
1560 END IF
1570 Deney_surasi=TIMEDATE-Deney_basi
1580 !
1590 IF (Fan_bayrak=1 AND Hiz<.05) THEN
1600 OUTPUT 709;"APPLY DCV 202,7.6"
1610 Deger=7.6
1620 Fan_bayrak=2
1630 END IF
1640 !IF T0=0 THEN

```

```

1650 IF (Fan_bayrak=2 AND Hiz<.05 AND (Deney_suresi-Fan_bas_za)>15) THEN
1660   PRINT TABXY(33,18),"ANONOMETRE KAPALI"
1670   OUTPUT 709;"CLOSE":115
1680   Bilgi$(Say1)="Anonometre off"
1690   GOTO 1460
1700 END IF
1710 PRINT TABXY(38,18),"DIKKAT FAN CALISMIYOR"
1720 OUTPUT 709;"CLOSE":115
1730 Bilgi$(Say1)="Fan Ariza"
1740 Fan_bayrak=0
1750 ON KEY 5 LABEL "FAN START" GOSUB Fan_bas
1760 OUTPUT 709;"OPEN":107,108
1770 END IF
1780 IF (Fan_bayrak=1 AND Ates_bayrak=0 AND Hiz<2.9) THEN
1790   Deger=Deger+.1
1800   Deger$=VAL$(Deger)
1810   Dizi$="APPLY DCV 202,"&Deger$
1820   OUTPUT 709;Dizi$
1830 END IF
1840 IF (Fan_bayrak=1 AND Ates_bayrak=0 AND Hiz>3.1) THEN
1850   Deger=Deger-.1
1860   Deger$=VAL$(Deger)
1870   Dizi$="APPLY DCV 202,"&Deger$
1880   OUTPUT 709;Dizi$
1890 END IF
1900 IF (Ates_bayrak=2 AND Hiz<2.4) THEN
1910   Deger=Deger+.1
1920   Deger$=VAL$(Deger)
1930   Dizi$="APPLY DCV 202,"&Deger$
1940   OUTPUT 709;Dizi$
1950 END IF
1960 IF (Ates_bayrak=2 AND Hiz>2.6) THEN
1970   Deger=Deger-.1
1980   Deger$=VAL$(Deger)
1990   Dizi$="APPLY DCV 202,"&Deger$
2000   OUTPUT 709;Dizi$
2010 END IF
2020 IF Ates_bayrak=1 THEN
2030   OUTPUT 709;"CLOSE":107
2040   Ates_bayrak=2
2050 END IF
2060 IF (Ates_bayrak=2 AND INT(Deney_suresi-Atesleme_za)=3) THEN
2070   OUTPUT 709;"CLOSE":108
2080 END IF
2090 IF (Ates_bayrak=2 AND INT(Deney_suresi-Atesleme_za)=8) THEN
2100   OUTPUT 709;"OPEN":107
2110 END IF
2120 IF (Ates_bayrak=2 AND ABS(Alev)<12 AND (Deney_suresi-Atesleme_za)>10) THEN
2130   OUTPUT 709;"OPEN":108
2140   OUTPUT 709;"CLOSE":115
2150   PRINT TABXY(38,18),"ATESLEME PROBLEMI"
2160   Ates_bayrak=0
2170   ON KEY 5 LABEL "YATAK ISITMA" GOSUB On_isitma
2180 END IF
2190 IF (Ates_bayrak=2 AND T(1)>875) THEN
2200   OUTPUT 709;"OPEN":108
2210   Ates_bayrak=0
2220   Bilgi$(Say1)="AI"&TIME$(TIMEDATE)
2230 END IF
2240 ! SIKLIK DEGERLERININ GRAFIKLERININ CIZILMESI
2250 Deney_za=TIMEDATE-(Sinir+Deney_basi)
2260 ! GRAFIKTE TEMIZLEME
2270 PEN -1
2280 IF Deney_za+18<122 THEN
2290   FOR I=1 TO 7 STEP .25
2300     MOVE Deney_za+13+I,10
2310     DRAW Deney_za+13+I,Bit_tamp-5
2320   NEXT I
2330 END IF
2340 PEN 1
2350 !
2360 ! T1 DEGERININ CIZIMI
2370 !
2380   PENUP
2390   IF (T(1)>0 AND T(1)<1200) THEN
2400     PLOT Deney_za,T(1)
2410   END IF
2420 !
2430 ! T2 DEGERININ CIZIMI
2440 !
2450   PENUP
2460   IF Sayma1>7 THEN
2470     Sayma1=0
2480   END IF
2490   Sayma1=Sayma1+1
2500   IF Sayma1<=4 THEN
2510     IF (T(2)>0 AND T(2)<1200) THEN
2520       PLOT Deney_za,T(2)
2530     END IF
2540   END IF

```

```

2550 !
2560 ! T3 DEGERININ CIZIMI
2570 !
2580 PENUP
2590 IF Sayma2>11 THEN
2600 Sayma2=0
2610 END IF
2620 Sayma2=Sayma2+1
2630 IF (Sayma2<=6 OR Sayma2=9 OR Sayma2=10) THEN
2640 IF (T(3)>0 AND T(3)<1200) THEN
2650 PLOT Deney_za,T(3)
2660 END IF
2670 END IF
2680 !
2690 ! T4 DEGERININ CIZIMI
2700 !
2710 PENUP
2720 IF Sayma3>4 THEN
2730 Sayma3=0
2740 END IF
2750 Sayma3=Sayma3+1
2760 IF Sayma3<=2 THEN
2770 IF (T(4)>0 AND T(4)<1200) THEN
2780 PLOT Deney_za,T(4)
2790 END IF
2800 END IF
2810 !
2820 ! T5 DEGERININ CIZIMI
2830 !
2840 PENUP
2850 IF Sayma4>14 THEN
2860 Sayma4=0
2870 END IF
2880 Sayma4=Sayma4+1
2890 IF (Sayma4<=10 OR Sayma4=13) THEN
2900 IF (T(5)>0 AND T(5)<1200) THEN
2910 PLOT Deney_za,T(5)
2920 END IF
2930 END IF
2940 !
2950 ! T6 DEGERININ CIZIMI
2960 !
2970 PENUP
2980 IF Sayma5>12 THEN
2990 Sayma5=0
3000 END IF
3010 Sayma5=Sayma5+1
3020 IF Sayma5<=10 THEN
3030 IF (T(6)>0 AND T(6)<1200) THEN
3040 PLOT Deney_za,T(6)
3050 END IF
3060 END IF
3070 !
3080 ! T7 DEGERININ CIZIMI
3090 PENUP
3100 IF Sayma6>18 THEN
3110 Sayma6=0
3120 END IF
3130 Sayma6=Sayma6+1
3140 IF Sayma6<=10 THEN
3150 IF (T(7)>0 AND T(7)<1200) THEN
3160 PLOT Deney_za,T(7)
3170 END IF
3180 END IF
3190 !
3200 ! SICAKLIK LARIN NUMERIK DEGERLERININ EKRANA BASTIRILMASI
3210 !
3220 FOR I=1 TO 3
3230 IF (T(I)>0 AND T(I)<1200) THEN
3240 PRINT TABXY(30+X,3+K),PROUND(T(I),0)
3250 END IF
3260 X=X+5
3270 NEXT I
3280 X=0
3290 PRINT TABXY(54,3+K),PROUND(Noc,0)
3300 PRINT TABXY(60,3+K),PROUND(Soc,0)
3310 PRINT TABXY(66,3+K),PROUND(O2c,0)
3320 PRINT TABXY(72,3+K),PROUND(Coc,0)
3330 IF ABS(T(5)-T(1))<=999 THEN
3340 PRINT TABXY(72,3+K),PROUND(T(5)-T(1),0)
3350 END IF
3360 IF ABS(T(5)-T(7))<=999 THEN
3370 PRINT TABXY(77,3+K),PROUND(T(5)-T(7),0)
3380 END IF
3390 IF K>=8 THEN
3400 K=0

```

```

3410 ELSE
3420 K=K+1
3430 END IF
3440 IF S11>7 THEN
3450 S11=0
3460 ELSE
3470 PRINT TABXY(38,4+S11),"
3480 S11=S11+1
3490 END IF
3500 !
3510 ! DAKIKADA BIR DEGERLERIN PRINTER'A BASILMASI
3520 !
3530 IF Deney_suresi>=60*Say1 THEN
3540 PRINTER IS 70!
3550 PRINT POUND(Deney_suresi/60,0);TAB(5),POUND(T(1),0);TAB(10),POUND(T(2),0
);TAB(15),POUND(T(3),0);TAB(23),POUND(Noc,0);TAB(29),POUND(Soc,0);
3560 PRINT TAB(35),POUND(Ozc,0);TAB(41),POUND(Coc,0);TAB(47),POUND(Hiz,-2);
3570 PRINT TAB(56),POUND(Kom_hiz,0);TAB(60),POUND(Deltap,0);TAB(70),Bilgi$(Sa
y1)
3580 PRINT TAB(53),POUND(Kom_hiz,0);TAB(59),POUND(Ust_basinc,-1);TAB(64),POUN
D(Alt_basinc,-1);TAB(70),Bilgi$(Say1)
3590 PRINTER IS 1
3600 Say1=Say1+1
3610 PRINT TABXY(50,16)," ",TABXY(65,16)," "
3620 PRINT TABXY(50,16),POUND(Ust_basinc,-1);TABXY(65,16),POUND(Alt_basinc,-1)
3630 END IF
3640 !
3650 ! 15 SANIYEDE BIR SICAKLIK DEGERLERININ DIZIYE YUKLENMESI
3660 IF Deney_suresi>=15*Say2 THEN
3670 Deney_zamani(Say2)=Deney_suresi
3680 FOR I=1 TO 3
3690 Termo(I,Say2)=T(I)
3700 NEXT I
3710 U_bas(Say2)=Ust_basinc
3720 A_bas(Say2)=Alt_basinc
3730 Anoc(Say2)=Noc
3740 Asoc(Say2)=Soc
3750 Ao2c(Say2)=O2c
3760 Acoc(Say2)=Coc
3770 Bes_hiz(Say2)=Hiz
3780 !Komur_hiz(Say2)=Kom_hiz
3790 !Kirec_hiz(Say2)=Kir_hiz
3800 !Fan_volt(Say2)=Deger
3810 !Bes_volt(Say2)=Deger1
3820 !Kir_volt(Say2)=Deger2
3830 IF INT(Say2/2)*2=Say2 THEN
3840 Ust_basinc=18.75*(ABS(Volt(2))-1)
3850 OUTPUT 709;"OPEN";!!!
3860 OUTPUT 709;"CLOSE";!!!
3870 ELSE
3880 Alt_basinc=18.75*(ABS(Volt(2))-1)
3890 OUTPUT 709;"OPEN";!!!
3900 OUTPUT 709;"CLOSE";!!!
3910 END IF
3920 Say2=Say2+1
3930 END IF
3940 !
3950 ! ZAMAN EKSENININ SUREKLI YAZILMASI
3960 !
3970 IF Deney_suresi>=60*Say3 THEN
3980 LONG 6
3990 MOVE 0+Artis*60,Ilk_temp-.01
4000 PEN -1
4010 LABEL USING "#,K";Say3-2
4020 PEN 1
4030 MOVE 0+Artis*60,Ilk_temp-.01
4040 LABEL USING "#,K";Say3
4050 Artis=Artis+1
4060 IF Artis>=3 THEN
4070 Artis=1
4080 MOVE 0,Ilk_temp-.01
4090 PEN -1
4100 LABEL USING "#,K";Say3-2
4110 PEN 1
4120 MOVE 0,Ilk_temp-.01
4130 LABEL USING "#,K";Say3
4140 END IF
4150 Say3=Say3+1
4160 END IF
4170 !
4180 IF Deney_suresi>=120.00001*Say THEN
4190 Say=Say+1
4200 Sinir=Sinir+120

```

```

4210 ! GRAFIGIN ILK 20 SANIYESININ TEMIZLENMESI
4220 PEN -1
4230 FOR Ss=2 TO 20 STEP .50
4240     MOVE Ss,10
4250     DRAW Ss,Bit_temp-10
4260 NEXT Ss
4270 PEN 1
4280 !
4290 END IF
4300 Sa=Sa+1
4310 GOTO Devam
4320 !
4330 !
4340 Bitis: !
4350     KEY LABELS OFF
4360     CLEAR SCREEN
4370     INPUT "KÖMÜR BESLEME DURSUN MU ? (E/H)",Soru1$
4380     IF Soru1$="E" THEN
4390         OUTPUT 709;"APPLY DCV 201,0,0"
4400         Komur_bayrak=0
4410     ELSE
4420         IF Soru1$<>"H" THEN
4430             GOTO 4370
4440         END IF
4450     END IF
4460     CLEAR SCREEN
4470     ! KIREC BESLEME (1992 KASIM)
4480     INPUT "KIREC BESLEME DURSUN MU ? (E/H)",Soru2$
4490     IF Soru2$="E" THEN
4500         OUTPUT 709;"APPLY DCV 200,0,0"
4510         Kirec_bayrak=0
4520     ELSE
4530         IF Soru2$<>"H" THEN
4540             GOTO 4480
4550         END IF
4560     END IF
4570     MASS STORAGE IS ":,700,1"
4580     CREATE BDAT Dosya$,Say2-1,104
4590     ASSIGN @File TO Dosya$
4600     FOR I=1 TO Say2-1
4610         OUTPUT @File,I;Deney_zamani(I),Termo(1,I),Termo(2,I),Termo(3,I),
Anoc(I),Asoc(I),Ao2c(I),Acoc(I),U_bas(I),Bes_hiz(I)
4620     NEXT I
4630     MASS STORAGE IS ":,700,0"
4640     Bayrak1=1
4650 Tekrar: !
4660     INPUT "PROGRAMA DEVAM ETMEK ISTIYORMUSUNUZ ? (E/H)",Devam$
4670     IF Devam$="H" THEN
4680         GOTO 6570
4690     ELSE
4700         IF Devam$<>"E" THEN
4710             GOTO Tekrar
4720         END IF
4730     END IF
4740     GCLEAR
4750     GINIT
4760     PRINT TABXY(5,5),"SON DENEY ZAMANI =",Deney_zamani(Say2-1)/60
4770     INPUT "GRAFIK BASLANGIC ZAMANI (dakika) =",Bas_time
4780     INPUT "GRAFIK SONUC ZAMANI (dakika) =",Son_time
4790     INPUT "GRAFIK BASLANGIC SICAKLIGI (oC) =",Bas_temp
4800     INPUT "GRAFIK SONUC SICAKLIGI (oC) =",Son_temp
4810     INPUT "ISTENEN SICAKLIK LARI BINARY FORMDA GIR",Sicaklik$
4820     PLOTTER IS CRT,"INTERNAL"
4830     CLEAR SCREEN
4840     GRAPHICS ON
4850     X_gdu_max=100*MAX(1,RATIO)
4860     Y_gdu_max=100*MAX(1,1/RATIO)
4870     DEG
4880     LDIR 90
4890     CSIZE 2.5
4900     MOVE 5,Y_gdu_max/2
4910     LABEL "SICAKLIK-DERISIM (MG/M3)"
4920     LORG 4
4930     LDIR 0
4940     MOVE X_gdu_max/2,.07*Y_gdu_max
4950     LABEL "Zaman (dakika)"
4960     VIEWPORT .1*X_gdu_max,.98*X_gdu_max,.15*Y_gdu_max,.9*Y_gdu_max
4970     FRAME

```

```

4980 IF (Son_time-Bas_time)<10 THEN
4990   Xart=1
5000   X_art=.5
5010   ELSE
5020   Xart=5
5030   X_art=1
5040 END IF
5050 IF (Son_temp-Bas_temp)<100 THEN
5060   Yart=10
5070   Y_art=5
5080   ELSE
5090   Yart=50
5100   Y_art=10
5110 END IF
5120 WINDOW Bas_time,Son_time,Bas_temp,Son_temp
5130 AXES X_art,Y_art,Bas_time,Bas_temp,Xart,Yart,3
5140 CLIP OFF
5150 CSIZE 2.5,.5
5160 LORG 6
5170 IF (Son_time-Bas_time)>=10 THEN
5180   Artim=5
5190   ELSE
5200   Artim=1
5210 END IF
5220 FOR I=Bas_time TO Son_time STEP Artim
5230   MOVE I,Bas_temp-.01
5240   LABEL USING "%,K";I
5250 NEXT I
5260 IF (Son_temp-Bas_temp)>=100 THEN
5270   Artim=25
5280   ELSE
5290   Artim=10
5300 END IF
5310 LORG 8
5320 FOR I=Bas_Temp TO Son_temp STEP 50
5330   MOVE Bas_time-.10,I
5340   LABEL USING "%,K";I
5350 NEXT I
5360 IF Son_time*4>Say2-1 THEN
5370   Son=Say2-1
5380   ELSE
5390   Son=Son_time*4
5400 END IF
5410 IF Bas_time<=0 THEN
5420   Bas=1
5430   ELSE
5440   Bas=Bas_time*4
5450 END IF
5460 I T(J)'SICAKLIGININ CIZIMI
5470 FOR J=1 TO 3
5480 IF Sıcaklik$(J,1)="1" THEN
5490 PENUP
5500 Art=Bas_time
5510 Ciz=Cizgi(J)
5520 FOR I=1 TO Say2-1
5530   Sıcaklik(I)=Termo(J,I)
5540 NEXT I
5550 CALL Cizin(Sıcaklik(*),Say2,Art,Bas,Son,Ciz,Son_temp,Bas_temp)
5560 END IF
5570 NEXT J
5580 PAUSE
5590 GOTO Tekrar
5600 !
5610 Fan_bas: !
5620 ON KEY 5 LABEL "YATAK ISITMA" GOSUB On_isitma
5630 Fan_bayrak=1
5640 Fan_bas_zs=Deney_suresi
5650 Bilgi$(Say!)="F0"&TIME$(TIMEDATE)
5660 RETURN
5670 !
5680 On_isitma: !
5690 ON KEY 5 LABEL "KOMUR BESLEME" GOSUB Komur_on
5700 Ates_bayrak=1
5710 Atesleme_zs=Deney_suresi
5720 Bilgi$(Say!)="A0"&TIME$(TIMEDATE)
5730 RETURN
5740 !
5750 Komur_on: !
5760 CALL Besleme
5770 Komur_bayrak=1
5780 ON KEY 5 LABEL "DENEY BASLAMA" GOSUB Den_bas
5790 RETURN
5800 !
5810 Den_bas: !
5820 Ates_bayrak=0
5830 CALL Den_start
5840 ON KEY 5 LABEL "DENEY BITISE" GOSUB Bitis
5850 RETURN

```

```

5860 !
5870 Isitma: !
5880   Ates_bayrak=1
5890   Atesleme_zam=Doney_suresi
5900   Bilgi$(Say1)="AO"&TIME$(TIMEDATE)
5910   RETURN
5920 !
5930 Alav_ipt: !
5940   OUTPUT 709;"OPEN";107
5950   OUTPUT 709;"OPEN";108
5960   Ates_bayrak=0
5970   Bilgi$(Say1)="AI"&TIME$(TIMEDATE)
5980   RETURN
5990 !
6000 Emis_bas: !
6010   !CALL Emis_acik
6020   !ON KEY 6 LABEL "EMIS FANDURMA" GOSUB Emis_bit
6030   !RETURN
6040 !
6050 Emis_bit: !
6060   !CALL Emis_kapali
6070   !ON KEY 6 LABEL "EMIS FANCALISMA" GOSUB Emis_bas
6080   !RETURN
6090 !
6100 Ektuslar: !
6110   ON KEY 1 LABEL "DENEY   BASLAMA" GOSUB Den_bas
6120   ON KEY 2 LABEL "DENEY   BITISE" GOSUB Bitis
6130   ON KEY 3 LABEL "YATAK   ISITMA" GOSUB Isitma
6140   ON KEY 4 LABEL "ISITMA  IPTAL" GOSUB Alav_ipt
6150   !ON KEY 6 LABEL "KIREC ARTTIRMA" CALL Kirec_arttir
6160   !ON KEY 7 LABEL "ALARM IPTAL" CALL Alarm_off
6170   ON KEY 8 LABEL "EKTUSLAR" GOSUB Ektus2
6180   RETURN
6190 !
6200 Ektus2: !
6210   ON KEY 1 LABEL "FAN HIZ ARTTIRMA" CALL Hiz_arttir
6220   ON KEY 2 LABEL "FAN HIZ AZALTMA" CALL Hiz_azalt
6230   ON KEY 3 LABEL "KOMUR 8 ARTTIRMA" CALL Kom_yukle
6240   ON KEY 4 LABEL "KOMUR 8 AZALTMA" CALL Kom_azalt
6250   !ON KEY 6 LABEL "KIREC ARTTIRMA " CALL Kirec_arttir
6260   !ON KEY 7 LABEL "KIREC AZALTMA" CALL Kirec_azalt
6270   ON KEY 8 LABEL "EKTUSLAR" GOSUB Ektus3
6280   RETURN
6290 !
6290 Ektus3: !
6300   ON KEY 1 LABEL "FAN HIZ ARTTIRMA" CALL Hiz_arttir
6310   ON KEY 2 LABEL "FAN HIZ AZALTMA" CALL Hiz_azalt
6320   ON KEY 3 LABEL "KOMUR 8 ARTTIRMA" CALL Kom_yukle
6330   ON KEY 4 LABEL "KOMUR 8 AZALTMA" CALL Kom_azalt
6340   ON KEY 6 LABEL "KIREC ARTTIRMA" CALL Kirec_arttir
6350   ON KEY 7 LABEL "KIREC AZALTMA" CALL Kirec_azalt
6360   ON KEY 8 LABEL "EKTUSLAR" GOSUB Ektuslar
6370   RETURN
6380 !
6390 End: !
6400   CLEAR SCREEN
6410   DISP "Error number = ";ERRM$
6420   IF Bayrak1=0 THEN
6430     INPUT "ARIZADOSYA ISMI GIRINIZ =" ;Dosya1$
6440     IF Dosya1$="" THEN
6450       MASS STORAGE IS ":,700,0"
6460       PURGE "ARIZADOS"
6470       Dosya1$="ARIZADOS"
6480     END IF
6490     CREATE BDAT Dosya1$,Say2-1,104
6500     ASSIGN @File TO Dosya1$
6510     FOR I=1 TO Say2-1
6520       OUTPUT @File,I;Doney_zamani(I),Termo(1,I),Termo(2,I),Termo(3,I),A
6530       noc(I),Asoc(I),Ao2c(I),Acoc(I),U_bas(I),Bes_hiz(I)
6540     NEXT I
6550     MASS STORAGE IS ":,700,0"
6560     END IF
6570     OFF ERROR
6580     KEY LABELS ON
6590     !
6600     INPUT "FAN DURDURULSUN MU ? (E/H) " ;Sorus$
6610     IF Sorus$="E" THEN
6620       OUTPUT 709;"APPLY DCV 202,0.0"
6630     ELSE
6640       IF Sorus$<>"H" THEN
6650         GOTO 6590
6660       END IF
6670     END IF
6680     !
6690     IF (Sorus$="E" AND Soru1$="E" AND Soru2$="E") THEN
6700       OUTPUT 709;"RST"
6710     END IF
6720     !
6730     END

```

```

6730 I
6740 SUB Giriş_ekrani(Dosya$,Kom_hiz,Fan_hiz,Kom_boy$,Kir_hiz,Kir_boy$)
6750 CLEAR SCREEN
6760 INPUT "LÜTFEN ADINIZI GIRINIZ =" ,Ad$
6770 INPUT "DENEY NOSU =" ,Den$
6780 INPUT "KÖMÜRÜN TÜRÜNÜ GIRINIZ =" ,Kom_tur$
6790 INPUT "KÖMÜRÜN BOYUTUNU GIRIN =" ,Kom_boy$
6800 INPUT "KİRECTASI TÜRÜNÜ GIRINIZ=" ,Kirec_tur$
6810 INPUT "KİRECTASI BOYUTUNU GIRINIZ=" ,Kir_boy$
6820 INPUT "YATAK MALZEMESİNİ GIR. =" ,Yat_mal$
6830 INPUT "YATAK MALZEME BOYUTU =" ,Yat_mal_boy$
6840 INPUT "KÖMÜR BESLEME HIZI =" ,Kom_hiz
6850 INPUT "KİREC BESLEME HIZI=" ,Kir_hiz
6860 INPUT "FAN DENEY HIZI =" ,Fan_hiz
6870 INPUT "DİNAMİK YATAK =" ,Hd
6880 INPUT "STATİK YATAK =" ,Hs
6890 INPUT "BESLEME YÜKSEKLİĞİ =" ,Hf
6900 INPUT "DİSTRİBÜTÖR PLATE TÜRÜ =" ,Dis$
6910 Dos1$=Ad$1,51
6920 Dos2$=Den$1,31
6930 Dosya$=Dos1$&Dos2$
6940 PRINTER IS 701
6950 PRINT "-----"
6960 PRINT "-----"
6970 PRINT TAB(30),"AKISKAN YATAK DENEYİ"
6980 PRINT "-----"
6990 PRINT
7000 PRINT "DENEYİ YAPAN " ;TAB(20),Ad$;TAB(40),"DENEY NUMARASI " ;TAB(65),
Den$
7010 PRINT "DENEY TARİHİ";TAB(20),DATE$(TIMEDATE);TAB(40),"DENEY BAŞLANGIÇ ZAMAN
I";TAB(65),TIME$(TIMEDATE)
7020 PRINT "KULLANILAN KÖMÜR " ;TAB(20),Kom_tur$;TAB(40);"KÖMÜR BOYUTU " ;TAB(
60),Kom_boy$;"mm"
7030 PRINT "KULLANILAN KİREC";TAB(20),Kirec_tur$;TAB(40);"KİREC BOYUTU " ;TAB(6
5),Kir_boy$;"mm"
7040 PRINT "YATAK MALZEMESİ";TAB(20),Yat_mal$;TAB(40),"YATAK MALZEMESİ BOYUTU";T
AB(65),Yat_mal_boy$;"mm"
7050 PRINT "KÖMÜR BESLEME DEB=" ;TAB(20),Kom_hiz;"g/mn";TAB(40),"FAN DEBİSİ";TAB(
65),Fan_hiz;"m3/H"
7060 PRINT "BESLEME YÜKSEKLİĞİ";TAB(20),Hf;"cm";TAB(40),"DİSTRİBÜTÖR TÜRÜ";TAB(6
0),Dis$
7070 PRINT "DİNAMİK YATAK Hd";TAB(20),Hd;"cm";TAB(40),"STATİK YATAK";TAB(65),Hs;
"cm"
7080 PRINT "-----"
7090 PRINT
7100 PRINT "ZAMAN T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7 T51 T57 Qh Fk DP";TAB(
70),"ACIKLAMA"
7110 PRINT "ZAMAN T1 T2 T3 NO SO O2 CO QH FK UB AB";
TAB(70),"ACIKLAMA"
7120 PRINT "-----"
7130 PRINTER IS 1
7140 PAUSE
7150 SUBEND
7160 SUB Cizim(Sıcaklik(*),Say,Art,Bas,Son,Ciz,Son_temp,Bas_temp)
7170 LINE TYPE Ciz
7180 FOR X=Bas+1 TO Son
7190 IF (Sıcaklik(X)<Son_temp AND Sıcaklik(X)>Bas_temp) THEN
7200 IF Sıcaklik(X-1)>Son_temp THEN
7210 Zaman=((Son_temp-Sıcaklik(X-1))/(Sıcaklik(X)-Sıcaklik(X-1)))*.25+Art-.2
5
7220 PLOT Zaman,Son_temp
7230 PLOT Art,Sıcaklik(X)
7240 GOTO Birsonrası
7250 END IF
7260 IF Sıcaklik(X-1)<Bas_temp THEN
7270 Zaman=((Bas_temp-Sıcaklik(X-1))/(Sıcaklik(X)-Sıcaklik(X-1)))*.25+Art-.2
5
7280 PLOT Zaman,Bas_temp
7290 PLOT Art,Sıcaklik(X)
7300 GOTO Birsonrası
7310 ELSE
7320 PLOT Art,Sıcaklik(X)
7330 GOTO Birsonrası
7340 END IF
7350 END IF
7360 IF Sıcaklik(X)<Bas_temp THEN
7370 IF Sıcaklik(X-1)<Bas_temp THEN
7380 PLOT Art,Bas_temp
7390 GOTO Birsonrası
7400 END IF
7410 IF Sıcaklik(X-1)>Son_temp THEN
7420 Zaman_u=((Son_temp-Sıcaklik(X-1))/(Sıcaklik(X)-Sıcaklik(X-1)))*.25+A
rt-.25
7430 PLOT Zaman_u,Son_temp
7440 Zaman_a=((Bas_temp-Sıcaklik(X-1))/(Sıcaklik(X)-Sıcaklik(X-1)))*.25+A
rt-.25

```

```

7450      PLOT Zaman,a,Bas_temp
7460      PLOT Art,Bas_temp
7470      GOTO Birsonrasi
7480      ELSE
7490      Zaman=((Bas_temp-Sicaklik(X-1))/(Sicaklik(X)-Sicaklik(X-1)))*.25+Art
7500      PLOT Zaman,Bas_temp
7510      GOTO Birsonrasi
7520      END IF
7530  END IF
7540  IF Sicaklik(X)>Son_temp THEN
7550      IF Sicaklik(X-1)>Son_temp THEN
7560          PLOT Art,Son_temp
7570          GOTO Birsonrasi
7580      END IF
7590      IF Sicaklik(X-1)<Bas_temp THEN
7600          Zaman_a=((Bas_temp-Sicaklik(X-1))/(Sicaklik(X)-Sicaklik(X-1)))*.2
7610          PLOT Zaman_a,Bas_temp
7620          Zaman_u=((Son_temp-Sicaklik(X-1))/(Sicaklik(X)-Sicaklik(X-1)))*.2
7630          PLOT Zaman_u,Son_temp
7640          PLOT Art,Son_temp
7650          GOTO Birsonrasi
7660      ELSE
7670          Zaman=((Son_temp-Sicaklik(X-1))/(Sicaklik(X)-Sicaklik(X-1)))*.25+
7680      Art-.25
7690      PLOT Zaman,Son_temp
7700      PLOT Art,Son_temp
7710      GOTO Birsonrasi
7720  END IF
7730  Birsonrasi:
7740  Art=Art+.25
7750  NEXT X
7760  SUBEND
7770  !
7780  SUB Hiz_arttir
7790  COM Deger,Deger1,Say1,Bilgi$(*),Kom_hiz,Fan_hiz,Bayrak2,Fan_cal,Kom_boy$,D
eger2,Kir_boy$,Kir_hiz
7800  Deger=Deger+.1
7810  IF Deger>10 THEN
7820      Deger=10
7830  END IF
7840  Deger$=VAL$(Deger)
7850  String$="APPLY DCV 202,"&Deger$
7860  OUTPUT 709:String$
7870  PRINT TABXY(70,13),". "
7880  PRINT TABXY(70,13),Deger
7890  SUBEND
7900  !
7910  SUB Hiz_azalt
7920  COM Deger,Deger1,Say1,Bilgi$(*),Kom_hiz,Fan_hiz,Bayrak2,Fan_cal,Kom_boy$,K
ir_hiz,Kir_boy$,Deger2
7930  Deger=Deger-.1
7940  IF Deger<.1 THEN
7950      Deger=0
7960  END IF
7970  Deger$=VAL$(Deger)
7980  String$="APPLY DCV 202,"&Deger$
7990  OUTPUT 709:String$
8000  PRINT TABXY(70,13),". "
8010  PRINT TABXY(70,13),Deger
8020  SUBEND
8030  !
8040  SUB Kom_yukle
8050  COM Deger,Deger1,Say1,Bilgi$(*),Kom_hiz,Fan_hiz,Bayrak2,Fan_cal,Kom_boy$,K
ir_hiz,Kir_boy$,Deger2
8060  Deger1=Deger+.10
8070  IF Deger1>7 THEN
8080      Deger1=7
8090  END IF
8100  Deger1$=VAL$(PROUND(Deger1,-2))
8110  !String1$="APPLY DCV 200,"&Deger1$
8120  String1$="APPLY DCV 201,"&Deger1$
8130  IF Kom_boy$="1-2" THEN
8140      Kom_hiz=45.2382*Deger1
8150      ! Kom_hiz=37.345806451*Deger1
8160  ELSE
8170      IF Kom_boy$="4-5" THEN
8180          Kom_hiz=43.4703*Deger1
8190          !Kom_hiz=35.57032258*Deger1
8200      ELSE
8210          Kom_hiz=Deger1
8220      END IF
8230  END IF
8240  PRINT TABXY(54,14),". "
PRINT TABXY(70,14),". "

```

```

8250 PRINT TABXY(54,14),PROUND(Kom_hiz,0),TABXY(70,14),PROUND(Deger1,-1)
8260 OUTPUT 709:String1$
8270 SUBEND
8280 !
8290 SUB Kom_azalt
8300 COM Deger,Deger1,Say1,Bilgi$(*),Kom_hiz,Fan_hiz,Bayrak2,Fan_cal,Kom_boy$,K
ir_hiz,Kir_boy$,Deger2
8310 Deger1=Deger1-.10
8320 IF Deger1<.5 THEN
8330 Deger1=0
8340 END IF
8350 Deger1$=VAL$(PROUND(Deger1,-2))
8360 !String1$="APPLY DCV 200,"&Deger1$
8370 String1$="APPLY DCV 201,"&Deger1$
8380 IF Kom_boy$="1-2" THEN
8390 Kom_hiz=45.2382*Deger1
8400 !Kom_hiz=37.345806451*Deger1
8410 ELSE
8420 IF Kom_boy$="4-5" THEN
8430 Kom_hiz=43.4703*Deger1
8440 !Kom_hiz=35.57032258*Deger1
8450 ELSE
8460 Kom_hiz=Deger1
8470 END IF
8480 END IF
8490 PRINT TABXY(54,14)," "TABXY(70,14)," "
8500 PRINT TABXY(54,14),PROUND(Kom_hiz,0),TABXY(70,14),PROUND(Deger1,-1)
8510 !PRINT TABXY(54,16),PROUND(Kir_hiz,0),TABXY(70,16),PROUND(Deger2,-1)
8520 OUTPUT 709:String1$
8530 SUBEND
8540 !
8550 SUB Enis_acik
8560 COM Deger,Deger1,Say1,Bilgi$(*),Kom_hiz,Fan_hiz,Bayrak2,Fan_cal,Kom_boy$,K
ir_hiz,Kir_boy$,Deger2
8570 Bilgi$(Say1)="F0"&TIMES$(TIMEDATE)
8580 Fan_cal=TIMEDATE
8590 OUTPUT 709;"CLOSE":105
8600 SUBEND
8610 !
8620 SUB Alarm_off
8630 OUTPUT 709;"OPEN":115
8640 PRINT TABXY(38,18)," "
8650 SUBEND
8660 !
8670 SUB Den_start
8680 COM Deger,Deger1,Say1,Bilgi$(*),Kom_hiz,Fan_hiz,Bayrak2,Fan_cal,Kom_boy$,K
ir_hiz,Kir_boy$,Deger2
8690 OUTPUT 709;"OPEN":108
8700 Deger=Fan_hiz
8710 Deger$=VAL$(Deger)
8720 Dizi$="APPLY DCV 202,"&Deger$
8730 OUTPUT 709:Dizi$
8740 PRINT TABXY(70,13)," "
8750 PRINT TABXY(70,13),Deger
8760 Bilgi$(Say1)="D8"&TIMES$(TIMEDATE)
8770 Bayrak2=1
8780 SUBEND
8790 !
8800 SUB Fan_on
8810 SUBEND
8820 !
8830 SUB Ekler
8840 BEEP 300..5
8850 SUBEND
8860 !
8870 SUB Fmis_kapali
8880 COM Deger,Deger1,Say1,Bilgi$(*),Kom_hiz,Fan_hiz,Bayrak2,Fan_cal,Kom_boy$,K
ir_hiz,Kir_boy$,Deger2
8890 OUTPUT 709;"OPEN":105
8900 Fan_dur=TIMEDATE
8910 IF (Fan_dur-Fan_cal)<=60 THEN
8920 Bilgi$(Say1)="EMIS FANI"
8930 ELSE
8940 Bilgi$(Say1)="FS"&TIMES$(TIMEDATE)
8950 END IF
8960 SUBEND
8970 !
8980 SUB Basleme
8990 COM Deger,Deger1,Say1,Bilgi$(*),Kom_hiz,Fan_hiz,Bayrak2,Fan_cal,Kom_boy$,K
ir_hiz,Kir_boy$,Deger2
9000 Bilgi$(Say1)="K0"&TIMES$(TIMEDATE)
9010 Deger1$=VAL$(PROUND(Deger1,-2))
9020 Dizi1$="APPLY DCV 201,"&Deger1$
9030 !Dizi1$="APPLY DCV 200,"&Deger1$
9040 OUTPUT 709:Dizi1$
9050 SUBEND

```

```

9060 SUB Kirec_arttir
9070 COM Deger,Deger1,Say1,Bilgi$(*),Kom_hiz,Fan_hiz,Bayrak2,Fan_cal,Kom_boy$,D
eger2,Kir_boy$,Kir_hiz
9080 Deger2=Deger2+10
9090 IF Deger2>7 THEN
9100 Deger2=7
9110 END IF
9120 Deger2$=VAL$(PROUND(Deger2,-2))
9130 String2$="APPLY DCV 200,"&Deger2$
9140 IF Kir_boy$=".3-.6" THEN
9150 Kir_hiz=36.03*Deger2
9160 ELSE
9170 IF Kir_boy$=".6-1.0" THEN
9180 Kir_hiz=38.22*Deger2
9190 ELSE
9200 Kir_hiz=Deger2
9210 END IF
9220 END IF
9230 PRINT TABXY(54,20)," ",TABXY(70,20)," "
9240 PRINT TABXY(54,20),PROUND(Kir_hiz,0),TABXY(70,20),PROUND(Deger2,-1)
9250 OUTPUT 709:String2$
9260 SUBEND
9270 !
9280 SUB Kirec_azalt
9290 COM Deger,Deger1,Say1,Bilgi$(*),Kom_hiz,Fan_hiz,Bayrak2,Fan_cal,Kom_boy$,D
eger2,Kir_boy$,Kir_hiz
9300 Deger2=Deger2-10
9310 IF Deger2<.1 THEN
9320 Deger2=0
9330 END IF
9340 Deger2$=VAL$(PROUND(Deger2,-2))
9350 String2$="APPLY DCV 200,"&Deger2$
9360 IF Kir_boy$=".3-.6" THEN
9370 Kir_hiz=40.34*Deger2
9380 ELSE
9390 IF Kir_boy$=".6-1.0" THEN
9400 Kir_hiz=38.22*Deger2
9410 ELSE
9420 Kir_hiz=Deger2
9430 END IF
9440 END IF
9450 PRINT TABXY(54,20)," ",TABXY(70,20)," "
9460 PRINT TABXY(54,20),PROUND(Kir_hiz,0),TABXY(70,20),PROUND(Deger2,-1)
9470 OUTPUT 709:String2$
9480 SUBEND

```

ÖZGEÇMİŞ

1960 yılında İstanbul'da doğdu. 1979 yılında Saint-Benoit Fransız Erkek Lisesinden mezun oldu. 1980 yılında girdiği İ.T.Ü Kimya-Metalurji Fakültesi'nden 1984 yılında Kimya Mühendisliği derecesi aldı. Aynı yıl İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Ana Bilim dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. 1416 sayılı kanun ile Sağlık ve Sosyal Yardım Bakanlığı adına açılan yurt dışı burs sınavını kazanarak İngiltere'de Leeds Üniversitesi Yakıt ve Enerji Bölümünde 1985-1986 yılları arasında 'Çevre Kirliliği Kontrolü ' dalında yüksek lisans (Msc) derecesi aldı. 1987 yılında yurda dönerek mecburi hizmetini Marmara Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümünde tamamladı. Aynı yıl içinde İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalında doktora öğrenimine başladı. 1990 yılından bu yana İ.T.Ü Kimya Mühendisliği Bölümü Temel İşlemler Ana Bilim Dalında araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.