

ALEVSİZ YANMA TEKNOLOJİSİNİN YANMA SİSTEMLERİNDE ORTAYA ÇIKAN NO_x EMİSYONLARININ AZALTILMASINDA BİR YÖNTEM OLARAK KULLANILMASI

İ. Bedii Özdemir *

Önsıtma ile gerçekleştirilen yanma süreçlerinde ortaya çıkan NO emisyonunun azaltılması, doruk sıcaklıkların düşürülmesi veya yüksek sıcaklıklı bölgelerdeki oksijen derişiminin ya da buralarda kalınma sürelerinin azaltılması yöntemleri ile gerçekleştirilebilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar atıkgaz geri besleme yöntemlerinin doruk alev sıcaklıklarının düşürülmesinde oldukça etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Atıkgazların alev yukarısına üçüncü bir tepkime bileşeni olarak katıldığı bu yöntemde, işlem sıcaklıkları kendi kendine tutuşabilirlik sıcaklığının üstüne çekilebilirse, geri besleme oranları yüzde yüzün üstünde büyüklüklerde gerçekleştirilebilmektedir. Bu koşullarda alev yakıcıdan ayrılıp uzaklaşmasına rağmen, tepkime işmasız olarak ve yakıcının oldukça aşağısında gerçekleşebilmektedir. Bu durum birim hacimdeki yanma şiddetini azaltırken, yanmaya bağlı sıcaklık artışını da kimyasal kinetikten bağımsız kılabilmektedir. Bütün bunlar bir yandan nsıtmanın doruk alev sıcaklıkları üzerindeki olumsuz etkilerini azaltırken diğer yandan ısıl NO oluşumunun verimlilik artışı üzerindeki sınırlayıcılık etkisini de tmyle ortadan kaldırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alevsiz yanma, NO_x ıktısı azaltılması, Aerodinamik yakıcılar.

The methods to reduce NO emission are, therefore, based on schemes to reduce either peak flame temperature or the residence time and oxygen concentration in zones with high temperature. Recent studies have shown that flue gas recirculation is indeed the most successful scheme to reduce peak flame temperature. In this method, flue gases are introduced upstream as a third component to dilute the fuel/air mixture. When process temperatures are above the self ignition temperature, rate of flue gas recirculation can be pushed up to a value as high as 100%. Under this condition, flame is lifted off but combustion reaction can still continue further downstream with quite diminished visibility. This also leads to the reduction of burning intensity, resulting in temperature rise due to reaction less dependent on chemical kinetics. With the elimination of the adverse effects of preheating on the peak flame temperatures, the thermal NO formation becomes no longer a proviso for improving the thermal efficiency.

Keywords: Flameless combustion, NO_x reduction, Aerodynamic burners)

GİRİŐ

Doğal kaynakların sınırlı olmasına bağlı sık sık yaşanan enerji darboğazlarının ulusal ekonomilere verdiği zararlar ve yanısıra yanma çıktılarının küresel iklimde neden olduğu değişiklikler, fosil bazlı yakıtların yaygın kullanımı için geliştirilmiş teknolojileri tartışılır hale getirmiştir (Bowman 1992; Chomiak *vd.* 1992). Özellikle son yıllarda gittikçe bilinçlenen kamuoyu, verimlilikleri arttırılmış vre dostu yanma sistemlerinin geliştirilmesi istemleriyle yakıcı ve yanma odası tasarımcıları üzerindeki baskılarını arttırmaktadır. Atıkgazlardaki kullanılamayıp atılan enerjinin bir kısmının yanma havasının nsıtılması yoluyla geri kazanılmasının özellikle yüksek sıcaklıklı işlemler gerektiren endüstriyel uygulamalar ve fırınlarda verimliliği büyük lde arttırarak enerji tasarrufu sağladığı bilinmektedir (Hanby 1994; Tanaka 1995). Ancak nsıtmanın artması ile iyileşen verimliliğe karşı, artan yerel doruk sıcaklıklar ve alev kararsızlıkları, ısıya dayanımlı malzemelerde ısıl yorulma türü sorunlar yaratmakla kalmayıp, yanısıra NO_x oluşumunu da kabul sınırlarının üstüne çıkarmaktadır (Flamme 1994; Milani 1994a). Kısacası, verimliliğin arttırılması ve NO_x oluşumunun önlenmesi ilk bakışta birbirleriyle çelişir gzmektedir (Bell ve Warren 1983).

NO_x OLUŞUMU VE AZALTILMASI İÇİN KULLANILAN YAYGIN YÖNTEMLER

Hidrojen ve doğalgaz gibi temiz sınıflandırılan yakıtların yanmasında bile açığa çıkıyor olması nedeniyle, nitrikoksit vre kirletici gazların başlıcalarından sayılmaktadır (Hayhurst ve Lawrence 1992). Yanma ortamında nitrikoksitlerin temelde üç ana süreç yoluyla oluştuğu bilinmektedir (Miller ve Bowman 1989; Turns 1995). Bunlar;

1) Yakıt bazlı NO oluşumu,

2) Kimyasal NO oluşumu ve

3) Isıl bazlı NO oluşumu.

Nitrikoksidin açığa çıktığı başlıca süreç olan ısıl-NO oluşumunda, havadaki oksijen, yakıt ile değil yine havadaki nitrojen gazı ile yüksek sıcaklıklarda Zeldovich süreci (Zeldovich 1946) olarak bilinen yolla tepkimeye girmektedir. Bu süreçte yanma ürünlerinin 1600°C ve üstü sıcaklıklarda birkaç saniye, 2000°C ve üstü sıcaklıklarda birkaç milisaniye kalması yeterli olabilmektedir (Wüning ve Wüning 1997). Bu nedenle, ısıl-NO oluşumu özellikle önısıtmaya bağlı gelişen yüksek yerel sıcaklıklarda ağırlık kazanmaktadır.

NO gazı çıkışını düşürebilmek amacıyla uygulanan yöntemler genelde ortam içinde belirli noktalarda oluşan doruk sıcaklıkların düşürülmesi, bu bölgelerde kalınma sürelerinin kısaltılması veya bu bölgelerdeki oksijen derişiminin azaltılması yollarını seçmektedir (Garg 1994; Wood 1994). Su veya su buharı püskürtülerek veya soğutma çubukları (Şekil 1) ile yanma ortamından enerji çekilmesi ilkesine dayanan ve alev soğutma olarak tanımlanan yöntemlerde bir yandan ortam sıcaklıkları düşürülürken, bir yandan da buralarda kalınma süreleri azaltılmaktadır (Teng ve Huang 1996). Ancak yanma tepkimesinin tamamlanamaması sonucu istenmeyen oranda CO açığa çıkması, NO_x oluşumunu azaltmak uğruna uygulanmasına rağmen bu yöntemin getirdiği yeni bir olumsuzluk olmaktadır. Aşamalı yanma, NO salgılanmasını azaltma yönünde kullanılan bir başka yöntem olup, birincil yanma bölgesinde yakıt/hava karışımı yakıt-fazla olacak biçimde hazırlanır. Yanma ürünlerinin atıkgazların geri beslenmesi ile veya taşınımıyla soğutulmasının ardından ikincil yanma bölgesinde düşük sıcaklıklarda yakıt-eksik karışım yakılır. Aşamalandırmanın hem hava (Spliethoff *vd.* 1996), örneğin şekil 2, hem de yakıt (Smart ve Morgan 1994) sunumu üzerinden yapılabildiği bu yöntemde, son derece karmaşık ve pahalı araçların kullanımı gerektiği için, iyileştirme amacıyla da yapılsa, yatırımların geri ödenme süresi uzamaktadır.

ALEV SEYRELTİLMESİ YÖNTEMİ VE ALEVSİZ YANMA

Son yıllarda yapılan araştırmalar, örneğin Mastorakos *vd.* (1993), “atıkgazlarının geri beslenmesi” uygulamalarının doruk alev sıcaklıklarının düşürülmesi ve böylece NO oluşumunun önlenmesi açısından en etkili yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yöntemde, inert özellikteki atıkgazlar alev içine doğrudan karıştırılmak yerine alev yukarısındaki taze hava/yakıt karışımına üçüncü bir bileşen olarak katılırlar. Bunun sonucu gelişen yanma, temelde üç bileşenli bir tepkime olup, yerel alev sıcaklıkları, atıkgaz geri besleme oranının artmasıyla azalarak 1200°C düzeyine kadar düşebilmektedir. Bu yöntem, atıkgazların alev gerisine katılma yöntemine bağlı olarak dıştan veya içten geri besleme olarak sınıflandırılmaktadır. İçten geri besleme, yakıcının ve ortamın akış özellikleri kullanılarak sağlanır ve bu uygulama ek bir düzenek gerektirmemesi nedeniyle verimliliği olumsuz etkilemez.

Gerek önkarışımli ve gerekse önkarışimsız yanmada, kararlı alev için gerekli koşulların akış ve alev hızları arasındaki hassas denge ve yakıt derişimi ile ilintili olduğu bilinmektedir. Akış alanında helisel döngü veya küt cisimle sağlanan durgunluk bölgelerinde elde edilebilen bu koşullar (şekil 3), yakıcı tasarımları için belirleyici olmaktadır. Ancak alev kararlılığının yalnızca yakıcıdan kaynaklanan akış niteliklerinin değiştirilmesi ile sağlanması, yakıcı yakınlarında çok yüksek yerel sıcaklıkları ve bunlara bağlı ısıl-NO oluşumunu da beraberinde getirmektedir. Üstelik, örneğin doğal gaz yanma odalarında, ortam sıcaklığının 750°C'nin altında olduğu değerlerde yakıcı tarafından hazırlanan yakıt/hava karışımının düzenli yanmak yerine patlama türü bir tepkime ile ısı açığa çıkardığı ve bunun da yanma odasında ciddi titreşim ve gürültü sorunları yarattığı

bilinmektedir (Lang *vd.* 1987; Mcmanus *vd.* 1993). Oysa ki, eğer işlem sıcaklıkları kendi kendine tutuşma sıcaklığının üstünde sıcaklıklara çekilebilirse (Flamme ve Kremer 1995) yanma, yakıt ve hava dışında, geri beslenen atıkgazın üçüncü bileşen olarak katıldığı bir ortamda, patlama ve yakıcı yakınında kararlı alev olmaksızın da gerçekleşebilmektedir. Yanmanın çok yüksek atıkgaz geri besleme oranları ile bile gerçekleşebildiği bu durumda, alev kararsızlığı sorun olmaktan çıkmaktadır (Wünning 1991). Hızla geliştirilmekte olan bu türden alev seyreltme yöntemleri, özellikle ölçeklendirilmiş geri-kazanımlı doğalgaz yakıcılarında büyük başarı sağlamıştır (Dupont *vd.* 1993; Milani 1994b). Alevsiz yanma olarak da tanımlanan bu yöntem sayesinde yüksek sıcaklık gerektiren ısı işlemlerde %50'ye varan yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir. Burada ‐alevsiz yanma‐ deyimini, tepkime bölgesinde morötesi de dahil gözle görünür bir ışımaya olmamasından kaynaklanmaktadır (Telger ve Roth 1995). Alevli yanmada, tutuşabilirlik limitleri ile %30 dolaylarında sınırlanan içten geri besleme oranları (Zabetakis 1965), kendi kendine tutuşabilirlik sıcaklığının üstünde sıcaklıklarda gerçekleşen alevsiz yanma durumunda %100'ün üstünde değerlerde gerçekleştirilebilmektedir. Yüksek geri beslemeli alevsiz yanmadaki en önemli teknolojik kazanım birim hacimdeki tepkime şiddetinin alevli yanmaya oranla çok düşük olmasıdır. Böylesi bir tepkime sonucu gelişen sıcaklık artışları, kimyasal kinetikten bağımsız ve birkaç yüz Kelvin ile sınırlı kalmaktadır. Önsıtmanın yerel doruk sıcaklıklar üzerine etkisinin azalmasıyla ısı-NO oluşumunun verimlilik artışı üzerindeki sınırlayıcılığı ortadan kalkmaktadır (Wünning ve Wünning 1992). Bu nedenle içten geri besleme alevsiz yanma yönteminin belkemiğini oluşturmaktadır denebilir. Kaldı ki, alev yüzeyinde bulunan HC köklerine bağlı gelişen kimyasal NO oluşumu da alevin ortadan kalkmasıyla büyük oranda azalmaktadır (Heard *vd.* 1992; Kohse-Höinghaus 1994). Bütün bunların sonucu, alevli yanmada en iyi olasılıkla 60 ppm olabilen NO_x derişimi, alevsiz yanmada 6 ppm değerlerine düşebilmektedir (Wünning ve Wünning 1995). Ayrıca alevli yanma durumunda kullanılabilir işlem sıcaklıkları yanma ortamındaki doruk sıcaklıklardan çok düşük gerçekleşirken, alevsiz yanmada yakıcı ekseninde yerel sıcaklıklar, atıkgaz sıcaklığından düşük kalmakta ve en önemlisi sistem çıkışında CO'e rastlanılmamaktadır.

Alevsiz yanmada görünür alev olmadığı için kararsızlığı da söz konusu değildir. Bu nedenle alev kararlılığı nedeniyle yakıcı tasarımı ve yanma üzerine getirilen sınırlamalar büyük ölçüde kalkmakta ya da azalmaktadır. Öyle ki, düşük sıcaklıklarda yakıcıya bitişik veya hemen yakınında kararlı hale getirilmeye çalışılan alevin, çok miktarda atıkgazın bileşen olarak tepkimeye girdiği alevsiz yanma yönteminde yakıcıya değer durumda veya yakınında olmasından kasıtlı olarak kaçınılmaktadır. Bu nedenle alevli yanmanın tersine, alevsiz yanmada alevdeki kararsızlıklara bağlı gelişen gürültü tamamen ortadan kalkmaktadır. İçten geri beslemeli bir sistemde, alevin yakıcıya bitişik veya yakınında ayrık durumda olduğu yanma durumlarında sırasıyla 92 ve 98 dB(A) olabilen gürültü düzeyinin, alevsiz yanmada 82 dB(A) değerine kadar düşebildiği görülmüştür (Plessing *vd.* 1998). Sistemde yanma olmaksızın yalnızca hava akışına ait gürültü düzeyinin 78 dB(A) olduğu göz önüne alınırsa, alevsiz yanma ile elde edilen kazanım daha açık görülebilmektedir.

ALEVSİZ YANMA İÇİN YAKICI/YANMA ODASI TASARIMLARINDA AERODİNAMİĞİN ÖNEMİ

İşım tüplerinin yaygın kullanımı, bu tüplerin içindeki yanma olayının daha yakından incelenmesi gereğini ortaya koymuştur. Ters reaktör olarak sınıflandırılabilir bu tür yanma ortamlarında, tepkime bileşenlerinin sunumu ve atıkgazların ortam dışına atılmaları yanma odasının aynı tarafından ve geometrik olarak iç içe konumdaki aralıklardan yapılmaktadır. Son derece hassas bir aerodinamik tasarım gerektiren bu tür yanma odalarında, hava/yakıt sunumunun merkezde ve birden fazla noktadan yapılmasıyla yakıcının hemen aşağısındaki akış daha da

karmaşıklştırılmaktadır. Ancak, çalkantı düzeyinin büyük ölçekli yapılar ağırlıkta olacak şekilde arttırılmasıyla bu bölge ve etrafında karışım verimliliği de artmakta ve sonucunda, yanma odası dışına atılmak üzere tüp çeperini yalayarak bu bölgeye ilerleyen atıkgazları merkezdeki yakıt/hava sunum akışı içine çekilmeleri kolaylaşmaktadır. Özetle, alevsiz yanma uygulamalarının ucuz tutulabilmesi için atıkgaz geri beslemesinin içten yapılması gereklidir ki, bu da ancak titiz bir aerodinamik tasarımla gerçekleştirilebilir.

Sözö edilen sistemlere tipik bir örnek şekil 4'da verilmektedir (Özdemir 1999). Dikey konumlandırılmış yanma odası, tabandaki çok noktadan sunumlu yakıcı kafasından değişik uzaklıklarda açılmış quartz pencereleriyle optik incelemeyi olanaklı kılmaktadır. Yakıcı eksenini boyunca yükselen akış, tavandan dönerek yan duvarlar üzerinden tekrar tabana yönelmekte ve buradan ortam dışına atılmaktadır. Yüksek önısıtmayı olanaklı kılan bu sistemin çok-sunumlu yakıcı kafası alevli ve alevsiz yanma durumlarında şekil 5'de görüntölenmiştir. Bu resimler açıkça ortaya koymaktadır ki, alevli yanmada alkor halini almış yakıcı kafası (şekil 5.a), tepkimenin yakıcı aşığısında ve alevsiz gerçekleştiği durumda soğumakta ve gözle görölebilir bir ışımaya olmaması nedeniyle kendi renginde algılanmaktadır (şekil 5.b). Alevsiz yanmada görünür alev olmadığı için tepkime bölgesinin özellikleri ancak yanma sonrası açığa çıkan OH derişimi ile araştırılabilmektedir. Şekil 6'daki resimler yakıt/hava denklik oranının (ϕ) 1 olduğu önkarışimsız bir yanma durumu için yakıcı aşığısında değişik z yüksekliklerinde 35×25 mm'lik pencerelerden Laser Induced Predissociative Fluorescence (LIPF) olarak adlandırılan yöntemle çekilmiş morötesi ışık saçılımı görüntöleri olup bu bölgelerdeki anlık iki boyutlu OH derişimi dağılımlarına karşılık gelmektedir. Buradaki bir dizi anlık görüntünün ortaya koyduğu eğilim yakıcının $z=112$ mm akış aşığısında başlayan yanma sürecinin gittikçe şiddetlenerek $z=312$ mm uzaklıkta en belirgin düzeyine ulaştığı yönündedir ki, aynı yöntemle elde edilen birçok anlık görüntünün verdiği ortalama izlenim de bunu doğrular niteliktedir. Ağırlıklı olarak yakıcı eksenini yakınında sınırlı bir bölgede gerçekleşen tepkimenin, akış içindeki büyük ölçekli çalkantı yapılarıyla arasında eksen dışına taşındığı gözlemlenmektedir. Ayrıntılı çalışmalar yukarıda tanımlanan tepkime sürecinin yakıt/hava denklik oranının birden küçük veya büyük oluşuna göre aşığıya ya da yukarıya ötelendiğini, ama her durumda yakıcı kafasından uzaklarda oluştuğunu göstermiştir; diğer bir deyimle yakıt-eksik durumda tepkime yakıcı kafasına daha yakın başlarken, yakıt-fazla durumda tepkime kafadan uzaklaşmaktadır. Alevsiz yanma teknolojisi yakıt/hava sunumunun önkarışimli olarak gerçekleştirildiği durumlarda da uygulanabilir olmakla birlikte, tepkime bölgesi önkarışimsız aynı ϕ değerleri için bulunduğu konumdan yakıcıya daha yakın gerçekleşmektedir. Tepkime bölgesinden LIPF ölçümleri ile eşzamanlı olarak Rayleigh Saçılımı yöntemi ile elde edilen iki boyutlu sıcaklık dağılımları daha düzgün yani, yerel yüksek sıcaklıkların olmadığı bir görünüm ortaya koymaktadır. Kısacası atıkgazların yanma öncesinde tepkimeye giren bileşenlere katılmasıyla birim hacimde gerçekleşen yanma şiddeti alevli yanmaya oranla büyük ölçüde azalmakta ve dolayısıyla yanma sonucu sıcaklık artışları oldukça sınırlı kalmaktadır ki, ısı-NO oluşumunun azalmasıdaki gizem de burada yatmaktadır.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Eritme süreçlerinin çok büyük hassasiyet gerektirdiği özellikle demir-çelik ve cam endüstrilerinin ısı işlem fırınlarının yüksek sıcaklıklarda çalışmakta oldukları bilinmektedir. Atıkgazların doğal olarak yüksek sıcaklıkta olduğu bu birimlerde kirlilik yaratmak kaygısıyla önısıtma yapılmazsa işlem enerjisinin büyük kısmı baca gazlarıyla kullanılmadan atılarak verimlilik büyük oranda düşmekte, bu da işletme giderlerini katlayarak arttırmaktadır. Konuyla ilgili çalışmalar göstermektedir ki, sözü geçen endüstrilerde, alevsiz yanma yönteminin kullanımı halinde işletme

giderleri %50'ye varan oranlarda azalabileceği gibi NO_x çıktısı da tek haneli rakamlara düşebilecektir.

Öte yandan enerji gereksinimini karşılamak üzere yüzünü Orta Asya doğal kaynaklarına çeviren ülkemiz, özellikle son yıllarda, buralardan boru hatlarıyla taşınacak doğalgaz ile enerji üretimi stratejisi geliştirmektedir. Kurulan doğalgaz çevrim santrallerinin yakın gelecekte çevresel endişeler nedeniyle ağır kamuoyu baskısına maruz kalabilecekleri göz önüne alınırsa, zaman içinde gelişebilecek sorunlara çözüm bulabilmek amacıyla gaz türbinleri konusunda yerli teknolojinin hızla geliştirilmesi ve bu konuda üzerinde çalışılan yeniliklerin yakından takip edilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu alanda yakıt-eksik ve önkarişimli yanma, özellikle gaz türbinleri için son yıllarda tercih edilir olmuştur (Saul ve Altemark 1991; Döbbelling *vd.* 1996). Yanmanın soğutmasız ve neredeyse adyabatik koşullarda gerçekleştiği bu durumda karışımın kendi kendine tutuşma ve alevin geriye yürümesi riskleri büyüktür ve bu nedenle çok fazla önısıtma yapılamamaktadır (Mcvey *vd.* 1993). Son yıllarda yapılan araştırmalar, alevsiz yanmanın önkarişimsiz durumda olduğu gibi önkarişimli durumda da başarıyla uygulanabileceğini (Özdemir 2000) ve yöntemin bu yönüyle gaz türbinleri uygulamalarında da sorunsuz kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

1. **Bell, C. T. & Warren, S.** 1983 Experience with burner NO_x reduction, *Hydrocarbon Processing*, September, 145-147.
2. **Bowman, C. T.** 1992 Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions: technology driven by regulation, *24th Symposium on Combustion*, July 25-30, Sydney, Australia.
3. **Chomiak, J., Longwell, J. P. & Sarofim, A. F.** 1992 Combustion of low calorific value gases, problems and prospects, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **15**, 109-129.
4. **Döbellling, K., Knöpfel, H. P., Polifke, W., Winkler, D., Steinbach, C. & Sattelmayer, T.** 1996 Low-NO_x premixed combustion of Mbtu fuels using the ABB double cone burner (EV burner), *J. Engineering For Gas Turbines and Power*, **118**, 46-53.
5. **Dupont, V., Pourkashanian, A., Williams, A. & Wooley, R.** 1993 The reduction of NO_x in natural gas burner flames, *Fuel*, **72**, 497-503.
6. **Flamme, M.** 1994 NO_x output from industrial burners using combustion air preheating or oxygen enrichment, *Round Table Committee F, 19th World Gas Conf.*, Milan, June.
7. **Flamme, M. & Kremer, H.** 1995 NO_x-reduction potential of high temperature processes, *International Gas Research Conference*, Cannes, France.
8. **Garg, A.** 1994 Specify better Low-NO_x burners for furnaces, *Chem. Eng. Prog.*, January, 46-49.
9. **Hanby, V. I.** 1994 *Combustion and Pollution Control in Heating Systems*, Springer-Verlag, Berlin.
10. **Hayhurst, A. N. & Lawrence, A. D.** 1992 Emissions of nitrous oxide from combustion sources, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **18**, 529-552.
11. **Heard, D. E., Jeffries, J. B., Smith, G. P. & Crosley, D. R.** 1992 LIF measurements in methane/air flames of radicals important in prompt-NO formation, *Combust. Flame*, **88**, 137-148.
12. **Kohse-Höinghaus, K.** 1994 Laser techniques for the quantitative detection of reactive intermediates in combustion systems, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **20**, 203-279.

13. Lang, W., Poinso, T. & Candel, S. 1987 Active control of combustion instabilities, *Combust. Flame*, **70**, 281-289.
14. Mastorakos, E., Taylor, A. M. & Whitelaw, J. H. 1993 Turbulent counterflow flames with reactants diluted by hot products, *Joint Meeting of the British and German Sections*, The Combustion Institute, Cambridge.
15. Mcmanus, K. R., Poinso, T. & Candel, S. M. 1993 A review of active control of combustion instabilities, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **19**, 1-29.
16. Mcvey, J. B., Padget, F. C., Rosfjord, T. J., Hu, A. S., Peracchio, A. A., Schlein, B. & Tegel, D. R. 1993 Evaluation of low-NO_x combustor concepts for Aeroderivative gas turbine engines, *J. Engineering For Gas Turbines and Power*, **115**, 581-587.
17. Milani, A. 1994a NO_x emissions from gas fired reheating furnaces for steelmaking plants, *Round Table Committee F, 19th World Gas Conf.*, Milan, June.
18. Milani, A. 1994b NO_x emission reduction in the E. C.: Gas firing, *COMETT-CALENER Short Course*, Brussels and Milan, October-November.
19. Miller, J. A. & Bowman, C. T. 1989 Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **15**, 287-338.
20. Özdemir, İ. B. 1999 Reduction of NO_x emission with strong internal flue gas recirculation as an application of flameless oxidation, Alexander von Humboldt vakfi tarafından desteklenen araştırma projesi.
21. Özdemir, İ. B. & Peters, N. 2000 Characteristics of the reaction zone of a combustion flow with reduced flame visibility, *Experiments in Fluids* Dergisinde yayınlanmak üzere sunulmuş makale.
22. Plessing, T., Peters, N. & Wüning, J. G. 1998 Laseroptical investigation of highly preheated combustion with strong exhaust gas recirculation, *28th International Symposium on Combustion*, 2-7 August, Boulder, USA.
23. Saul, A. & Altemark, D. 1991 Lean-burn premixed combustion in gas turbine combustors, *Gas Wärme International-40*, 336.
24. Smart, J. P. & Morgan D. J. 1994 The effectiveness of multi-fuel reburning in an internally fuel-staged burner for NO_x reduction, *Fuel*, **73**, 1437-1442.
25. Spliethoff, H., Greul, U., Rüdiger, H. & Hein, K. R. G. 1996 Basic effects of NO_x emissions in air-staging and reburning at a bench-scale test facility, *Fuel*, **75**, 560-564.
26. Tanaka, R. 1995 New progress of energy saving technology toward the 21st century: frontier of combustion and heat transfer technology, *11th IFRF Members Conference*, June.
27. Telger, R. & Roth W. 1995 Betriebserfahrung beim Einsatz von Brennern mit flammloser Oxidation, *Gas Wärme International-44*, 332-337.
28. Teng, H. & Huang, T-S. 1996 Control of NO_x emissions through combustion modifications for reheating furnaces in steel plants, *Fuel*, **75**, 149-156.
29. Turns, S. T. 1995 Understanding NO_x formation in nonpremixed flames: Experiments and Modeling, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **21**, 361-385.
30. Wood, S. C. 1994 Select the right NO_x control technology, *Chem. Eng. Prog.*, January, 32-38.
31. Wüning, J. 1991 Flammenlose Oxidation von Brennstoff mit hochvorgewärmter Luft, *Chem.-Ing.-Tech.*, **63**, 1243-1245.

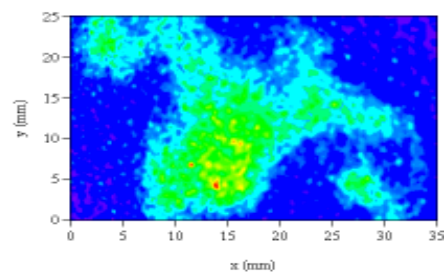
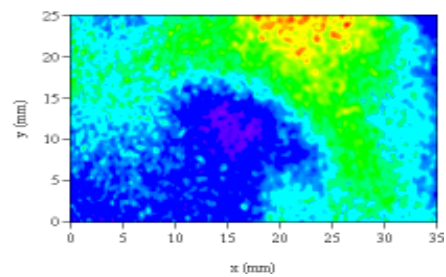
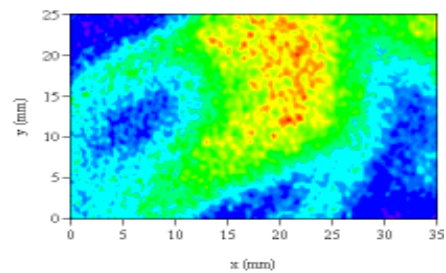
32. Wüning, J. A. & Wüning, J. G. 1992 Burners for flameless oxidation with low NO_x formation even at maximum air preheating, *Gas Wärme International-41*, **10**, 438-444.

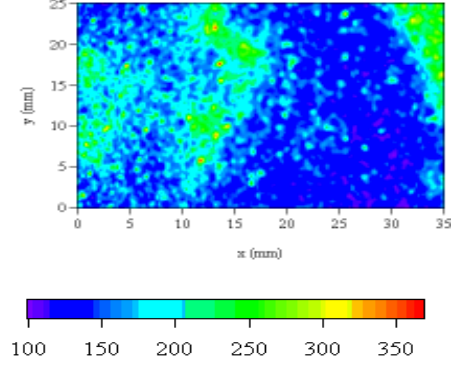
33. Wüning, J. A. & Wüning, J. G. 1995 Regenerative burner using flameless oxidation, *International Gas Research Conference*, Cannes, France.

34. Wüning, J. A. & Wüning, J. G. 1997 Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **23**, 81-94.

35. Zabetakis, M. G. 1965 Flammability characteristics of combustible gases and vapours, *Bulletin 627, Bureau of Mines, U.S.A.*

36. Zeldovich, J. 1946 The oxidation of nitrogen in combustion and explosions, *Acta Physicochimica U.R.S.S.*, **XXI**(4), Academy Science of the USSR.





OH derişim renk göstergesi (birimsiz)

Şekil 6. Önkarişimsız $\phi = 1$ Yanma Durumu İçin LIPF Yöntemi İle Saptanan Tepkime Bölgesinin Yakıcı Aşağısındaki Gelişimi

