

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YOĞUŞMALI KAZANLARDA, HİDROJEN TAKVİYELİ
DOĞALGAZ KULLANIMININ VERİMLİLİK, PERFORMANS VE
GÜVENLİĞE OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Volkan TÜR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YOĞUŞMALI KAZANLARDA, HİDROJEN TAKVİYELİ
DOĞALGAZ KULLANIMININ VERİMLİLİK, PERFORMANS VE
GÜVENLİĞE OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Volkan TÜR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ekrem BÜYÜKKAYA

HAZİRAN 2024

Volkan TÜR tarafından hazırlanan “YOĞUŞMALI KAZANLARDA, HİDROJEN TAKVİYELİ DOĞALGAZ KULLANIMININ VERİMLİLİK, PERFORMANS VE GÜVENLİĞE OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 28.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Unvan Adı SOYADI**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Unvan Adı SOYADI (Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Unvan Adı SOYADI**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Unvan Adı SOYADI**
(Gerekliyse) Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Unvan Adı SOYADI**
(Gerekliyse) Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “YOĞUŞMALI KAZANLARDA, HİDROJEN TAKVİYELİ DOĞALGAZ KULLANIMININ VERİMLİLİK, PERFORMANS VE GÜVENLİĞE OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../20.....).

(imza)

Volkan TÜR



TEŞEKKÜR

Birçok ülkede tartışma ve kısmi uygulama aşamasında olan doğal gaz sistemlerine belli oranlarda hidrojen ilave edilmesi konusu, Türkiye doğalgaz sektörü tarafından yoğun bir şekilde takip edilmektedir. 157 bin kilometrelik şebeke uzunluğu ve Avrupa'nın en büyük altıncı gaz dağıtım şebekesine sahip Türkiye genç, modern dağıtım şebekesi ve düşük kayıp oranları ile hidrojen ekonomisine geçişin en kolay sağlanabileceği ülkelerden biri olacaktır.

Bu tez çalışmasında, ülkemizde ev ve ticari binaların ısıtılmasında kullanılan yoğunmalı kazanlarda, belli yüzde oranlarında hidrojen takviyeli doğalgaz kullanımının etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Öncelikle tez konusunu seçerken isteklerimi göz önünde bulunduran ve hazırlığının her aşamasında bana yardımcı olan tez danışmanım Prof. Dr. Ekrem Büyükkaya'ya, sektördekiengin tecrübeleri ile bana her daim iyi birer öğretmen olan yöneticilerim Serhan Kılıç, Hideya Suyama ve Aydın Tuna'ya, son olarak süreçte bana desteğini esirgemeyen, başta Can Bulut ve Oğuz Kosova olmak üzere Daikin Türkiye Ar-Ge Merkezi'ndeki çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Volkan TÜR



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vii
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Duvar Tipi Yoğuşmalı Kazanlar	4
1.1.1. Çalışma prensibi	4
1.1.2. Temel bileşenler	6
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	11
2.1. Metan ve Hidrojenli Karışım Gazı Üzerine Yapılan Proje Çalışmalarının İncelenmesi	11
2.1.1. Clean Gas Türkiye projesi	11
2.1.2. Hydeploy projesi	12
2.1.3. Thyga projesi	13
2.2. Temel Yanma ve Gaz Özellikleri	14
2.3. Yanma Sıcaklıkları	19
2.4. Yanma Stokiyometrisi	21
2.5. Laminer Alev Hızı ve Alev Geri Tepmesi	23
2.5.1. Laminer alev hızı	23
2.5.2. Alev geri tepmesi	27
2.6. Baca Gazı Emisyonları	27
2.7. Diğer	30
3. DENEYSEL ÇALIŞMA HAZIRLIKLARI	33
3.1. Test Edilecek Ürünün Tanıtımı	33
3.2. Test Standının Tanıtımı	35
3.3. Hata Analizi ve Yapılacak Testlerin Belirlenmesi	37
4. TEST SONUÇLARI VE SONUÇ ÖZETLERİ	43
4.1. 1, 2 ve 3 Numaralı Testlerin Sonuçları	43
4.2. 4 Numaralı Testin Sonucu	46
4.3. 5 Numaralı Testin Sonucu	46
4.4. 6 Numaralı Testin Sonucu	47
5. SONUÇLARIN YORUMLANMASI	49
5.1. Ürün Performansı	49
5.2. Ürünün Devreye Alınması	50
5.3. Güvenlik	51
5.4. Diğer	52

KAYNAKLAR.....	53
EKLER.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	1



KISALTMALAR

BKD	:Brüt kalorifik değer
CARI	:Combustion Air Requirement Index (Yanma hava ihtiyacı indeksi)
FMEA	:Failure modes and effects analysis (Hata modu ve etki analizi)
GAD	:Gas Appliance Directive (Gaz Yakan Cihazlar Direktifi)
GAR	:Gas Appliance Regulation (Gaz Yakan Cihazlara Dair Yönetmelik)
LOI	:Limit oxygen index (Limit oksijen indeksi)
NKD	:Net kalorifik değer



SİMGELER

λ	:Hava fazlalık katsayısı
Ws	:Wobbe İndeksi (MJ/m ³)
φ	:Eşdeğerlilik oranı
Hs	:Brüt kalorifik değer (MJ/m ³)
Hi	:Net kalorifik değer (MJ/m ³)
d	:Bağıl yoğunluk
$\rho_{n,yakıt}$	:Yakıt yoğunluğu (kg/m ³)
$\rho_{n,hava}$	:Hava yoğunluğu (kg/m ³)
Tyakıt	:Yakıt sıcaklığı (°C yada K)
Thava	:Hava sıcaklığı (°C yada K)
SL	:Laminer alev hızı (cm/s)
u	:Yakıt ve yakıcı karışımın akış hızı (cm/s)
Tad	:Adyabatik yanma sıcaklığı (°C)



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Test edilecek kombiye ait ana komponentlerin bilgileri.	34
Tablo 3.2. Test standına ait parçalar ve özellikleri.	36
Tablo 4.1. Kapasite, emisyon ve verime ilişkin özet test sonuçları.	43
Tablo 4.2. Alev geri tepme testi sonuçları.	46





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. 2020’de milyon kJ enerji başına farklı yakıtlardan salınan CO ₂ (kg).	2
Şekil 1.2. Yoğuşmalı duvar tipi kazanın şematik gösterimi.	5
Şekil 1.3. Temsili gaz valfi (A) ve fan görselleri (B).	6
Şekil 1.4. Temsili ventüri (A) ve brülör (B) görselleri.	7
Şekil 1.5. Temsili ateşleme elektrodu (A) ve iyonizasyon elektrodu (B) görselleri.	8
Şekil 1.6. Temsili ana eşanjör (A) ve yoğuşma sifonu (B) görselleri.	9
Şekil 2.1. Karışımdaki hidrojen oranının minimum hava ihtiyacı, net ve brüt kalorifik değerler üzerindeki etkisi. (Tüm değerler 15 °C için verilmiştir).....	16
Şekil 2.2. Çeşitli CH ₄ /H ₂ karışımlarının kütle bazlı kalorifik değerleri ve yoğunluğu.	17
Şekil 2.3. Metana hidrojen karışımının bir fonksiyonu olarak ana gaz kalite kriterlerinin değişimi.	19
Şekil 2.4. Hava fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak saf CH ₄ , %50 CH ₄ / %50 H ₂ ve saf H ₂ 'nin adyabatik yanma sıcaklıkları. (T _{yakıt} = 300K, T _{hava} = 300K, p = 1 atm)	20
Şekil 2.5. Hidrojen karışımının $\lambda = 1$ 'de adyabatik yanma sıcaklığı üzerindeki etkisi. (T _{yakıt} = 300K, T _{hava} = 300K, p = 1 atm)	20
Şekil 2.6. Hidrojen karışımının farklı yanma sistemlerinin stokiyometrisi üzerindeki etkisi.	21
Şekil 2.7. Yakıt ve yakıcı karışımın akış hızı u ve laminar alev hızı S _L [11].	23
Şekil 2.8. CH ₄ (sol taraf) ve H ₂ 'nin (sağ taraf) laminar yanma hızları [13].	25
Şekil 2.9. Eşdeğerlik oranının bir fonksiyonu olarak farklı karışımlar için laminar alev hızları [13].	25
Şekil 2.10. Hava fazlalık katsayısının bir fonksiyonu olarak farklı karışımlar için laminar alev hızları (Odaklanmış).	26
Şekil 2.11. Metan, hidrojen ve CH ₄ /H ₂ için hava fazlalık katsayısının bir fonksiyonu olarak teorik CO emisyonları.	28
Şekil 2.12. Metan, hidrojen ve CH ₄ /H ₂ için hava fazlası oranının bir fonksiyonu olarak teorik CO ve NO emisyonları [10].	28
Şekil 2.13. Metan / hidrojen karışımlarının yanması sonucu CO ₂ emisyonlarının değişimi ($\phi=1$).	30
Şekil 3.1. Test edilecek kombiye ait gerçek ürün görseli.	33
Şekil 3.2. Test edilecek kombiye ait ana komponentlerin görseli.	34
Şekil 3.3. Test standının şematik gösterimi.	35
Şekil 4.1. Modülasyon aralığı boyunca ısı girdisinin değişimi.	44
Şekil 4.2. Modülasyon aralığı boyunca CO ₂ ve CO emisyonlarındaki değişim.	44
Şekil 4.3. Modülasyon aralığında hava fazlalık katsayıları.	45
Şekil 4.4. Modülasyon aralığında iyonizasyon akımları.	46
Şekil 5.1. İlk cihaz ayarının hava fazlalık katsayısı (λ) üzerindeki etkisi.	51



YOĞUŞMALI KAZANLARDA, HİDROJEN TAKVİYELİ DOĞALGAZ KULLANIMININ VERİMLİLİK, PERFORMANS VE GÜVENLİĞE OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Gaz sektörünün karbondan arındırılması için en umut verici alternatif yakıtlar biyogaz ve hidrojenidir. Fosil yakıtları karbon içermeyen yakıtlarla değiştirmek, nihai karbon nötrlüğü hedefine ulaşmak için önemli bir adımdır. Doğrudan mevcut doğal gaz enerji sistemlerinden saf hidrojene geçmek yerine, doğal gaza kademeli olarak hidrojen takviye edilmesi, sorunsuz bir geçiş sağlayabilir.

Birçok ülkede tartışma ve kısmi uygulama aşamasında olan doğal gaz sistemlerine belli oranlarda hidrojen ilave edilmesi konusu, Türkiye doğalgaz sektörü tarafından yoğun bir şekilde takip edilmektedir. 157 bin kilometrelik şebeke uzunluğu ve Avrupa'nın en büyük altıncı gaz dağıtım şebekesine sahip Türkiye genç, modern dağıtım şebekesi ve düşük kayıp oranları ile hidrojen ekonomisine geçişin en kolay sağlanabileceği ülkelerden biri olacaktır.

Bu tez çalışmasında, ülkemizde ev ve ticari binaların ısıtılmasında kullanılan yoğunmalı kazanlarda, belli yüzde oranlarında hidrojen takviyeli doğalgaz kullanımının etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Tez kapsamında, günümüzde geçerli olan Avrupa Normlarına uygun şekilde tasarlanmış ve üretilmiş duvar tipi yoğunmalı kombinin sahada doğalgaz yerine %20 hidrojen takviyeli doğalgaz ile kullanılmasının olası etkilerinin hem teorik hem de deneysel olarak incelendi.

Teorik inceleme kapsamında, şebeke gazına belirli oranlarda hidrojen ilavesinin yakıt olarak kullanılan gazın fiziksel özelliklerine olası etkileri değerlendirildi. Ayrıca hidrojen takviyeli yakıt kullanımının ürünün performans ve güvenliğini etkileyebilecek olan sitokiyometri, alev hızı ve baca gazı emisyonlarında yaratacağı olası etkiler incelendi.

Teorik incelemenin akabinde deneysel çalışmaya hazırlık kapsamında test edilecek ürün ve test düzeneği tanıtıldı, yapılan hata modu ve etki analizi sonucunda planlanan testlerin amaç ve koşulları açıklandı.

Tezin konusuna uygun olarak planlanan testler yapıldı. Bu test sonuçları, şebeke hazına hidrojen takviyesinin ürün performansına, ürünün devreye alınmasına, ürün ve kullanıcı güvenliğine diğer bazı hususlara olası etkileri göz önüne serecek şekilde yorumlandı.

Sonuç olarak, günümüzde geçerli olan standart ve regülasyonlara uygun olarak ve sahada doğalgaz ile çalışmak üzere tasarlanan ve üretilen duvar tipi kombilerin, sahada saf doğalgaz yerine %20 hidrojen takviyeli bir karışım gazıyla çalışmasının ürün performansına olan olumsuz etkilerinin göz ardı edilebilecek kadar az olduğu ve ayrıca bu durumun ürün ve kullanıcı güvenliğini de tehlikeye sokacak bir etkisi bulunmadığı tespit edildi.



EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF HYDROGEN-SUPPLEMENTED NATURAL GAS USAGE IN CONDENSING BOILERS ON EFFICIENCY, PERFORMANCE, AND SAFETY

SUMMARY

Climate change is one of the most critical global issues of our time. Natural gas is one of Europe's primary energy sources today, used in various sectors including electricity generation, industry, and individual consumption. Since natural gas is a fossil fuel, it is known to be significantly responsible for CO₂ emissions, a greenhouse gas.

The most promising alternative fuels for decarbonizing the gas sector are biogas and hydrogen. Producing hydrogen from electricity obtained from renewable energy sources and water allows not only meeting energy demands but also storing the produced energy by keeping hydrogen in a liquid state. Replacing fossil fuels with carbon-free fuels is an essential step towards achieving ultimate carbon neutrality. Gradually adding hydrogen to natural gas instead of switching directly from existing natural gas energy systems to pure hydrogen can ensure a smooth transition.

The addition of hydrogen to natural gas systems, a topic currently under discussion and partial implementation in many countries, is being closely monitored by the Turkish natural gas sector. With a network length of 157,000 kilometers and Europe's sixth-largest gas distribution network, Turkey, with its young, modern distribution network and low loss rates, will be one of the easiest countries to transition to a hydrogen economy.

The purpose of this thesis is to theoretically and experimentally examine the effects of using hydrogen-blended natural gas on the efficiency, performance, and safety of condensing wall-mounted boilers by selecting a model currently sold in Turkey and Europe and designed and certified to be compatible with natural gas.

It is known that the fuel and combustion properties of the new mixture will change compared to pure natural gas when hydrogen is added to natural gas. Considering that methane and hydrogen have significantly different chemical and physical properties, the increase in hydrogen addition to natural gas will lead to changes in the combustion process due to changes in fuel properties.

Within the scope of the thesis, the possible effects of using 20% hydrogen-blended natural gas instead of natural gas in a wall-mounted condensing combi boiler designed and produced in accordance with current European Norms were examined both theoretically and experimentally.

In the theoretical examination, the possible effects of adding hydrogen to the network gas on the physical properties of the gas used as fuel were evaluated. In addition, the possible effects of using hydrogen-blended fuel on the product's performance and safety, including stoichiometry, flame speed, and flue gas emissions, were examined.

Following the theoretical examination, the product to be tested and the test setup were introduced, and the purposes and conditions of the planned tests were explained as a result of the failure mode and effects analysis conducted.

Tests planned in accordance with the subject of the thesis were carried out. These test results were interpreted to reveal the possible effects of hydrogen addition to network gas on product performance, product commissioning, product and user safety, and other aspects.

In the theoretical examination, it was predicted that the calorific value of hydrogen gas is lower than that of methane, thus the thermal power obtained from the mixture gas would decrease. A 5% difference was calculated between the Wobbe indices of 100% CH₄ and gas mixtures containing 20% H₂. Therefore, it was expected that the thermal power would decrease by at least 5% under complete combustion conditions. As a result of the tests, it was observed that the thermal power decreased by 5% at minimum capacity and 4.0% at maximum capacity. Accordingly, the results of the theoretical examination and experimental study are consistent.

In the theoretical examination, it was predicted that CO₂ emissions would decrease in parallel with the reduction in the proportion of methane, a carbon-based fuel, in the combustion reaction, and this was confirmed by the test results. Accordingly, the results of the theoretical examination and experimental study are consistent.

Regarding CO emissions, the prediction was that they would decrease due to the increasing excess air coefficient, provided the flame remains stable. During the tests, it was confirmed that the increased excess air coefficient did not negatively affect flame stabilization, and the flame was formed stably, thus not increasing CO emissions. Therefore, it was observed that CO emissions decreased as predicted. Accordingly, the results of the theoretical examination and experimental study are consistent.

The prediction regarding NO_x formation in the theoretical examination was that NO_x emissions would be more dependent on combustion chamber temperatures and the presence of oxygen in these hot regions rather than fuel content. Although the expectation was for a decrease, it was more in need of confirmation compared to CO and CO₂ emissions. The tests showed that the already high excess air coefficient further increased with hydrogen addition, balancing the adiabatic combustion temperatures that would rise due to fuel properties, and resulting in a decrease in NO_x emissions. Accordingly, the results of the theoretical examination and experimental study are consistent.

In the theoretical examination, it was expected that increasing the hydrogen ratio in the combustion gas would lead to different effects, both reducing and increasing efficiency. The extent to which these effects would balance each other could not be predicted. The calculated combustion efficiencies for pure natural gas and the mixture gas from the test results were almost the same. Therefore, as predicted, the efficiency-increasing and decreasing effects balanced each other, and adding 20% hydrogen to the fuel did not positively or negatively affect the combustion efficiency of the device.

Flame flashback tests were successfully conducted, and no issues were observed.

It was observed that adding 20% hydrogen to natural gas did not create a measurable leakage risk.

As a result, it was determined that the negative effects of operating wall-mounted boilers designed and produced to work with natural gas in the field with a 20% hydrogen-blended mixture gas on product performance are negligible and that this situation does not pose a risk to product and user safety..





1. GİRİŞ

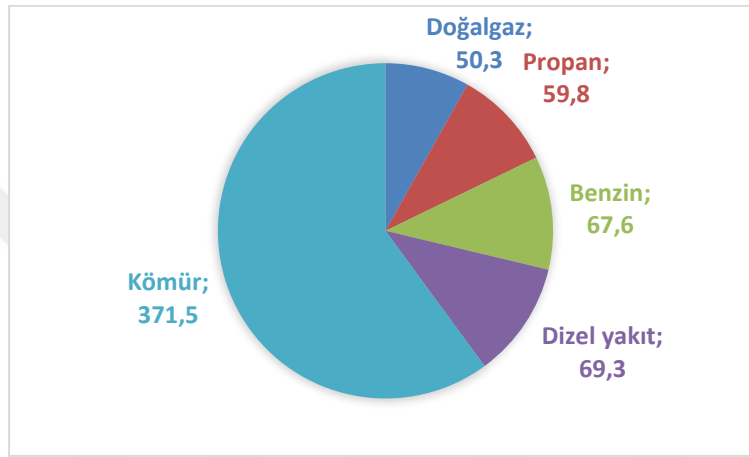
İklim değışikliği günümüzün en önemli küresel sorunlarından biridir. Başta karbondioksit (CO₂) olmak üzere sera gazı emisyonları sebebiyle artan küresel ısınma, insanlığın şu anda karşı karşıya olduğu önemli bir iklim sorunudur. Hükümetler Arası İklim Değışikliği Panelinin Altıncı Değerlendirme Raporu, sera gazlarının dünya atmosferine hali hazırda sert önlemler alınmaksızın geriye döndürülemeyecek bir hasara uğrattığına dair ciddi bir uyarıyla sona ermektedir [1]. Sera gazı emisyonları genellikle enerjinin kullanımı ve tedariki ile yakından ilişkili olduğundan, emisyonları önleme hedefi, üretimden son kullanıma kadar enerji zincirinin tüm parçalarını içeren sisteminin temelden yeniden yapılandırılmasını gerektirir.

Doğal gaz, elektrik üretimi, sanayi ve bireysel kullanım da dahil farklı alanlarda kullanımıyla bugün Avrupa'nın birincil enerji kaynaklarından biridir. Doğal gaz bir fosil yakıt olduğundan, bir sera gazı olan CO₂ emisyonundan ciddi ölçüde sorumlu olduğü bilinmektedir. Şekil 1.1'de, fosil yakıtlardan elde edilen CO₂ emisyon miktarları gösterilmektedir. Buna göre; benzin, üretilen milyon kJ enerji başına 67,6 kg CO₂, doğal gaz 50,3 kg CO₂ ve kömür 371,5 kg CO₂ üretmekte ve doğaya salmaktadır [2]. Doğada bileşik halinde yani su olarak bulunan hidrojen, yakıt olarak kullanıldığı zaman atmosfere sadece su ve/veya su buharı olarak salınır. Dolayısıyla hava kirliliğine sebep olan karbonmonoksit (CO) veya sera etkisine sebep olan CO₂ gibi gazları yaymaz.

Doğal gaz, diğer geleneksel enerji kaynaklarından daha yüksek bir enerji içeriğine sahiptir ve ayrıca taşınması daha kolaydır. Bu da onu endüstriyel ve bireysel ısıtma, ulaşım ve elektrik üretimindeki uygulamalar için tercih edilen bir yakıt haline getirir. Bugün itibariyle konut ve ticari alanlar, tahmini 300 milyondan fazla kurulu cihaz sayısı dikkate alındığında Avrupa Birliği kapsamında doğal gaz için en büyük kullanım alanıdır [3].

Gaz sektörünün karbondan arındırılması için en umut verici alternatif yakıtlar biyogaz ve hidrojenidir. Geri dönüştürülebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik ve sudan hidrojen üretmek, enerji taleplerini karşılamanın yanı sıra üretilen hidrojenin

sıvı halde muhafaza edilmesi yoluyla üretilen enerjinin depolanmasını da mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla, enerjiyi hidrojene çevirip depolamaya ve kullanmaya yönelik teknolojiler, yeni bir altyapı gerektirmeksizin mevcut gaz dağıtım alt yapısının bu amaç doğrultusunda kullanılabilir olması da dikkate alındığında Avrupa'nın enerji dönüşümünde önemli bir rol oynayabilir. Bununla birlikte, dağıtılan gazın fiziksel özelliklerinin değişiyor olması, bunu yakıt olarak kullanan kombi, ocak, şofben, doğalgaz sobası vb. çok çeşitli son kullanım uygulamalarının kontrolü ve doğrulanmasını gerektirmektedir.



Şekil 1.1. 2020’de milyon kJ enerji başına farklı yakıtlardan salınan CO₂ (kg).

Fosil yakıtları karbon içermeyen yakıtlarla değiştirmek, nihai karbon nötrlüğü hedefine ulaşmak için önemli bir adımdır. Doğrudan mevcut doğal gaz enerji sistemlerinden saf hidrojene geçmek yerine, hidrojenin doğal gazla kademeli olarak karıştırılması, sorunsuz bir geçiş sağlayacağı ifade edilmektedir [4]. Küresel olarak akademik kurumlar, endüstri ve hükümetler (İngiltere’de HyDeploy, Amerika’da HyBlend, Fransa’da GRHYD, Avrupa’da THyGA) önümüzdeki on yıl içinde karbon azaltma hedefine ulaşmak için verimli yollar geliştirmeye çalışan diğer projeler gibi hidrojen ilavesine yönelik projelerinin araştırmasını, geliştirilmesini ve uygulanmasını desteklemektedir. Türkiye’de Gazbir-Gazmer, Cleangas projesi altında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu desteğiyle bu konudaki projesini hali hazırda yürüttüğü bilinmektedir [5].

Gazbir-Gazmer de dahil olmak üzere yukarıda örnekleri projelerin içerikleri dikkate alındığında, hidrojene geçiş için izlenmesi hususunda otoritelerin mutabık kaldığı yaklaşım temelde aşağıdaki adımları içermektedir [5].

- İlk önce doğalgaza belirli orana kadar hidrojen eklenerek oluşturulan karışım gazının dağıtımı için mevcut altyapının kullanılması,
- Saf hidrojene geçiş için zorlukların ve alınması gereken aksiyonların araştırılması,
- Altyapı ve cihazlarda belirlenen gerekli revizyon ve geliştirmelerin tamamlanması
- Karışımındaki hidrojen miktarının zaman içerisinde aşamalı olarak arttırılarak %100'e çıkarılması

Bunlardan ilkinin ele alırsak; mevcut doğalgaz hattında taşınmasının risk oluşturmayacağına yönelik yapılan araştırmaların neticesinde (Örneğin: Birleşik Krallık Sağlık ve Güvenlik Dairesi Araştırma Raporu [6]), İngiltere başta olmak üzere Türkiye'nin de dahil olduğu birçok ülkenin planı, ilk adım olarak %20 oranında hidrojen eklenmiş karışım gazının kullanılmaya başlanması olacaktır. %20'lik üst sınırı belirleyen diğer bir motivasyon ise, ilgili standart gereği 1999 yılından itibaren üretilen CE onaylı gaz yakan cihazların, belgelendirme esnasında yapılan bazı güvenlik testlerinin, zaten %23 oranında hidrojen içeren bir sınır gaz ile yapılıyor olmasıdır [7].

Mevcut altyapının, teknolojilerin ve kullanılan cihazların hidrojen gibi yeni bir yakıtı veya bir ara adım olarak hidrojen-doğalgaz gibi yeni karışımlara uygun olması gerekir. Mevcut gaz dağıtımına hidrojen katkısı, şebekelere bağlı tüm gaz kullanan ekipmanları etkileyecektir. Bu cihazlar mevcut durumda yakıt olarak doğal gaz kullanarak güvenli, verimli ve düşük emisyonlarla çalışacak şekilde tasarlanıp optimize edilmiştir.

Bu tezin amacı, hali hazırda Türkiye ve Avrupa'da satışı yapılan ve doğalgaz ile uyumlu olarak tasarlanıp belgelendirilen bir ani ısıtıcılı yoğunmalı duvar tipi kazan modelini seçerek, yoğunmalı kazanlarda hidrojen takviyeli doğalgaz kullanımının verimlilik, performans ve güvenliğe olan etkilerinin teorik ve deneysel olarak incelenmesidir.

Ürünün tabi olduğu EN standardına uygun olarak doğalgaz ile yapılacak verimlilik, performans ve güvenlik testlerinin sonuçları; hacimsel olarak 20% oranında hidrojen içeren bir doğalgaz-hidrojen karışımli gaz ile testler yapılarak karşılaştırılacaktır.

Testler öncesinde, yakıt olarak kullanılan doğalgazın içerisine hidrojen eklenmesinin olası sonuçlarını tahmin/tespit etmek ve gerekliyse ilave test ve kontrolleri belirlemek

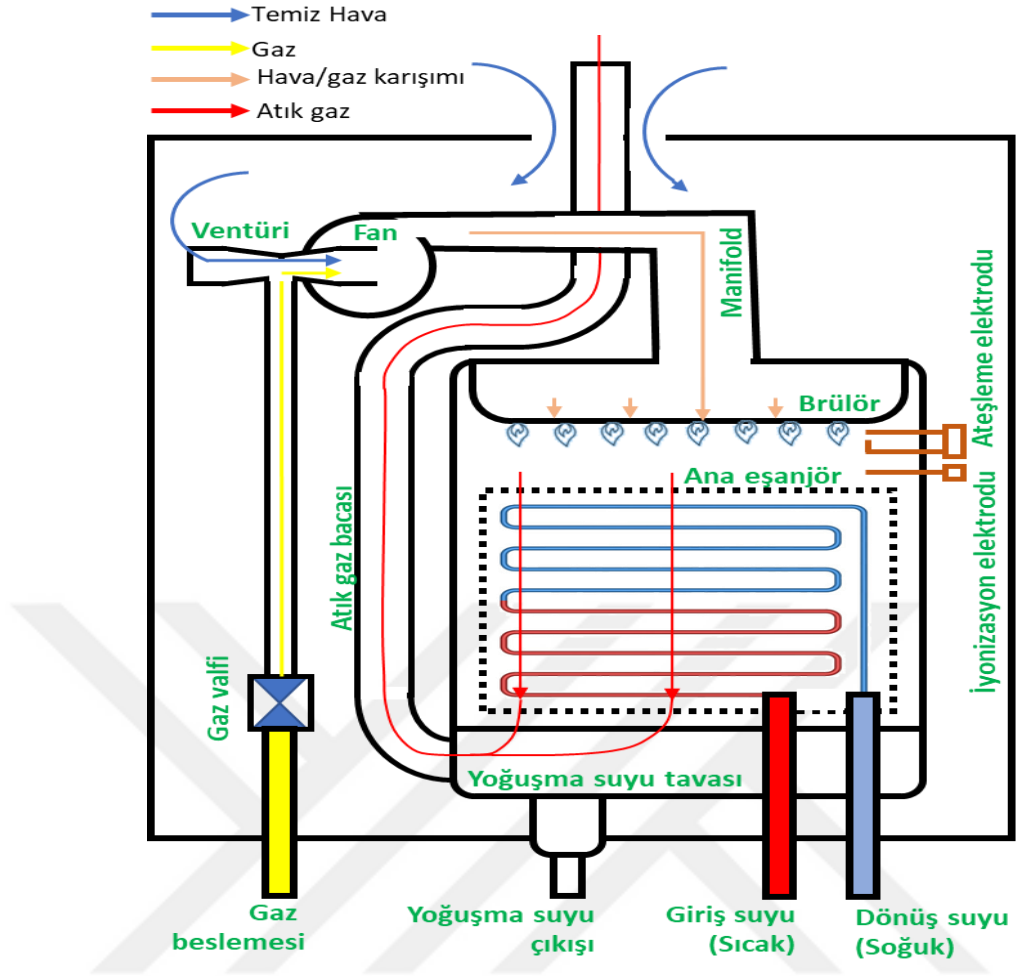
adına hata modu ve etki analizi yapılacaktır. Yoğuşmalı kazanların ana komponentleri ve çalışma parametreleri detaylıca açıklanacak ve yakıt değişiminin bu komponent ve parametrelere olası etkileri incelenecektir.

1.1. Duvar Tipi Yoğuşmalı Kazanlar

1.1.1. Çalışma prensibi

Ön karışıklı bir gaz kazanının temel çalışma prensibi Şekil 1.2'deki şemada gösterilmiştir.

Hava-yakıt karışımını yanma havasına tedarik eden ve temel ana bileşen olan fan çalıştığı zaman hermetik kabin içerisinden taze hava emişi başlar. Aynı zamanda fanın çalışmasıyla birlikte gaz valfinin çıkış kısmında da bir negatif basınç oluşturulur ve yakıt olarak kullanılacak gaz, gaz valfinden geçer ve fan tarafından çekilir. Fan tarafından çekilen taze hava ve gaz, manifold adı verilen karıştırma bölgesinde karıştırılır. İyice karıştırılmış yakıt/hava karışımı, delikli bir metal yüzeyden oluşan brülör yüzeyine ulaşır. Karışım, brülör üzerinde bulunan deliklerden yanma odasına hareket eder ve ateşleme elektrodu sayesinde yanma gerçekleşir. Çalışma sırasında, önceden karıştırılmış yakıt/hava karışımının akış hızı ve brülör yüzeyindeki laminar yanma hızı birbirini dengeleyerek kararlı bir alev oluşmasını sağlar. Brülör üzerinde geniş bir yüzey alanı, çok sayıda küçük laminar alevle kaplıdır.



Şekil 1.2. Yoğuşmalı duvar tipi kazanın şematik gösterimi.

Bir güvenlik elemanı olan iyonizasyon elektrodu burada alevin varlığını tespit eder ve şayet alev kararlı bir şekilde oluşmuşsa yanma devam eder. Yanma sonucu oluşan sıcak atık gazlar, ana eşanjör vasıtasıyla suyu ısıtmak için kullanılır. Isınan bu su, direk olarak mahal ısıtmada ya da bir plakalı eşanjör veya boyler yardımı ile kullanım sıcak suyu temin etmek için kullanılır.

Yanma odasında ısınıp kaybederek soğuyan atık gazlar, atık gaz bacası vasıtasıyla dışarıya atılır. Bu sırada atık gaz içerisinde gaz halinde bulunan su molekülleri de soğumanın etkisiyle yoğuşur ve sıvı haline geçer. Sıvı halindeki bu yoğuşma suyu, yanma odasının alt kısmında bulunan yoğuşma suyu tavaşında birikir ve bir sifon vasıtasıyla kazanın dışarısına tahliye edilir. Ön karışimli yoğuşmalı kazanlarda kapasite ayarlaması temel olarak çalışma esnasında fan hızının değişmesi ile meydana gelir. Fan hızı düşük olduğunda çekilen havanın debisi ve bu debiye karşılık ventüri vasıtasıyla gaz valfinden emilen yakıtın da debisi düşecektir. Dolayısı cihaz düşük bir ısı gücünde yanacaktır. Isı ihtiyacı yüksek olduğunda ise kart tarafından kontrol edilen

fanın hızı yükselir ve artan yakıt/hava karışımı debisi ile ısı gücü artar. Alevin stabil olduğu ve kazanın sorunsuzca yanabildiği en düşük ısı gücü kazanın minimum kapasitesi, en yüksek ısı gücü kazanın maksimum kapasitesi, bu iki kapasite arasında kalan kısma cihazın modülasyon aralığı ve minimum kapasitenin maksimum kapasiteye oranına ise cihazın modülasyon oranı adı verilir.

1.1.2. Temel bileşenler

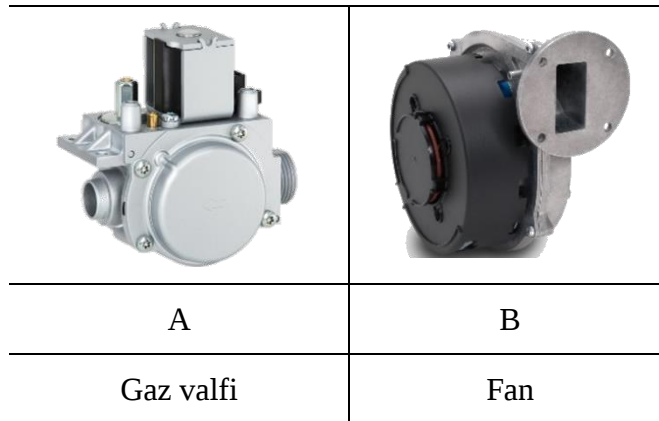
- **Gaz Valfi**

Bu parça kazanda brülöre giden gaz akışını düzenlemekle görevli bir bileşenidir. Tipik olarak gaz besleme hattı ile brülör arasında bulunur ve kazanın kontrol paneli tarafından kontrol edilir.

- **Fan**

Ön karışimli yanma söz konusu olduğunda fanın ana görevi kazanın dışından havayı çekmek, yakıtla karıştırmak, oluşan bu hava-gaz karışımını yanmak üzere brülöre göndermek ve yanma sonucu oluşan atık gazların baca vasıtasıyla kazanın dışına atmaktır.

Yanma için gerekli havanın tedarik edilmesi ve atık gazların tahliye edilmesi dışında, fanın önemli bir diğer görevi de süpürme fonksiyonlarının yerine getirilmesidir. Ön süpürme ve son süpürme, bazı ön karışimli kazanlarda bulunabilen iki tür temizleme işlevidir. Bu işlem, yanma başlamadan önce ve bittikten sonra fanı kısa bir süre çalıştıran bir fonksiyondur. Bu, yanma odasında kalan yanma gazlarının çıkarılmasına yardımcı olur ve karbon monoksit (CO) gibi zararlı maddelerin yanma odasında birikmesini önler.



Şekil 1.3. Temsili gaz valfi (A) ve fan görselleri (B).

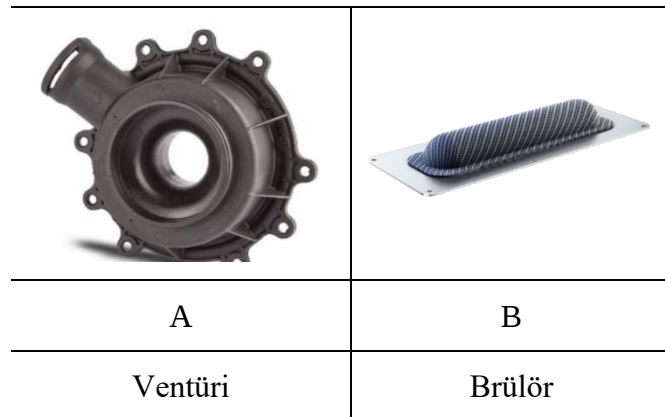
- **Ventüri**

Bu parça brülöre giden hava ve gaz akışını düzenlemekten sorumlu olan önemli bir bileşendir. Tipik olarak hava besleme hattı üzerinde bulunan bir boru veya nozuldur. Ventüri, bir akışkanın hızı arttıkça basıncının düştüğünü belirten Bernoulli ilkesine göre çalışır. Hava, ventürinin daralmış alanından geçerken hızı artar ve basıncı düşer. Basıncıdaki bu düşüş, fana girerken hava ile karışan gazı emmek için gaz valfi çıkışında bir negatif basınç oluşturmaya yarar. Dolayısı ile fan tarafından emilen hava debisi yükseldikçe, ventüri sayesinde gaz valfi çıkışında oluşturulan emiş kuvveti de yükselir ve gaz debisi de artar.

Ön karışimli yoğuşmalı kazanlarda kapasite ayarı temel olarak çalışma esnasında fan hızının değişmesi ile sağlanır. Fan hızı düşük olduğunda çekilen havanın debisi ve bu debiye karşılık ventüri vasıtasıyla gaz valfinden emilen yakıtın da debisi düşer ve böylece cihaz düşük bir ısı gücünde yanacaktır. Isı ihtiyacı yüksek olduğunda ise kart tarafından kontrol edilen fanın hızı yükselir ve artan yakıt/hava karışımı debisi ile ısı gücü artar. Diğer bir ifadeyle farklı fan hızlarında reaksiyona sokulan hava ve gaz miktarları, dolayısı ile yanma reaksiyonunun hava fazlalık katsayısı ventürinin tasarımı ile doğrudan alakalıdır.

- **Brülör**

Yanmanın gerçekleştiği bu bileşen kazandaki en kritik bileşendir. Modülasyon oranı, emisyonlar, alev kalitesi vb. yanma ile ilgili parametrelerin birçoğu doğrudan brülör tasarımı ile alakalıdır.



Şekil 1.4. Temsili ventüri (A) ve brülör (B) görselleri.

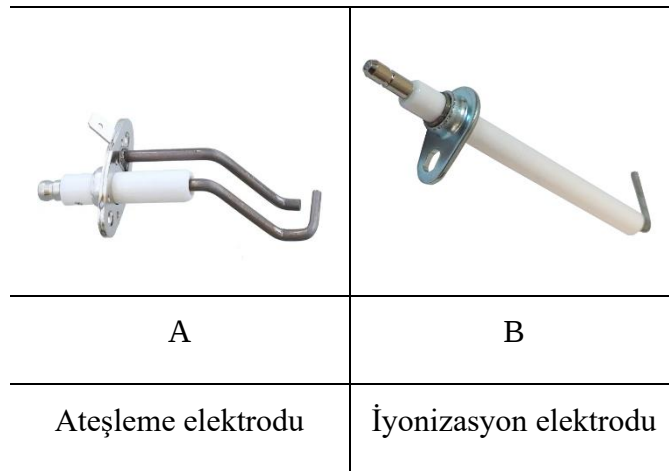
- **Ateşleme elektrodu**

Kıvılcım elektrotu olarak da bilinen ateşleme elektrotu, brülörde yanacak yakıtı tutuşturmak için bir kıvılcım üretmekten sorumlu olan kazan bileşenidir. Tipik olarak brülörün yakınına yerleştirilmiş, 2 kutbu bulunan sivri uçlu bir metal çubuk veya tel olarak üretilir. Ateşleme sistemi etkinleştirildiğinde, ateşleme elektrodu yakıtı ateşleyen ve yanma sürecini başlatan bir kıvılcım üretir. Bu kıvılcım ateşleme elektrodunun kutupları arasında oluşur.

- **İyonizasyon elektrodu**

Alev sensörü veya alev probu olarak da bilinen iyonizasyon elektrotu, brülörde alev olup olmadığını tespit etmekten sorumlu bir kazan bileşenidir. Tipik olarak brülör yüzeyine yakın bir konuma yerleştirilmiş küçük, sivri bir metal çubuk veya teldir.

Çalışma prensibi, iyonizasyon elektrodunun uç kısmı ile brülör arasında yanma esnasında oluşan elektrik iletimine dayanır. İyonizasyon elektrodu kazanın kontrol kartına bağlıdır ve kazana elektrik verildiğinde bu elektrot üzerinde bir AC besleme gerilimi oluşturulur. Elektrik iletimi katılarda serbest elektronlar vasıtasıyla gerçekleşirken, sıvı ve gazlarda iyonlar vasıtasıyla gerçekleşir. Brülörde yanma gerçekleştiğinde alevde serbest hareket eden iyonlar bir iletken görevi görür, devreyi tamamlar ve iyonizasyon elektrodu üzerindeki AC gerilim, topraklanmış olan brülöre doğru akarak bir elektrik akımı oluşturur. Kontrol kartı, oluşan bu akıma göre brülör yüzeyinde alevin oluşup oluşmadığını tespit eder. İyonizasyon elektrodu kazanın güvenli çalışmasını sağlamaya yardımcı olan çok önemli bir güvenlik elemanıdır.



Şekil 1.5. Temsili ateşleme elektrodu (A) ve iyonizasyon elektrodu (B) görselleri.

- **Ana eşanjör**

Ana eşanjör, yanma sonucu oluşan ısıнын suya aktarılmasını sağlayan, kombinin en temel parçasıdır. Tipik olarak, yanma sonucu oluşacak yüksek sıcaklıklara ve sistemin su tarafındaki yüksek basınçlara dayanabilen paslanmaz çelik, dökme demir veya alüminyum alaşımları gibi dayanıklı malzemelerden yapılır.

- **Yoğuşma sifonu**

Yoğuşmalı kombilerde, yanma odasında oluşan yoğuşma suyunun kombi dışına güvenli bir şekilde tahliye edilmelidir. Bu suyun tahliyesi esnasında ortama yanma odasından atık gaz çıkışını engellemek için bir sifon mekanizması kullanılmalıdır. Yoğuşma sifonu, yoğuşmalı kombilerde yanma odasında oluşan yoğuşma suyunu biriktirme ve kombi dışına güvenli bir şekilde tahliye etmek için kullanılan bir cihazdır. Yoğuşmalı bir kazanda, atık gazlar kazandan atılmadan önce soğutulur, bu da gazlardaki su buharının yoğuşarak sıvı forma geçmesine neden olur. Sifon, içerisinde biriken suyun yüksekliğinden kaynaklı oluşan statik basıncın, yanma odasının içerisindeki basınçtan yüksek olması prensibine dayanarak yoğuşma suyunu tahliye ederken yanma odasının içerisindeki atık gazların çevreye salınmasını önler.

	
A	B
Ana eşanjör	Yoğuşma sifonu

Şekil 1.6. Temsili ana eşanjör (A) ve yoğuşma sifonu (B) görselleri.



2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Metan ve Hidrojenli Karışım Gazı Üzerine Yapılan Proje Çalışmalarının İncelenmesi

2.1.1. Clean Gas Türkiye projesi

Clean Gas Türkiye Projesi, yenilenebilir kaynaklar kullanılarak iklim değişikliği etkilerinin azaltılması çalışmalarının yürütülmesi için 2019 yılında Gazbir-Gazmer tarafından başlatılmıştır. Gazbir-Gazmer, hidrojen ve biyogazın doğal gaz sistemlerine enjekte edilmesi ile ilgili hem laboratuvar hem de pilot bölge çalışmaları bu çatı altında yürütmüştür. [5]

Proje kapsamında, 2021 Şubat ayında Temiz Enerji Merkezinde %20 oranında hidrojen içeren doğal gaza karışımının evsel cihazlarda testlerinin başlandığı, ilk sonuçların başarılı olduğu ve asıl sonuçların uzun soluklu testler sonucunda ortaya çıkacağını açıkladı. [5]

Hazırlanan rapora göre, doğal gaza hidrojen ilave edilmesi ile Wobbe endeksi, ısı değeri, yanma aralığı ve alev geri tepme gibi gaz kalitesine ilişkin değerlerde değişiklikler meydana gelmektedir. Karışım gazının kalitesi ve güvenli kullanımı için bu değerlerin yapılan ve yapılacak çalışmalarda ele alınması gereklidir. Ayrıca rapora göre;

- Yapılan birçok çalışmada doğal gaz şebekesine herhangi bir miktarda hidrojen eklemek ısı girdisinde bir azalmaya neden olur.
- Sera gazı emisyonu noktasında, hidrojen eklenmesi olumlu sonuçlar vermektedir.
- Hidrojen ilavesi ile alev hızında da artış olmaktadır.
- Hidrojenin evde kullanımı özellikle sızıntı ve yanma riski açısından daha fazla güvenlik endişesi oluşturmaktadır.

Gazbir-Gazmer'in Konya'daki Temiz Enerji Merkezi'nde evsel cihazların hidrojen katkılı doğal gazla uyumluluğunu sağlamak için testler devam etmektedir. Sırasıyla %5, %10, %15 ve %20 hidrojen ilavesi ile gerçekleştirilen testlerin ilk sonuçları olumlu olsa da uzun soluklu testlerin yapılması gereklidir. Yakıcı cihazlar (kombi, ocak, fırın, brülör), sayaçlar, regülatörler, dişli bağlantı elemanları, polietilen ve çelik

hatlarda hidrojen enjeksiyonu sonucu oluşabilecek sorunların tek tek ele alınması ve her bir ekipman için kabul edilebilir hidrojen konsantrasyonun belirlenmesi amaçlanmaktadır. [5]

Türkiye’de yürütülen doğal gaz sistemlerine hidrojen enjekte projesinin ilk sonuçlarına göre, şu anki doğal gaz iç tesisatlarında ve tüketici cihazlarında önemli bir değişikliğe gerek kalmaksızın hidrojenin, dağıtım ağlarında doğal gazla birlikte en fazla %20 oranında karıştırılabileceği düşünülmektedir. [5]

2.1.2. Hydeploy projesi

HyDeploy projesi, İngiltere'nin hidrojenin mevcut doğal gaz dağıtım sistemine güvenli bir şekilde karıştırılmasını inceleyen ilk pratik girişimidir [8]. Temel amaç, mevcut şebekeye hidrojen karıştırılmasının, cihazlarda değişiklik yapılmasını gerektirmeden gerçekleştirebileceğini göstermektir. Bu proje, İngiltere’nin daha sürdürülebilir enerji uygulamalarına doğru bir adım olarak hidrojenle zenginleştirilmiş doğal gaz altyapısına geçişe odaklandığını göstermektedir.

Proje kapsamında Keele Üniversitesinin kazan dairesinde, İngiltere’deki başlıca üreticilerden temin edilen ikişer adet kombi, bir tanesi doğalgazla, diğeri ise %28,4 oranında hidrojen içeren karışım gazı ile çalıştırılmıştır [8]. Bazı kazanların sürekli olarak maksimum yükte, bazılarının minimum yükte ve bazılarının da bu ikisi arasında sürekli geçiş yaptığı yoğun bir çalışma rejimi tanımlanmıştır. Cihazlar, normal kullanımda 18 yıla eşdeğer gaz tüketecek şekilde hızlandırılmış bir teste tabi tutulmuştur. Bu testin akabinde cihazların tamamı, karışım gazı ile uzun süreli kullanımının cihazlara olan etkilerinin daha detaylı incelenmesi amacı ile üreticilerine iade edilmiştir.

Yapılan testlerde baca gazı ölçümlerinin yanı sıra, iç sıcaklıkların ve iyonizasyon akımlarının da ölçülmesine odaklanılmıştır. Tam yanmanın sağlandığı bu testlerde, alev karakteristiklerinin bozulmadığı gözlemlenmiştir. Beklendiği üzere, yakıtı hidrojen ilavesi ile birlikte baca gazındaki CO₂ ölçümlerinde %0,5’lik bir azalma olduğu gözlemlenmiştir [8]. Eşanjör ve brülör üzerinden alınan sıcaklık ölçümlerinde kritik olmayan seviyelerde artış gözlemlenmiştir ve bu artışın performans ya da güvenliğe olumsuz etki yaratmayacak seviyelerde olduğu raporlanmıştır.

Beklendiği üzere, alev iyonizasyon akımı yakıtı hidrojen takviyesi ile azalmıştır fakat bu azalış, ürünün çalışmasına herhangi bir olumsuz etki yaratmayacak kadar azdır.

Hava fazlalık katsayısını kontrol etmek için iyonizasyon akımını kullanan cihazlarda (aktif yanma kontrolü olan cihazlar) yanma davranışlarında bazı farklılıklar kaydedilmiştir fakat yine de güvenlik açısından riskli bir durum gözlemlenmemiştir [8].

Proje kapsamında yapılan bu temel testlerin ardından, numuneler arasından seçilen bir ürün, bu ürünün operasyonel sınırlarını anlamak için limit testlere tabi tutulmuştur. Bu test, operasyonel sorumlular ortaya çıkarana kadar yakıt bileşimindeki hidrojen oranının arttırılmasını amaçlanmıştır. Gaz karışımı içerisindeki hidrojen oranının artması, yanma hızının artışına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak laminar alev hızı, yanmamış hava-gaz karışımı hızından daha yüksek olduğunda ise alev geri tepmesi meydana gelir (bu konu tezin devamında detaylıca irdelenecektir). Yapılan limit testlerde seçilen cihazlarda, yüksek oranda hidrojen içeren gaz karışımlarında alev geri tepmelerinin yaşanma ihtimalinin arttığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak proje kapsamında yapılan bu çalışma sonucunda, test edilen ev tipi duvar tipi kombilerin, %28,4'e kadar hidrojen içeren yakıt karışımlarında güvenli bir şekilde çalışabilecekleri raporlanmıştır [8].

2.1.3. Thyga projesi

THyGA projesi, Avrupa komisyonu tarafında, mevcutta yakıt olarak kullanılan doğalgaza hidrojen takviyesinin konut ve ticari gaz yakan cihazlar üzerindeki teknik etkilerine ilişkin bilgi boşluklarını kapatmak amacıyla 2019 yılında başlatılmıştır [9].

Projenin amacı, doğal gaz ve hidrojen karışımlarının özellikle evsel ve ticari sektördeki son kullanım uygulamaları üzerindeki etkisinin ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlamak ve ayrıca edinilen tüm bilgiler ışığında gelecekte oluşturulacak standartlar ve saha uygulamaları için önerilerde bulunmaktadır [9].

THyGA projesi kapsamında yapılan teorik incelemenin sonucuna göre, doğal gaz ve hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri arasındaki önemli farklılıklar göz önüne alındığında, doğal gaza hidrojen ilavesi, konut ve ticari cihazlarda performans ve güvenlik açısından yanma süreçlerini etkileyecektir. Yakıt gazındaki hidrojen miktarının artmasıyla bu etkiler daha da belirginleşecektir. Ancak yanma prosesinin daha yüksek hidrojen seviyelerine tepkisi sadece yakıt özelliklerindeki değişime değil aynı zamanda büyük ölçüde teknolojik uygulamaya da bağlıdır. Örneğin, ön karışım

bir yanma işlemi, ön karışım olmayan bir sistemden farklı tepki verecektir ya da aktif bir yanma kontrol sisteminin varlığı da gözlenen etkilerde değişikliğe yol açacaktır.

Araştırma kapsamında CO ve NO_x emisyonları, alev sıcaklığı, geri tepme, çalışabilirlik ve verimlilik açısından analizler yapılmıştır. Doğal gazla çalışmaya kıyasla hacimce %30 hidrojen karışımında güç çıkışında %12'ye varan azalma rapor edilmiştir [9]. Ayrıca, alev geri tepme riskinin arttığı da kaydedilmiştir. Bu risk, cihazın tipine bağlıdır ve özellikle ön karışım cihazlar için daha belirgindir. Verimlilik değişikliklerinin yüzde ikinin altında olduğu beklenmektedir.

Genel olarak, konutlarda ve küçük ticari cihazlarda karşılaşılan birçok yaygın uygulama için, hidrojen karışımının farklı etkilerinin birbirini belirli bir dereceye kadar telafi ettiği sonucuna varılmıştır. Örneğin, aktif yanma kontrolü içermeyen ön karışım bir kombi ele alındığında (Avrupa Birliği ve Türkiye'deki konut tipi cihazların büyük bir bölümünü bu tip cihazlar oluşturur), hidrojen karışımı, hava fazlalık oranının daha yüksek değerlere doğru kaymasına neden olacak ve bu da laminar yanma hızının ve alev sıcaklıklarının artışı büyük ölçüde önleyecektir [9].

Genel olarak, hidrojen-doğal gaz karışımlarının dağıtımı, endüstriyel ve bireysel yanma proseslerini kısmen karbondan arındırmak için uygun bir seçenektir. Sahada kurulu tipik ürünler, güvenlik risklerine yol açmadan belirli hidrojen katkı seviyelerine kadar kullanılabilirken, özellikle yüksek hidrojen oranları söz konusu olduğunda, yeni ve farklı ürün ihtiyaçları doğacaktır.

2.2. Temel Yanma ve Gaz Özellikleri

Hidrojenin doğal gaza katılması durumunda, yeni karışıma ait yakıt özelliklerinin ve yanma özelliklerinin saf doğal gaza kıyasla değişeceği bilinen bir gerçektir. Metan ile hidrojenin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin önemli ölçüde farklı olduğu düşünüldüğünde, doğal gaza hidrojen katkısının artması, yakıt özelliklerinin değişmesinden dolayı yanma sürecinde değişikliklere yol açacaktır.

Günümüzde çalışır vaziyette olan konut ve ticari gaz cihazlarının çoğu, doğal gazla çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu aynı zamanda endüstri ve enerji üretimindeki daha büyük ekipmanlar için de geçerlidir. Bu nedenle, hidrojen karışımının bu yanma prosesleri üzerindeki etkisi, hidrojenin doğal gaz şebekelerine beslenmesinin uygulanabilirliğini değerlendirmek için önemli bir kriter olacaktır.

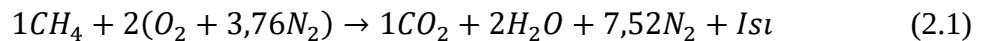
Genel olarak doğalgaz ile kullanılmak üzere tasarlanan ve üretilen cihazların herhangi bir ayar yapılmadan hidrojen ve doğal gaz karışımına maruz kaldığı varsayıldığında, cihazın çalışma performansını ve güvenliğini etkileyebilecek olası farkları belirlemek amacıyla, metan gazına hidrojen takviyesinin;

- Temel yanma ve gaz özelliklerine,
- Yanma sıcaklıklarına,
- Yanma stokiyometrisine,
- Laminer alev hızına,
- Baca gazı emisyonlarına,

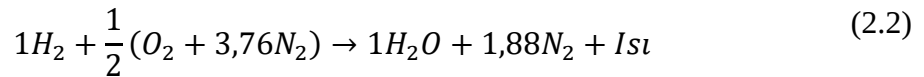
etkilerinin teorik olarak irdelenmesi gerekmektedir.

Yanma esnasında temel olarak bir yakıt (örneğin, doğal gaz veya hidrojen) ve yakıcı (genellikle hava), yanma ürünlerini oluşturmak için reaksiyona girer. Bu süreçte yakıtta bulunan kimyasal enerjinin bir kısmı ısı olarak açığa çıkar. Konumuz gereği bu bölümde metan (CH_4), hidrojen (H_2) ve metan/hidrojen karışımlarının karşılaştırmasına odaklanılacaktır. Gerçekte şebekede dağıtılan doğal gaz, bölgeden bölgeye değişmekle birlikte başka hidrokarbonlar (C_xH_y), CO_2 veya nitrojen (N_2) gibi diğer türleri içermesine rağmen genellikle hacimce en az %90 CH_4 içerdiğinden, testlerde CH_4 referans gaz olarak kullanılır.

Metan için hava ile yakma işlemi basitleştirilmiş olarak şu şekilde tarif edilebilir:



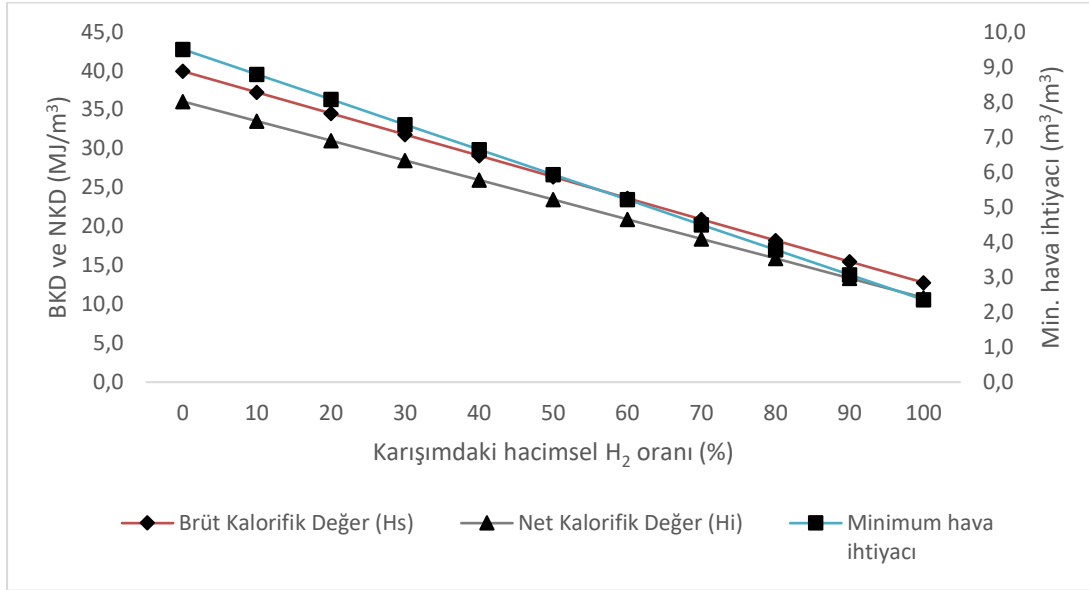
Karşılaştırma için hidrojen yanmasının reaksiyon denklemi ise aşağıdaki verilmiştir



Burada verilen reaksiyon denklemleri, stokiyometrik yanmayı tanımlar. Stokiyometrik yanma, yakıtın teorik olarak havayla tam olarak yandığı ideal bir yanmayı temsil eder.

Bu denklemleri incelemek, yanma sırasında meydana gelen gerçek kimyasal süreçleri tanımlamak için çok basit ve yeterli olmayan bir yöntem olsa da metan ve hidrojenin bir dizi önemli yakıt özelliğini anlama konusunda etkili olabilirler. Minimum oksijen ve hava gereksinimleri, net ve brüt kalorifik değerler (NKD ve BKD), Wobbe

Endeksleri ve adyabatik yanma sıcaklıkları gibi özellikler, bu reaksiyon denklemleri ve karşılık gelen enerji dengeleri kullanılarak Şekil 2.1'deki gibi hesaplanmıştır.

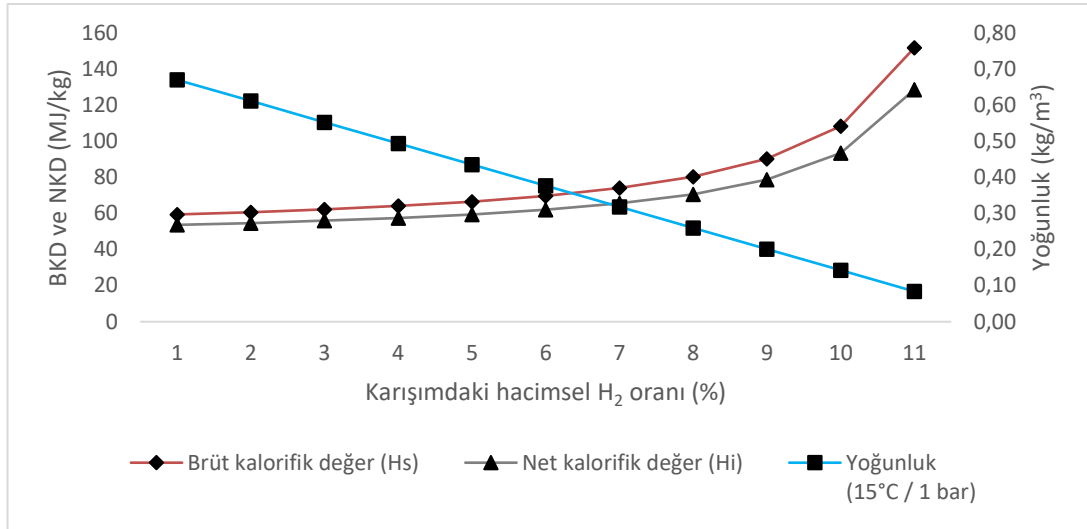


Şekil 2.1. Karışımdaki hidrojen oranının minimum hava ihtiyacı, net ve brüt kalorifik değerler üzerindeki etkisi. (Tüm değerler 15 °C için verilmiştir)

Yanma açısından metan ve hidrojen arasındaki ilk büyük fark, hidrojenin tam yanma için metandan daha az oksijene ihtiyaç duymasıdır. Hidrojenin tam yanma için minimum oksijen gereksinimi 0,5 mol O₂ / 1 mol H₂ iken, metan için bu oran 2 mol O₂ / 1 mol CH₄'tür. Buna bağlı olarak, minimum hava gereksinimleri sırasıyla 2,381 mol hava / 1 mol H₂ ve 9,524 mol hava / 1 mol CH₄'tür.

Oksijen gereksinimlerindeki bu fark, artan hidrojen içeriği ile birlikte Şekil 2.1'de görülebileceği gibi, CH₄/H₂ karışımlarının hacimsel net ve brüt ısı değerlerine etki eder. Karışımdaki artan hidrojen konsantrasyonları ile hem hava gereksinimleri hem de hacimsel ısı değerler doğrusal bir şekilde azalır. Bu durum, CH₄/H₂ karışımındaki artan hidrojen konsantrasyonları ile bir cihazda talep edilen ısı girdisini sağlamak için daha fazla yakıt gazına ihtiyaç duyulduğu anlamına gelir.

Hidrojenin yoğunluğu son derece düşük olduğundan, kütle bazlı kalorifik değerler karışımdaki hidrojen oranının artmasıyla birlikte artar. Bu, Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Çalışmanın devamında aksi belirtilmedikçe, ısı değerler hacimsel olarak belirtilecektir.



Şekil 2.2. Çeşitli CH₄/H₂ karışımlarının kütle bazlı kalorifik değerleri ve yoğunluğu.

Hidrojen karışımının minimum hava gereksinimi üzerindeki etkisi çok önemlidir, çünkü bu özellik herhangi bir yanma işleminin en önemli işlem parametrelerinden biri olan hava fazlalık katsayısını (λ) doğrudan etkiler.

Teorik olarak bir yanma işlemi için gereken minimum miktarda havayı belirleyip bu miktarda havayı sağlamak mümkün olsa bile, yanma odasında tam yanmayı sağlayacak kusursuz bir hava/yakıt karışımı elde etmek pratik olarak pek mümkün olmadığı için tavsiye edilmez. Bu nedenle, gerçek hayattaki uygulamalarda, kullanılan tüm yakıtın yanmasını sağlamak için teorik olarak gerekli hava miktarından daha fazla hava verilir.

Ayrıca gerçek hayatta şebekedeki doğal gazın bileşiminin yanı sıra yanma havasının içeriği (nem vs. gibi sebeplerden dolayı) değişebilmektedir. Yeterli miktarda fazla hava, değişen yakıt ve hava içeriklerinde bile tam yanmanın elde edilebilmesini sağlar.

Gerçekte sağlanan hava yakıt oranının teorikteki hava yakıt oranına bölünmesiyle hava fazlalık katsayısı elde edilir.

$$\lambda = \frac{(H/Y)_g}{(H/Y)_t} \quad (2.3)$$

Hava fazlalık katsayısının tersine eşdeğerlilik oranı denir ve ϕ ile gösterilir. Bu ifade yanma işleminin stokiyo metrisini tanımlamak için sıklıkla kullanılır.

$$\varphi = \frac{1}{\lambda} \quad (2.4)$$

Daha önce belirtildiği gibi, son kullanım perspektifinden bakıldığında, doğal gazın hidrojenle karıştırılmasının bir cihaz (veya herhangi bir yanma ekipmanı) üzerindeki etkisi temel olarak bir gaz kalitesi sorunu gibi ele almak gerekir. Yakıt gazının bileşimi ve özellikleri, cihazın orijinal olarak tasarlandığı ve ayarlandığı gaza göre değişir ve bu değişikliğin cihazının performansı üzerindeki sonuçları, örneğin emisyonlar, performans, verimlilik vs., değerlendirilmelidir. Gaz kalitesi sorunları genellikle Wobbe İndeksi (W_s) adı verilen bir özellik üzerinden incelenir.

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{\frac{\rho_{n,yakıt}}{\rho_{n,hava}}}} = \frac{H_s}{\sqrt{d}} \quad (2.5)$$

Burada H_s hacimsel olarak brüt kalorifik değer, d bağıl yoğunluk ve ρ_n hava ve yakıtın yoğunluklarını ifade etmektedir. Teorik olarak, aynı Wobbe İndeksine sahip iki yakıt, enjektör geometrisi ve besleme basıncının değişmemesi koşuluyla her seferinde aynı miktarda ısı açığa çıkaracaktır. Özellikle bireysel kullanıma yönelik cihazlar için, ulusal ve uluslararası gaz kalitesi düzenlemeleri, yakıt olarak kullanılacak farklı kalitede gazlarının birbirinin yerine geçip geçemeyeceğini değerlendirmek için genellikle gaz kalitesi kriteri olarak bu özelliği kullanılır.

- **Kalorifik değer**

Şekil 2.3, karışım gazı içerisindeki hidrojen oranının artması ile birlikte bağıl yoğunluk, net kalorifik değer, brüt kalorifik değer ve Wobbe indeksinin değişimini göstermektedir. Yakıt gazının hacimsel enerji içeriğinin (yani hacimsel kalorifik değer), artan hidrojen konsantrasyonları ile doğrusal olarak azaldığı görülebilir. Saf hidrojenin net ve brüt kalorifik değerleri metana oranı sırasıyla %30 ve %32'dir.

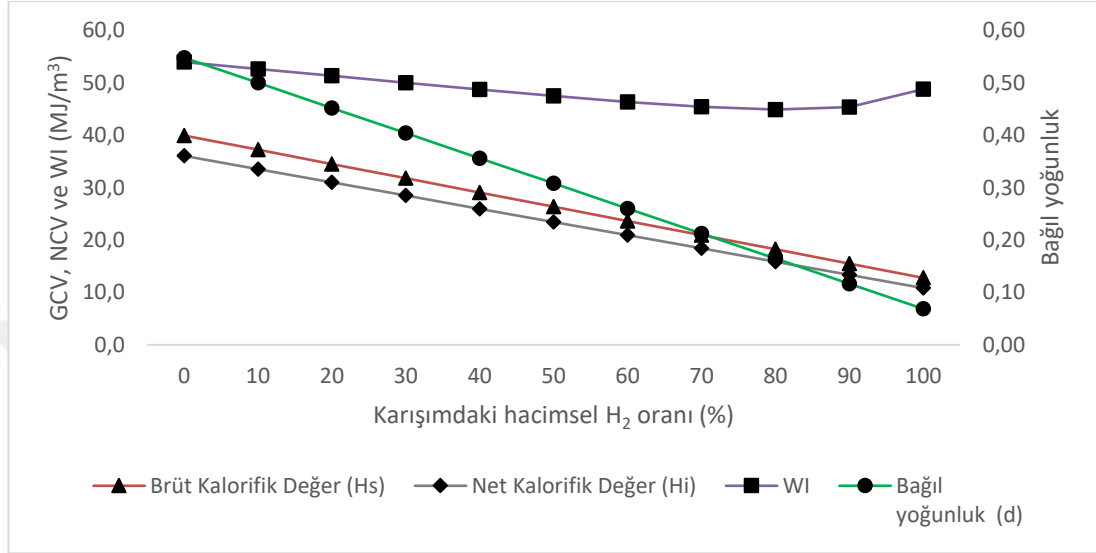
- **Bağıl yoğunluk**

Hidrojenin bağıl yoğunluğu metaninkinden yaklaşık 8 kat daha düşüktür.

- **Wobbe İndeksi**

Wobbe indeksindeki değişim saf metandan saf hidrojene geçerken çok keskin değildir çünkü ısıl değerdeki değişiklik yoğunluklardaki değişikliklerle büyük ölçüde dengelenir. Böylece CH_4 ve H_2 arasında kalorifik değerlerdeki farklılıklar %70 mertebelerinde

iken Wobbe indisindeki fark sadece yaklaşık %9,5'dur. Ayrıca, Wobbe indisi, kalorifik değerlerin veya yoğunluğun aksine, karışım alanının tüm aralığı boyunca düzenli bir şekilde azalmaz, şekil 2.3'de görüldüğü üzere çok yüksek hidrojen içeriğine sahip yakıt karışımları için artan hidrojen konsantrasyonları ile bir miktar yükselir.



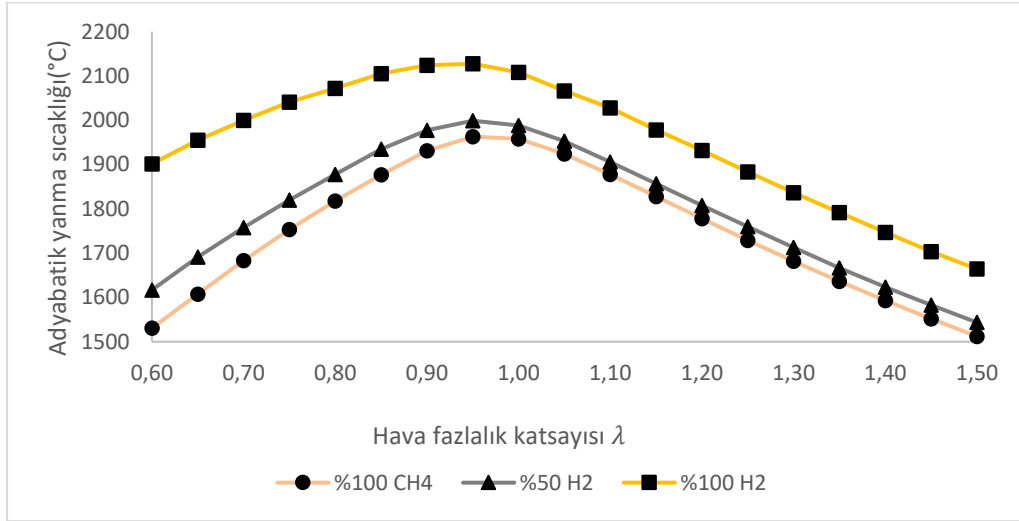
Şekil 2.3. Metana hidrojen karışımının bir fonksiyonu olarak ana gaz kalite kriterlerinin değişimi.

2.3. Yanma Sıcaklıkları

Yanma reaksiyonlarında ortaya çıkan sıcaklıklar çok önemlidir. Sıcaklıklar, ısı transferi ve verim üzerinde etkili olduğu gibi, nitrojen oksitler (NO_x) gibi baca gazı emisyonları oluşumunda da etkilidir.

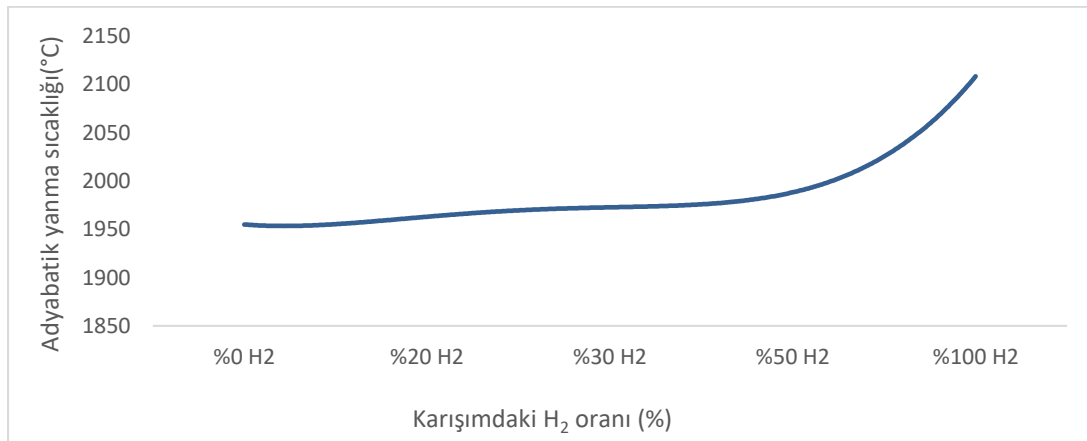
Hidrojen karışımının doğal gaz için tasarlanmış yanma prosesleri üzerindeki etkisinin teorik değerlendirmesi için, adyabatik yanma sıcaklıklarına bakmak faydalı olacaktır. Adyabatik yanma sıcaklığı, herhangi bir kayıp olmaksızın bir yanma sürecinde elde edilebilecek teorik maksimum sıcaklıktır. Bu, kimyasal reaksiyon tarafından salınan tüm ısınnın baca gazında termal enerjiye dönüştürüldüğü varsayımına dayanır. Adyabatik yanma sıcaklığı, yakıt ve yakıcı bileşimlerinin ve sıcaklıklarının, işlemin basıncının ve hava fazlalık katsayısının bir fonksiyonudur. Bu nedenle, cihazdaki gerçek sıcaklıklar muhtemelen adyabatik sıcaklıklardan önemli ölçüde düşük olacak olsa da hidrojen karışımının bir cihazdaki sıcaklıkları nasıl etkileyeceğine anlamak için bir gösterge olabilir.

Şekil 2.4, geniş bir hava fazlalık katsayısı aralığında saf CH_4 , %50 CH_4 ve %50 H_2 içeren gaz karışımı ve saf H_2 gazlarının adyabatik yanma sıcaklıklarını göstermektedir. Bu grafik dikkate alındığında saf hidrojen ve karışım gazı arasındaki fark, karışım gazı ve saf metan arasındaki farktan görece olarak çok daha fazladır. Örneğin $\lambda:1$ için saf H_2 ve karışım gazı arasındaki fark 150°C 'den fazla iken, karışım gazı ile CH_4 arasındaki fark 30°C civarındadır.



Şekil 2.4. Hava fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak saf CH_4 , %50 CH_4 / %50 H_2 ve saf H_2 'nin adyabatik yanma sıcaklıkları. ($T_{\text{yakıt}} = 300\text{K}$, $T_{\text{hava}} = 300\text{K}$, $p = 1 \text{ atm}$)

Artan hidrojen konsantrasyonları ile adyabatik yanma sıcaklığındaki bu doğrusal olmayan artış, Şekil 2.5'te daha rahat görülebilir.

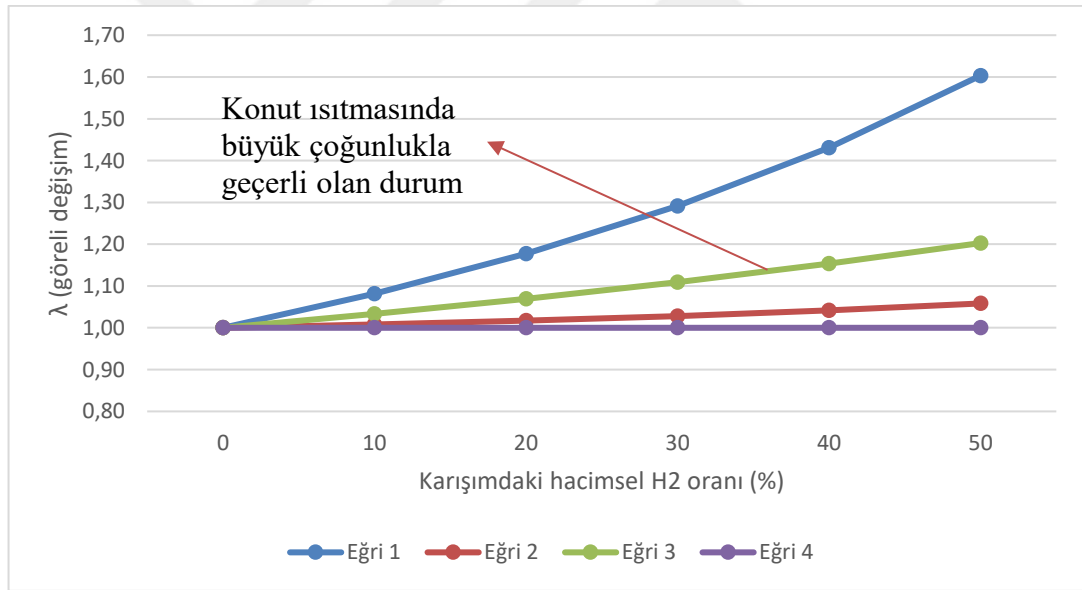


Şekil 2.5. Hidrojen karışımının $\lambda = 1$ 'de adyabatik yanma sıcaklığı üzerindeki etkisi. ($T_{\text{yakıt}} = 300\text{K}$, $T_{\text{hava}} = 300\text{K}$, $p = 1 \text{ atm}$)

2.4. Yanma Stokiyometrisi

Daha önce de belirtildiği gibi, hava fazlalık katsayısı her tür yanma işlemi için en önemli parametrelerden biridir ve yakıt gazı bileşimi ile yakından ilişkilidir. Sadece yanma sisteminde meydana gelen sıcaklıkları değil, aynı zamanda enerji verimliliğini ve baca gazı emisyonları da etkilemektedir. Bununla birlikte, bir yanma sürecinde stokiyometrinin tam olarak nasıl etkilendiği yalnızca yakıt bileşimine değil, aynı zamanda yakıt ve yakıcının nasıl karıştırıldığı gibi diğer faktörlere de (örneğin aktif yanma kontrolünün olup olmaması gibi) bağlıdır.

Hidrojen, metana kıyasla daha düşük minimum hava gereksinimine sahip olduğundan, herhangi bir CH_4 ve H_2 karışımı, tam yanma için saf metandan yakıt birimi başına daha az hava gerektirecektir. Bu nedenle, yalnızca yanma kimyası dikkate alınır, hidrojenin metana karışması, aşağıdaki denkleme göre hava fazlalık katsayısında bir kaymaya neden olacaktır [10].



Şekil 2.6. Hidrojen karışımının farklı yanma sistemlerinin stokiyometrisi üzerindeki etkisi.

Eğri 1: Denklem 2.6 yalnızca yakıt bileşiminin değiştiği fakat yakıt ve yakıcının hacimsel debisinin aynı kaldığı durumlar için geçerlidir. Bu, karışım gazının düşük ısı değeri sebebiyle yanma sistemine ısı girişinin de azaldığını ima eden teorik bir durumdur.

$$\lambda_{karışım} = \frac{Minimum\ hava_{CH_4}}{Minimum\ hava_{karışım}} \lambda_{CH_4} \quad (2.6)$$

Eğri 2: Diğer bir teorik durum ise, hem havanın hacimsel debisinin hem de sistemin ısı girişinin sabit olduğu senaryodur. Bu durumda sitokiyometrideki kayma aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$\lambda_{karışım} = \frac{Minimum\ hava_{CH_4}}{Minimum\ hava_{karışım}} \cdot \frac{H_{i,karışım}}{H_{s,CH_4}} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7 ile ifade edilen sistemde, minimum hava gereksinimindeki değişiklikler değişen ısı değerleri ile büyük oranla telafi edildiğinden, sitokiyometrideki kayma önemli ölçüde azalmış olacaktır.

Eğri 3 : Tez kapsamında test edilecek üründe olduğu gibi, konut ısıtması için kullanılan cihazların çok büyük çoğunluğunda geçerli olan, hava debisi ve enjektör basıncının sabit kaldığı durum ise denklem 2.9 ile ifade edilmiştir. Böyle bir sistemde yakıt gazının hacimsel debisi Wobbe indeksinin bir fonksiyonudur (enjektör çapı ve basıncının aynı olduğu kabulüne dayanarak) ve böylece sitokiyometrideki kayma önemli ölçüde azalır çünkü gaz debisi de değişmektedir. Bu, brülör kapasitesinin de değiştiği anlamına gelir.

Bu tür sistemlerde yanma için gerekli hava miktarını, yanma denklemine bakarak hesaplamaya çalışmak uygun olmayabilir. Bunun yerine, Wobbe indeksine benzer şekilde tanımlanan ve yanma havası ihtiyaç endeksi (CARI: Combustion Air Requirement Index) adı verilen bir özellik kullanılır.

$$CARI = \frac{Minimum\ hava}{\sqrt{d}} = \frac{Minimum\ hava}{\sqrt{\frac{\rho_{n,yakıt}}{\rho_{n,hava}}}} \quad (2.8)$$

Özetle konut ısıtmasında kullanılan sistemlerin çoğunda geçerli olan bu senaryoda, teorik olarak hava fazlalık katsayısındaki değişim CARI değerlerindeki arasındaki fark ile orantılı olacaktır.

$$\lambda_{karışım} = \frac{CARI_{CH_4}}{CARI_{karışım}} \cdot \lambda_{CH_4} \quad (2.9)$$

Eğri 4: Son eğri ise aktif yanma kontrol sistemi kullanılarak hava fazlalık katsayısının sabit tutulduğu sistemlerdeki durumu göstermektedir.

$$\lambda_{karisim} = \lambda_{CH4} \quad (2.10)$$

Bu tür kontrol sistemleri konutlarda ve küçük ölçekli ticari cihazlarda çok yaygın olarak kullanılmazlar.

2.5. Laminer Alev Hızı ve Alev Geri Tepmesi

2.5.1. Laminer alev hızı

Kombi gibi bireysel ısıtmaya yönelik kullanılan gaz yakan cihazların çoğu ön karışimli brülör kullanır. Yani yakıt ve hava, yanma odasına enjekte edilmeden önce iyice karıştırılır. Bu brülörlerde laminer alev hızı (S_L), alev stabilitesi ve alev şeklini belirlemede önemli bir rol oynar. Laminer alev hızı, alevin uç noktasından yanmamış hava/gaz karışımına doğru ilerleme hızını temsil etmekle birlikte yanıcı ve yakıcının bileşimine, sıcaklık, basınç ve hava fazlalık katsayısına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bireysel kullanıma yönelik cihazlardaki akışlar laminer olduğu için, burada yalnızca laminer alev hızı ele alınacaktır.



Şekil 2.7. Yakıt ve yakıcı karışımın akış hızı u ve laminer alev hızı S_L [11].

Yakıt ve yakıcı karışımın akış hızı (u) ile laminer alev hızı (S_L) arasındaki denge, alevin kararlılığını ve brülörün neresinde oluştuğunu belirler:

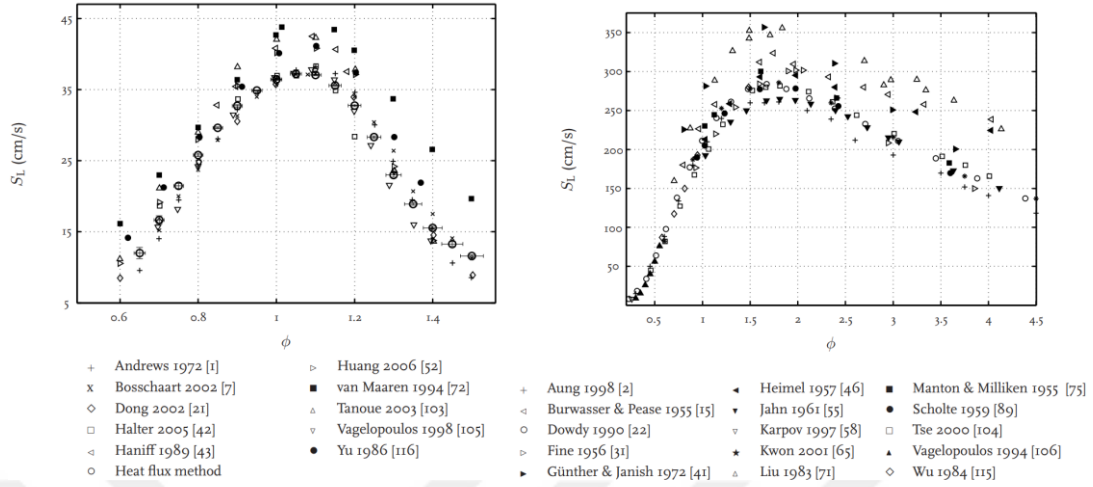
1. Laminer alev hızı, akış hızına kıyasla çok küçükse ($S_L \ll u$), alev yanma odasından baca gazı kanalına doğru taşınacaktır, buna alev kopması (blow out) denir.
2. Akış hızı ve laminer alev hızı eşit büyüklükte ise ($u = S_L$), alev kararlıdır.
3. "Kararlı alev" durumunda iken, eğer laminer alev hızı artarsa, alev brülöre daha yakın bir konumda dengelenir ve bu durum brülörün aşısı ısınmasına sebep olabilir.
4. Laminer alev hızı daha da artarsa ($S_L > u$) alev brülöre doğru hareket eder, brülöre yakın bir stabilizasyon noktası arar ve potansiyel olarak geri tepmeye yol açıp sisteme zarar verebilir.

Laminer alev hızı, geri tepmeyi etkileyen en önemli faktör olmasına rağmen, alev ve brülör deliği arasındaki termal denge de bu hususta kritik bir rol oynar. Alev ve yakıt-hava karışımının hızı arasında bir denge olduğu gibi oluşan ısı ve bunun alev cephesinde dağılımı arasında bir termal denge vardır. Alev cephesi brülöre yaklaştığında, alev cephesinde oluşan ısı brülör yüzeyinde dağılarak alevin sönmesine sebep olabilir. Bu fenomen “alev söndürme / *flame quenching*” olarak da bilinir.

Ön karışımli bir brülör söz konusu ise, laminer alev hızı arttıkça (örneğin yakına hidrojen takviyesiyle) alev brülöre daha da yaklaşır ve alevden brülöre ısı kaybı artar. Eğer brülör deliği büyükse, geri tepme gerçekleşebilir. Fakat brülör deliği yeterince küçükse, ısı kaybı nedeniyle alevin sönme ihtimali artar ve geri tepme ihtimali azalır. Buna göre hidrojenin sorunsuz şekilde yanması için kullanılması gereken brülör deliklerinin boyutları, metana kıyasla çok daha küçük olmalıdır. Farklı gazlar için teorik olarak gerekli minimum delik çaplarının hesaplandığı çalışmalar mevcuttur [12].

Şekil 2.8, çok sayıda deney ve simülasyonların bir derlemesine dayalı olarak metan (sol taraf) ve hidrojenin (sağ taraf) laminer alev hızlarının eşdeğerlik oranı (ϕ) üzerinden karşılaştırmasını göstermektedir [13]. Farklı ölçüm ve simülasyon yaklaşımları nedeniyle bu grafiklerde fark olsa da, hidrojenin her noktada önemli ölçüde daha yüksek bir laminer alev hızına sahip olduğu açıktır. Ayrıca, maksimum laminer alev hızı, metan için stokiyometrik yanmanın biraz altı koşullarda (ϕ , 1'den biraz fazla) elde edilirken, bu maksimum hız, saf hidrojen için stokiyometrik yanmanın önemli ölçüde altındaki koşullarda (ϕ , 1'den çok fazla) oluşmaktadır. Aynı zamanda,

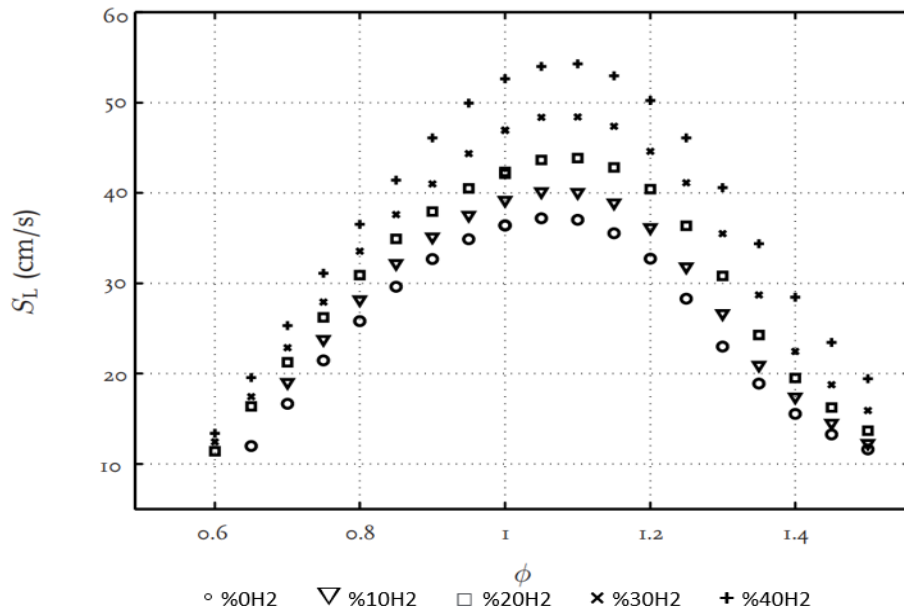
x eksenlerindeki farklılıklar, hidrojenin çok daha geniş bir eşdeğerlik oranları aralığında reaktif olduğunu, yani alev alabildiğini göstermektedir.



Şekil 2.8. CH₄ (sol taraf) ve H₂'nin (sağ taraf) laminar yanma hızları [13].

Yakıt bileşimine göre kolayca hesaplanabilen yoğunluk, kalorifik değer ve Wobbe indeksinin aksine bir yakıtın laminar alev hızını belirlemek oldukça karmaşıktır ve özel ölçüm cihazları veya simülasyon yöntemlerinin kullanılmasını gerektirir.

Şekil 2.9, farklı eşdeğerlik oranları için metana eklenen hidrojen gazının laminar yanma hızını nasıl arttırdığını göstermektedir. Bu durum, ön karışımli brülörler için risk teşkil eder çünkü yakıta hidrojen ilavesi ile birlikte laminar yanma hızı ve akış hızı arasındaki denge bozulur ve bu durum geri tepmeye sebep olabilir.

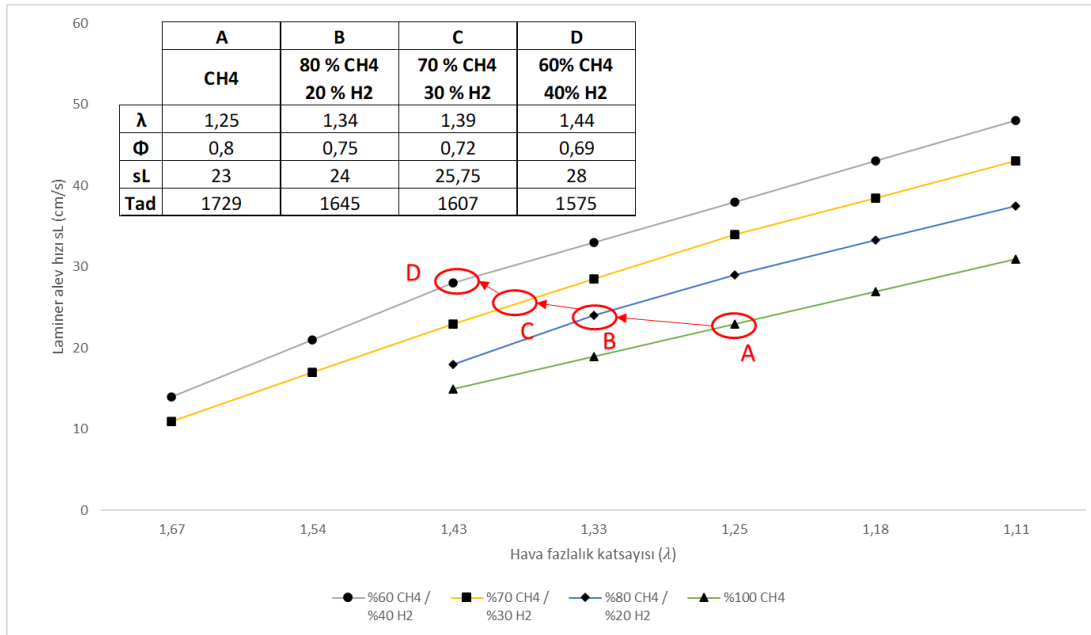


Şekil 2.9. Eşdeğerlik oranının bir fonksiyonu olarak farklı karışımlar için laminar alev hızları [13].

Metan ile çalışmak üzere tasarlanmış bir yanma sistemi metan-hidrojen karışımı ile beslendiğinde, oluşacak gerçek laminar alev hızını etkileyecek bir dizi faktör vardır. Yukarıdaki bilgilerden anlaşıldığı üzere şüphesiz ki hidrojen ilavesi laminar yanma hızında artışa sebebiyet verir. Fakat aynı zamanda sistemde aktif bir yanma kontrol sistemi yoksa, sistemin stokiometrisi değişecektir. Ayrıca yanma sıcaklıkları da değişecektir.

Eşdeğerlik oranının 1'den küçük olduğu, yani hava fazlalık katsayısının 1'den büyük olduğu durumlarda bu bahsedilen etkiler birbirini belirli ölçüde yok edecektir ve artan hidrojen oranı ile birlikte yükselmesi beklenen laminar yanma hızı ve sıcaklıklar, aynı anda artan hava fazlalık katsayılarıyla bir yere kadar dengelenecektir.

Yanma kontrol sistemi kullanılmayan, hava debisi ve enjektör basıncının sabit kaldığı durum ev tipi ısıtma cihazları için şekil 2.10 bu durumu görselleştirmektedir. Grafiğin en altındaki eğri saf metan için 1,25'lik bir hava fazlalık katsayısında çalışacak şekilde ayarlanan cihazı temsil eder. Bu cihaz hacimce %80 CH₄ ve hacimce %20 H₂ ile beslenirse, hava fazlalığı oranı artar ve 1,34'e çıkar. Stokiometrideki bu kayma, yakıtta hidrojen ilavesi ile artması beklenen laminar yanma hızını büyük ölçüde dengeleyerek artışın %4'ten fazla olmamasını sağlar. Ayrıca hava fazlalık katsayısının artmasıyla adyabatik yanma sıcaklığı da düşmektedir.



Şekil 2.10. Hava fazlalık katsayısının bir fonksiyonu olarak farklı karışımlar için laminar alev hızları (Odaklanmış).

Şekil 2.10 aynı zamanda elektronik kontrollü yanma sistemlerinde yakıta H_2 ilave edilmesinin laminar alev hızları üzerindeki etkisini görmeye yardımcı olabilir. Bu sistemler genellikle tüm modülasyon aralığında ve farklı çevre koşullarında (örneğin dış hava sıcaklığı, şebeke gazının kalitesi vb.) sabit hava fazlalık katsayısını korumak için alev iyonizasyon verilerini kullanır [14, 15]. Bu gibi sistemlerde yakıta H_2 ilave edilmesi, laminar yanma hızlarını yukarıda örneği verilen ve aktif bir yanma kontrolü kullanmayan sisteme göre daha fazla artacaktır. Örneğin yukarıdaki örneğe kıyasla saf CH_4 'ten %30 H_2 içeren bir karışıma geçiş, laminar yanma hızında %30'dan fazla bir artışa sebep olabilir.

2.5.2. Alev geri tepmesi

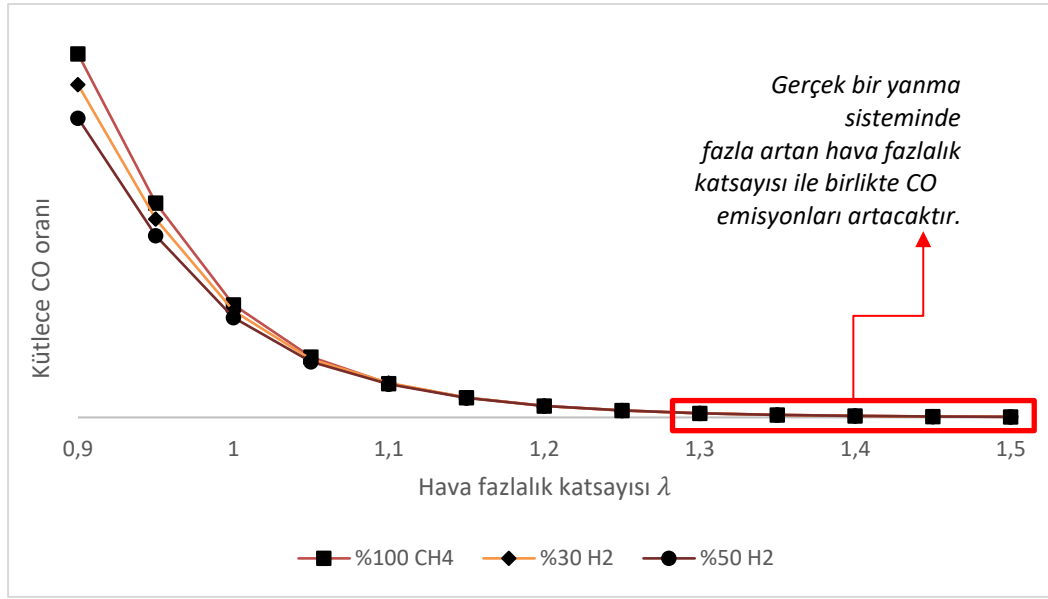
Doğalgaza hidrojen karışımı, brülör tasarımının da etkisiyle alevin konumu üzerinde etkili olacaktır. Bu bağlamda dikkate alınması gereken iki önemli fiziksel etki vardır. Yakıta hidrojenin girmesi ve minimum hava gereksiniminin azalması nedeniyle yanma işleminin stokiyometrisi değişecektir ve hava fazlalık katsayısı artacaktır. Yüksek hava fazlalık katsayılarında potansiyel olarak alev kopması meydana gelebilir. Bununla birlikte, aynı zamanda, hidrojen karışımı, laminar yanma hızlarının artmasına neden olarak ters etkiye, yani alevi brülöre yaklaştırmaya yol açacaktır. Bu durum ise brülörün aşısı ısınması ve alev geri tepmesi risklerini doğurur.

2.6. Baca Gazı Emisyonları

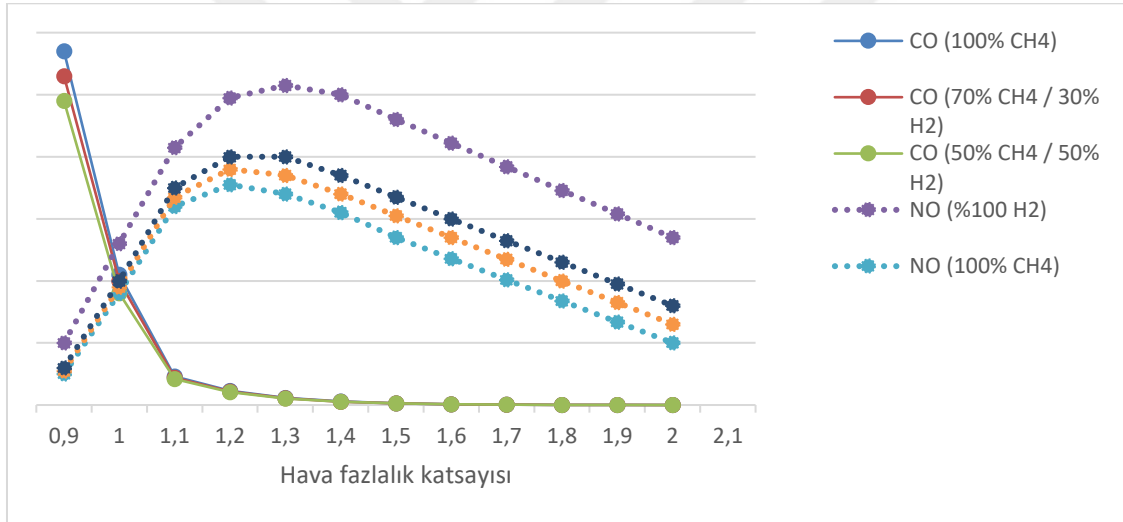
Doğal gaz kükürt içermediğinden, yanma sonucu oluşan kirletici emisyonları CO ve NO_x ile kısıtlıdır.

CO, hidrokarbon yakıtların eksik yanmasının bir sonucudur ve bu nedenle hava fazlalık katsayısı λ ile yakından ilişkilidir. Daha önce gösterildiği gibi metana hidrojen eklenmesi, bir tür yanma kontrol sistemi tarafından sabit bir hava fazlalık katsayısı sağlanmadıkça, yanma işleminin stokiyometrisini daha yüksek λ değerlerine doğru kaydıracaktır. Bu, CO emisyonlarının oluşma olasılığının daha düşük olduğu anlamına gelir.

Şekil 2.11 ve Şekil 2.12, hava fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak CO ve NO emisyonlarını göstermektedir. Hava fazlalık katsayı belirli bir değerden büyük olduğunda, CO emisyonunun yakıttaki hidrojen seviyesinden neredeyse hiç etkilenmediği görülebilir.



Şekil 2.11. Metan, hidrojen ve CH_4/H_2 için hava fazlalık katsayısının bir fonksiyonu olarak teorik CO emisyonları.



Şekil 2.12. Metan, hidrojen ve CH_4/H_2 için hava fazlası oranının bir fonksiyonu olarak teorik CO ve NO emisyonları [10].

- **CO emisyonları**

Şekil 2.11'in bir dizi adyabatik kimyasal denge hesaplamasına dayandığının altı çizilmelidir. Gerçek bir yanma sisteminde hava fazlalık katsayısı arttıkça alev giderek daha kararsız hale gelecek, bu eksik yanmaya ve dolayısı ile artan CO emisyonlarına sebep olacaktır. Bununla birlikte, alevin kararsız hale geldiği bu sınır koşul, kullanılan brülör tasarımına çok bağlıdır ve kolayca hesaplanamaz, bu nedenle bu grafikte ihmal edilmiştir. Hidrojen karışımının alevin kararsız hale geldiği bu sınır koşulu etkilemeyeceğini belirlemek için ölçümler gerekecektir.

CO hem zehirli hem de yanıcı bir gaz olduğundan güvenlik açısından da ele alınması gereken önemli bir konudur. Mevcut gaz altyapısına hidrojen katkısı sayesinde CO emisyonlarının artmaması çok önemlidir.

Teorik olarak, GAR ve bundan önceki geçerli direktif olan GAD gerekliliklerine uygun şekilde üretilen cihazlar, üretici firmaları tarafından, sahada çalışacağı gaz tipine uygun bir referans gaz kullanılmak suretiyle uygun bir hava fazlalık katsayısı ile çalışacak şekilde ayarlanır. [16, 17].

Doğalgaz için, EN 437 [7] standardında göre bu referans gaz G20 olarak tanımlanır. Cihazın tasarımı esnasında ayarlamaları bu referans gazla yapıp, cihaz daha sonra sahada doğalgaz yerine doğalgaz-hidrojen karışımı ile çalıştırıldığında hava fazlalık katsayısı artacak ve tasarım değerinin üstüne çıkacaktır. Bu sebeple hava fazlalık katsayısının alevi kararsız hale getirecek kadar fazla arttığı istisnai durumlar dışında, yakıtta hidrojen ilavesinin CO emisyonlarını olumlu yönde etkilemesi beklenmektedir.

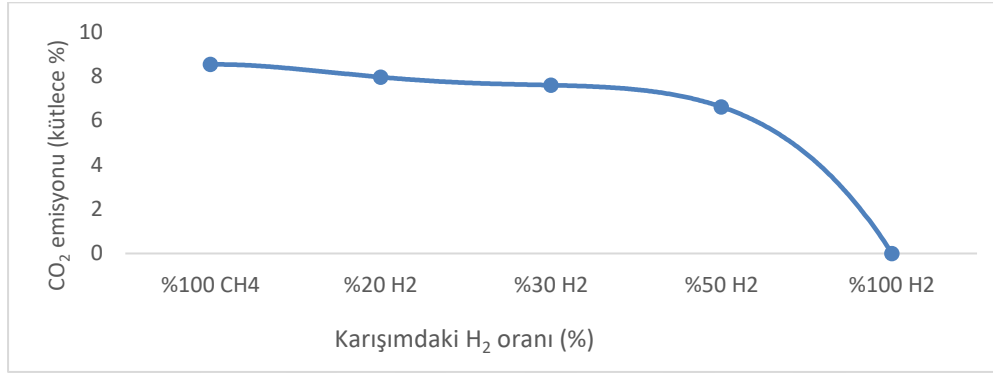
- **NO_x emisyonları**

NO_x oluşumu yanma odası sıcaklıkları ve bu sıcak bölgelerdeki oksijen varlığı ile doğrudan orantılıdır. Yakıtta hidrojen karışımı daha yüksek yanma sıcaklıklarına ve daha yüksek hava fazlalık katsayılarını da beraberinde getirecektir. Diğer bir yandan, konutlarda kullanılan gaz yakan cihazlar göz önüne alındığında bu cihazlar zaten yüksek hava fazlalık katsayılarıyla çalışmaktadır ve hava fazlalık katsayılarının daha da artması yanma odasındaki yerel sıcaklıkların azalmasına sebebiyet verecektir. Bu sebeple ön karışimli brülörlerde doğalgazla belirli bir orana kadar hidrojen ilavesinin net etkisinin, NO_x emisyonlarını azaltacak şekilde olması beklenmelidir fakat bunu teyit etmek için test ve ölçümler gerekmektedir. Daha düşük hava fazlalık katsayıları ile çalışan yada hava fazlalık katsayısını sabit tutmak için yanma kontrolü kullanan sistemlerde daha yüksek NO_x artışları gözlemlenebilir. Bu durum, ön karışimli olmayan brülör kullanan ve yanmanın sitokiyometrik yanmaya yakın olduğu endüstriyel uygulamalar için de geçerlidir [18, 19].

- **CO₂ emisyonları**

Doğalgaz'ın hidrojen ile beslenmesindeki ana motivasyonlardan biri CO₂ emisyonlarını azaltmaktır. Şekil 2.13, CO₂ emisyonlarının doğalgaz içerisindeki artan hidrojen oranı ile nasıl azaldığını göstermektedir.

Grafikten de anlaşılacağı üzere, yalnızca yanma dikkate alındığında hidrojen ilavesi ile CO₂ emisyonlarında dramatik bir azalış elde etmek pek mümkün değildir. Görüldüğü gibi doğalgaza %20 hidrojen ilavesi, aynı ısı gücü elde edilmesi sonucunda oluşan CO₂ emisyonlarında yaklaşık %7'lik bir azalma sağlamaktadır. Bu oran %40'a çıktığında emisyonlarda %17, %60'a çıktığında ise emisyonlarda %31'lik bir iyileşme gözlemlenebilir.



Şekil 2.13. Metan / hidrojen karışımlarının yanması sonucu CO₂ emisyonlarının değişimi ($\phi=1$).

2.7. Diğer

- **Yanıcılık ve patlama riski**

Doğalgaz/hidrojen karışımlarının bireysel ve ticari ısıtma cihazlarında kullanılmasının güvenliğe ilişkin etkilerini irdeleyecek olursak, yukarıda belirtilen CO emisyonları ve geri tepme riski dışında başka faktörlerin de dikkate alınması gerekir.

Hidrojen ve metanın minimum tutuşma sıcaklıklarının birbirine yakındır fakat tutuşma enerjileri birbirinden farklıdır. Metan'da bulunan güçlü karbon-hidrojen bağlarına kıyasla hidrojen'de bulunan bağların zayıf olması sebebiyle hidrojenin minimum tutuşma enerjisi daha azdır. Metanın tutuşması için gereken minimum enerji 0,2 mili joule civarlarındayken, hidrojen için bu değer 0,02 mili joule civarlarındadır [20, 21]. Sonuç olarak doğalgaz-hidrojen karışımları, saf doğalgaza oranla çok daha kolay tutuşabilir. Bu, güvenlik açısından göz önünde bulundurulması gereken önemli bir husustur.

Ayrıca artan hidrojen seviyeleri, daha geniş bir yanıcılık aralığına yol açar. Limit Oksijen İndeksi (LOI - daha altında yanmanın mümkün olmadığı minimum oksijen konsantrasyonu) metan için hacimce %10,1'den saf hidrojen için hacimce %4,3'e düşer [22].

- **Kaçak riski**

Bir H_2 molekülünün çapı (kinetic diameter), diğer birçok moleküle kıyasla çok küçüktür ve yaklaşık 2.89 angströmdür. CH_4 ise, dört hidrojen atomuna bağlı bir karbon atomundan oluşan bir moleküldür ve bu molekülün çapı yaklaşık 3.84 Bir CH_4 molekülünün çapı angströmdür [23] .

Bir molekülün boyutu, küçük açıklıklardan veya gözeneklerden sızma kabiliyetini etkiler. Genel olarak, küçük moleküllerin gözeneklerden daha kolay geçebildikleri için büyük moleküllere göre küçük açıklıklardan sızma olasılığı daha yüksektir. Buna göre, küçük moleküllere sahip olan H_2 gazının, daha büyük moleküllere sahip olan CH_4 gazına göre küçük açıklıklardan veya gözeneklerden sızma olasılığı daha yüksektir.

- **Alev tespiti (iyonizasyon akımı)**

İyonizasyon elektrodu kullanılan cihazlarda alevin varlığı, yanma sonucu oluşan iyonlar sayesinde tespit edilir. Hidrojen gazı yandığında, doğalgaza kıyasla daha az iyon açığa çıkar. Bu sebeple yakıt olarak kullanılan doğalgaz içerisindeki hidrojen oranı arttıkça, alev içeriğindeki iyon miktarı azalacak ve alev tespiti için ölçülen iyonizasyon akımı düşecektir.

Diğer yandan, hidrojen takviyesinin alev konumunu değiştirme yönündeki etkisi de dikkate alındığında, karışım gazının yanması sonucu oluşan alev tespitinin mevcut yöntem ile ne kadar sağlıklı yapılacağı ayrıyeten incelenmelidir.

Özellikle alev boyunun kısa olduğu düşük kapasitelerde oluşan iyonizasyon akımının, hidrojen takviyesi sebebiyle sınır değer altına düşmesi cihazın hata vermesi ve bu sebeple çalışmamasıyla sonuçlanabilir.

- **Yoğuşma**

Hidrojenin yanması sonucu ortaya çıkan su buharı, doğalgaza oranla daha fazladır çünkü yapısında karbon atomu bulunmadığı için hidrojenin oksijen ile yanması sonucu ortaya çıkan temel ürün sudur. Buna karşılık metanın oksijen ile yanması sonucu suya ilave olarak karbondioksit de üretir.

Bu nedenle doğalgaza yapılacak hidrojen takviyesi, yanma sonucu ortaya çıkacak yoğuşma suyu miktarında artışa neden olacaktır.

- **Verim**

Teorik olarak, hidrojen karışımı, belirli bir baca gazı sıcaklığında su buharından daha fazla gizli ısı geri kazanılabileceğinden, cihaz verimliliğinde genel bir iyileşmeye yol

açacaktır. Fakat bu teorinin ne kadar pratiğe yansıyacağı büyük ölçüde cihaz tasarımına da bağlıdır. Hava fazlalık katsayılarındaki değişiklikler, artan yoğuşma suyu üretimi veya su sıcaklıklarındaki değişiklikler gibi farklı etkiler verime etkisi açısından birbirini nötrleyebilir veya güçlendirebilir.



3. DENEYSEL ÇALIŞMA HAZIRLIKLARI

3.1. Test Edilecek Ürünün Tanıtımı

Proje kapsamında test edilecek ürün, Daikin markalı, D2CNL024 model kodlu ve ticari ismi CSU Premix 24 kW olan tam yoğuşmalı kombidir. Ürünün beyan edilen ısıl yükü minimum kapasitede 4 kW ve maksimum kapasitede 23,5 kW olmakla birlikte, verim değeri ise (maksimum ısıl yük, 80/60°C sıcaklık rejiminde) %96,5'tir.

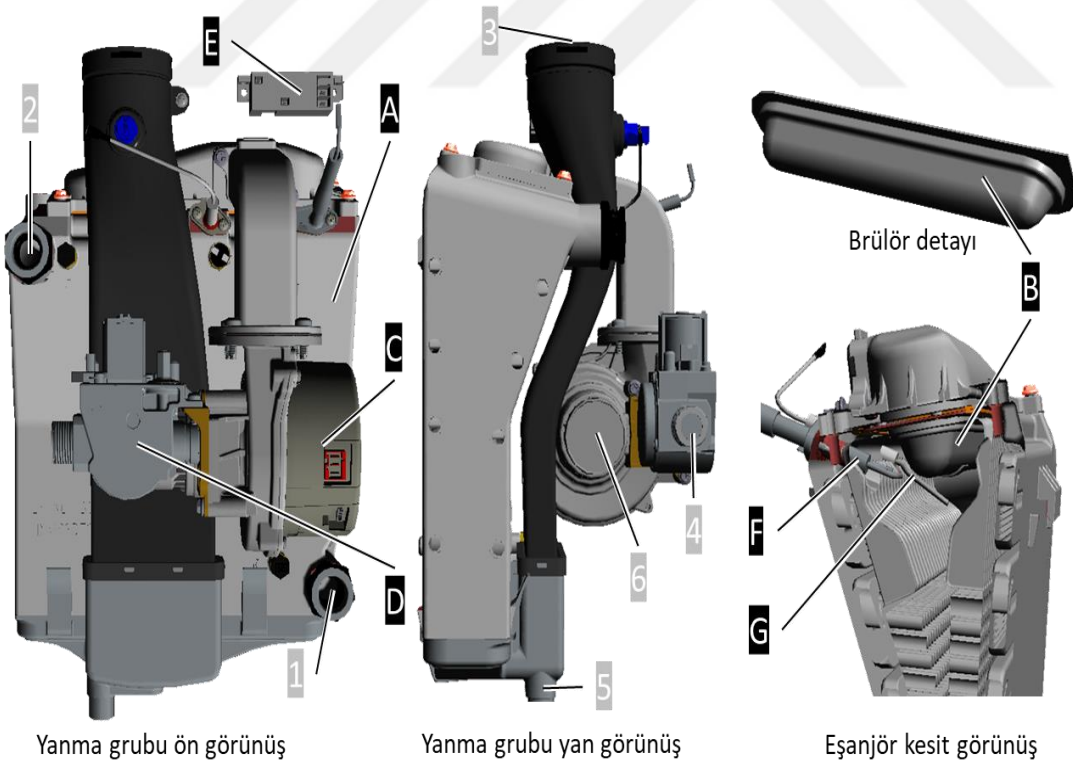


Şekil 3.1. Test edilecek kombiye ait gerçek ürün görseli.

Ürün hermetik bir kabine sahip olmakla birlikte, aktif bir yanma kontrol tertibatı içermemektedir. Ürünün yanma grubunda kullanılan kritik komponentlere ilişkin bilgi, bir sonraki sayfada, Tablo 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Test edilecek kombiye ait ana komponentlerin bilgileri.

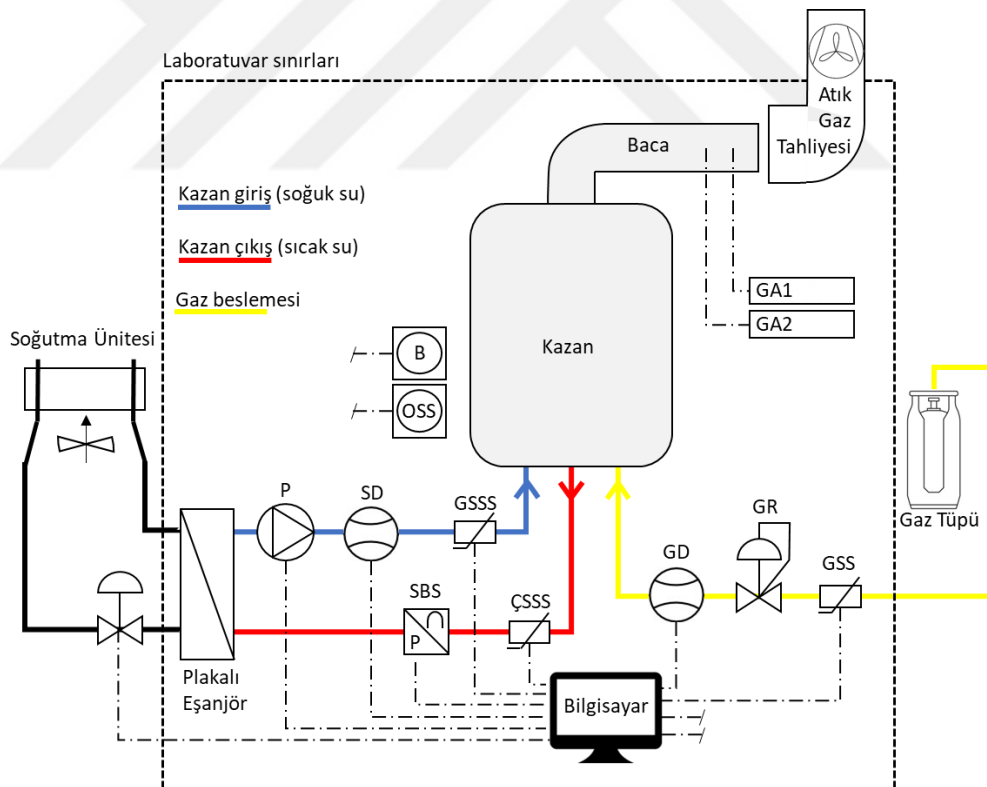
Nr.	Komponent	Detay
A	Ana eşanjör	Alüminyum(AlSi10Mg) döküm eşanjör
B	Brülör	Paslanmaz çelik fiber örgü brülör
C	Fan	230V beslemeli, PWM kontrollü Radyal fan
D	Gaz Valfi	230V RAC beslemeli, regülatörlü gaz vanası
E	Ateşleme trafosu	2 çıkışlı 220V AC, 10Hz filtreli elektrikli çakmak
F	Ateşleme elektrodu	Kanthal APM
G	İyonizasyon elektrodu	Kanthal APM
1	Eşanjör (soğuk su) girişi	-
2	Eşanjör (sıcak su) çıkışı	-
3	Atık baca gazı çıkışı	-
4	Gaz girişi	-
5	Yoğuşma suyu çıkışı	-
6	Yanma havası girişi	-



Şekil 3.2. Test edilecek kombiye ait ana komponentlerin görseli.

3.2. Test Standının Tanıtımı

Proje kapsamında deneysel çalışmanın yürütüleceği test standı, TS EN15502:2021, TS EN 15502-2-1:2022 ve TS EN 15502-2-2:2014 numaralı standartların gerektirdiği testleri yapabilecek kapasitede tasarlandı. Siemens MXG461 PID kontrollü vana ile stabil bir giriş su sıcaklığı (30/60 °C) yakaladıktan sonra, Grundfos MGE80B stant pompası istenilen sıcaklık farkını ($\Delta T=20^{\circ}\text{C}$) yakalamak için kullanıldı. Regülatörler yardımıyla giriş basıncı ayarlandı. Elster gaz debimetresi giriş gaz debisi ölçümü için ve gaz sıcaklık sensörü gaz giriş sıcaklığı ölçümü için kullanıldı. Sıcaklık, basınç ve nem transmitterleri yardımıyla ortam koşullarını anlık ve ortalama olarak göstererek giriş yükü belirlendi. Siemens debimetreleri ve sıcaklık sensörleri yardımıyla çıkış gücü hesaplandı. Bu sayede TS EN15502:2021 standart maddelerinde belirtilen kapasiteleri ve verimleri ölçebilme özelliği gösteren bir test standı kullanıldı. Test standının şematik gösterimi ve stantta kullanılan ana komponentlere ilişkin bilgi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.3. Test standının şematik gösterimi.

Tablo 3.2. Test standına ait parçalar ve özellikleri.

Sembol	Parça	Fonksiyon	Görsel
P	Sirkülasyon pompası	Kazanın istenen giriş/çıkış suyu sıcaklığı rejimine oturtmak testler için gereklidir. Yanma testleri esnasında ısınmış olan kazan çıkış suyunun soğutma ünitesinde soğutulması gerekmektedir. Sirkülasyon pompası, kazan ve soğutma ünitesi arasındaki su sirkülasyonunu sağlar.	
SD	Su debimetresi	Kazanın çıkış gücü, giriş çıkış suyu sıcaklıkları arasındaki fark ve bu su debisi dikkate alınarak hesaplanır. Su debimetresinin görevi, çıkış gücünü hesaplarken kullanmak üzere kazandan geçen su debisini ölçmektir.	
GSSS	Giriş suyu sıcaklık sensörü	Kazanın çıkış gücü, giriş çıkış suyu sıcaklıkları arasındaki fark ve bu su debisi dikkate alınarak hesaplanır. Giriş ve çıkış suyu sıcaklık sensörlerinin görevi, kazandan geçen suyun ısınmadan önceki ve ısındıktan sonraki sıcaklıklarını ölçmektir.	
ÇSSS	Çıkış suyu sıcaklık sensörü		
GSS	Gaz sıcaklık sensörü	Kazanın giriş yükü hesabında test gazı sıcaklığını ölçmeye ve bu değerleri anlık ve istenilen sürede ortalama olarak görmeyi sağlar.	
GD	Gaz debimetresi	Üreticinin kazanın kapasitesini beyan edebilmesi için kazanın saatte ne kadar gaz tükettiğini de beyan etmesi gerekir. Saatte tüketilen gaz miktarına bağlı olarak giriş yükü hesabı yapılır. Gaz debimetresinin görevi de tüketilen gaz miktarını süreye göre ölçmektir.	
GR	Gaz regülatörü	Kazana giren gazın basıncını istenilen değere ayarlanmasını sağlayan sistem elemanlarıdır.	
B	Barometre	Kazan giriş yükü hesabı için gerekli olan atmosferik basıncı ölçmeye yarayan ölçüm cihazıdır.	
SBS	Su basınç sensörü	Kazana basılan suyun basıncını ölçmeye yarayan ölçüm cihazıdır.	

Tablo 3.2. (Devamı) Test standına ait parçalar ve özellikleri.

Sembol	Parça	Fonksiyon	Görsel
OSS	Ortam sıcaklık sensörü	Ortam sıcaklığı ölçmeye yarayan ölçüm cihazıdır.	
CHPID	PID Vana	Kazanın giriş suyu sıcaklığını istenilen değerde tutmaya yarayan PID kontrollü vanadır.	
GA1	Gaz analizörü 1	Yanma için önemli olan baca gazı içeriğini ölçmeyi sağlayan cihazdır.	
GA2	Gaz analizörü 2	Baca gazındaki NO ve NO _x miktarını ölçmeye yarayan ölçüm cihazlarıdır.	

3.3. Hata Analizi ve Yapılacak Testlerin Belirlenmesi

Yakıta yapılacak hidrojen takviyesinin yaratacağı olası farklar teorik olarak irdelendikten sonra bu bilgilerden yola çıkarak, sahada doğalgaz ile çalışmak üzere tasarlanmış ve ayarlanmış yoğuşmalı duvar tipi kazanda yakıt olarak %20 oranında hidrojen ve %80 oranında doğalgaz içeren bir gaz karışımı kullanılmasının performans ve güvenlik açısından yaratacağı olası etkilerinin belirlendiği Hata Modu ve Etki analizi (FMEA) çalışması EK A'da sunulmuştur.

Buna göre yakıta hidrojen ilavesi ile birlikte değişmesi beklenen parametreler, bu parametrelere bağlı olarak oluşabilecek muhtemel sorunlar, bu sorunlara ilişkin tasarım esnasında alınacak önlemler ve doğrulama amacıyla yapılması gereken nihai testler listelenmiştir.

Çalışmanın bir özeti olarak, EN15502 standardına uygun şekilde, aynı cihaz üzerinde ayrı ayrı hem doğalgaz ile hem de %20 oranında hidrojen ve %80 oranında doğalgaz içeren gaz karışımı ile ayrı ayrı yapılacak ve sonuçları karşılaştırılacak olan testler aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

Test 1 - Anma ısı girdisinin veya en yüksek ve en düşük ısı girdisinin tayini

Referans: EN15502, madde 8.4.1

Amaç: Gaz değişimi sebebiyle cihazın ısıtma kapasitesinde ortaya çıkan farklılıklar gözlemlenecektir. Test esnasında aynı zamanda CO ve CO₂ emisyonları ölçülecektir.

Deney şartları: Kazan, bu deneyde normal basınçtaki kazan kategorisi için referans gazların her biriyle beslenir. Sabit çıktılı kazanlarda ayar, bu deney için değiştirilmemelidir. Ayarlayıcı bulunuyorsa, bunlar imalatçı tarafından belirtilen konuma ayarlanmalıdır. Bu şartlar altında (p_a, p_g, t_g, d) elde edilen hacimsel gaz debisi V , deney, referans deney şartlarında uygulanmış gibi düzeltilmeli ve düzeltilmiş ısı girdisi, aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$Q_c = \frac{H_i \cdot M}{61.1} \cdot \sqrt{\frac{(1013.25 + p_g) \cdot (273.15 + t_g)}{(p_a + p_g)}} \cdot \frac{d_r}{d} \quad (3.1)$$

Burada;

Q_c (kW): Alt ısı değere göre düzeltilmiş ısı girdisi (1013,25 mbar, 15°C, kuru gaz),

V (m³/h): Sayaçtaki nem, sıcaklık ve basınç altında ölçülen hacimsel gaz debisi,

M (kg/h): Ölçülen kütleli gaz debisi,

H_i (MJ/m³ veya MJ/kg: 15°C, 1013.25 mbar'da kuru referans gazın alt ısı değeri,

t_g (°C): Sayaçtaki gaz sıcaklığı,

d (kg/m³): Deney gazının yoğunluğu,

d_r (kg/m³): Referans gazın yoğunluğu,

p_g (mbar): Sayaçtaki gaz basıncı,

p_a (mbar): Deney süresindeki atmosfer basıncıdır.

Test 2 – NO_x ölçümü

Referans: EN15502, madde 8.13

Amaç: Gaz değişimi sebebiyle değişen NO_x emisyonları gözlemlenecektir.

Deney şartları: Kazan, 80°C'luk bir gidiş su sıcaklığı ve 60°C'luk bir dönüş su sıcaklığı için, anma ısı girdisine ayarlanır. Anma ısı girdisi Q_n 'den daha düşük kısmi ısı girdilerindeki ölçümler için dönüş suyu sıcaklığı T_r , aşağıdaki formül kullanılarak belirli ısı girdisinin bir fonksiyonu olarak hesaplanır.

$$T_r = 0.4Q + 20 \quad (3.2)$$

Burada; T_r , Celcius ($^{\circ}\text{C}$) olarak ifade edilen dönüş su sıcaklığıdır ve Q , Q_n 'nin yüzdesi olarak belirtilen kısmi ısı girdisidir. Su akışı sabit tutulur. NO_x ölçümleri, kazan, CR1404:1994'te verilen detaylarla uyumlu olarak, ısı dengede iken gerçekleştirilir. Nem ölçer kullanılmaz. Yanma havası için referans sıcaklık 20°C ve bağıl nem $10\text{g H}_2\text{O/kg}$ hava'dır. Deney şartları, bu referans şartlardan farklı ise, aşağıda belirtilen şekilde NO_x değerlerinin düzeltilmesi gerekecektir.

$$\text{NO}_{x,0} = \text{NO}_{x,m} + \frac{0.02\text{NO}_{x,m} - 0.34}{1 - 0.02(h_m - 10)} \cdot (h_m - 10) + 0.85(20 - T_m) \quad (3.3)$$

Burada;

$\text{NO}_{x,m}$ (mg/kWh): 50 mg/kWh ile 300 mg/kWh aralığında, h_m ve T_m 'de ölçülen NO_x 'tur.

h_m (g/kg): 5 g/kg ile 15 g/kg aralığında, $\text{NO}_{x,m}$ 'nin ölçüldüğü andaki nemdir.

T_m ($^{\circ}\text{C}$): 15°C ile 25°C aralığında, $\text{NO}_{x,m}$ 'nin ölçüldüğü andaki sıcaklıktır.

$\text{NO}_{x,0}$ (mg/kWh): Belirtilen referans şartlara göre düzeltilmiş NO_x 'un değeridir.

Test 3 – Anma ısı girdisindeki faydalı verim

Referans: EN15502, madde 9.2

Amaç: Gaz değişimi sebebiyle cihazın faydalı veriminde meydana gelen değişiklikler gözlemlenecektir.

Deney şartları: Kazan boyunca su debisi, $(60 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 'lik bir dönüş suyu sıcaklığı ve gidiş ve dönüş suyu sıcaklıkları arasında $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 'lik bir sıcaklık farkı elde edecek şekilde ayarlanır. Verimin ölçülmesine kazan ısı dengede iken, dönüş ve gidiş sıcaklıkları sabit olduğunda başlanabilir. Sıcak suyun, terazi üzerine yerleştirilmiş bir tank içerisine geçişi sağlanır ve eş zamanlı olarak gaz debisinin ölçümüne başlanır. Suyun dönüş ve gidiş sıcaklıklarının, yeterince doğru bir ortalama değeri elde etmek için periyodik olarak okunmasına devam edilir.

Faydalı verim, aşağıdaki formül kullanılarak tayin edilir:

$$n_u = \frac{4,186 \cdot m \cdot (t_2 - t_1) + D_p}{10^3 \cdot V_{r(10)} \cdot H_i} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Burada:

n_u (%): Faydalı verim,

m (kg): Su miktarı,

$V_{r(10)}$ (m³): Deney esnasında ölçülen gaz debisi (düzeltilmiş-1013,25 mbar, 15°C, kuru gaz),

H_i (MJ/m³): Kullanılan gazın alt ısı değeri (düzeltilmiş-1013,25 mbar, 15°C, kuru gaz),

D_p (kJ): Ortalama su gidiş sıcaklığına karşılık gelen, deney düzeneğinden olan ısı kaybıdır.

Test 4 - Sınır şartları / Deney No 2 (alev geri tepmesi)

Referans: EN1552, madde 8.6.2

Amaç: Yakıta hidrojen ilavesi sebebiyle artan geri tepme riskinden dolayı, daha yüksek hidrojen konsantrasyonu içeren bir sınır gaz ile sınır koşullar test edilip, geri tepme meydana gelmediği teyit edilecektir.

EN15502'ye göre, standartta belirtilen deney şartları altında ve durgun havada, ateşleme ve yanma, doğru bir şekilde, hızlıca ve sessizce gerçekleştirilebilmelidir. Alevler kararlı olmalıdır. Ateşleme anında az bir alev kopma eğilimine müsaade edilebilir, ancak alevler bundan sonra kararlı olmalıdır. Kazanın ilk ayarı değiştirilmeden, referans gazlar, uygun olan alev tepmesi sınır gazı ile değiştirilir ve kazan girişindeki basınç en düşük basınca düşürülür. Bu deney verilen en düşük ısı ve en yüksek girdisinde tekrarlanır.

Sınır gazları için atıfta bulunulan standart olan EN437'ye göre, doğalgaz ile uyumlu olacak yani referans gazı CH₄ olan cihazlarda, alev geri tepme testlerinin yapılması gereken sınır gaz %23 oranında hidrojen içeren G222 olarak belirlenmiştir.

Referans gazın %80 CH₄ ve %20 H₂ içereceği ürünlerin uygunluk testlerini yapmak için, Avrupa'nın önde gelen bazı belgelendirme kuruluşları (DVGW, IMQ S.p.A gibi) alev geri tepmesi testleri esnasında %65 CH₄ ve %35 H₂ içeren sınır gazlarının kullanılmasını şart koşturmaktadır.

Tez kapsamında yapılan testlerde ise, daha da kötü bir koşulu canlandırmak ve çok daha yüksek hidrojen konsantrasyonlarında sınır şartı testlerinin gerekliliklerinin yerine getirilebildiğini göstermek adına %50 CH₄ ve % 50 H₂ içeren sınır gazı kullanılacaktır.

Test 5 - İyonizasyon akımı

Referans: (ilgili standartlarda böyle bir test bulunmamaktadır)

Amaç: Cihazın maksimum ve minimum kapasite aralığında okunan iyonizasyon değerlerinin bir eğri haline getirilerek karşılaştırılması, farkın irdelenmesi ve karışım gazı ile çalışma koşulunda kritik değerlerin altına inmediğinin teyit edilecektir.

Test 6 – Gaz devresinin sızdırmazlığı

Referans: EN15502, madde 8.2.1

Amaç: Çalışma esnasında uygun sensörler kullanılarak kabin içerisinde ve özellikle bağlantı noktalarında kaçak olup olmadığı kontrol edilecektir.

Deney şartları: Testler imalatçının talimatlarında rutin bakım için sökülmesi gereken gaz devresindeki gaz sızdırmaz bağlantılar yerlerinden 5 kez söküldükten ve yerlerine tekrar takıldıktan sonra gerçekleştirilmelidir.



4. TEST SONUÇLARI VE SONUÇ ÖZETLERİ

Bu bölümde **EK-F**'de sunulan raporlara göre edinilen sonuçlar ve bu sonuçların teorik inceleme ile karşılaştırılması yapılmıştır.

4.1. 1, 2 ve 3 Numaralı Testlerin Sonuçları

Kapasite, verim ve emisyon ölçümlerinin yapıldığı testlerin özet sonuçları Tablo 4.1'de belirtilmiştir.

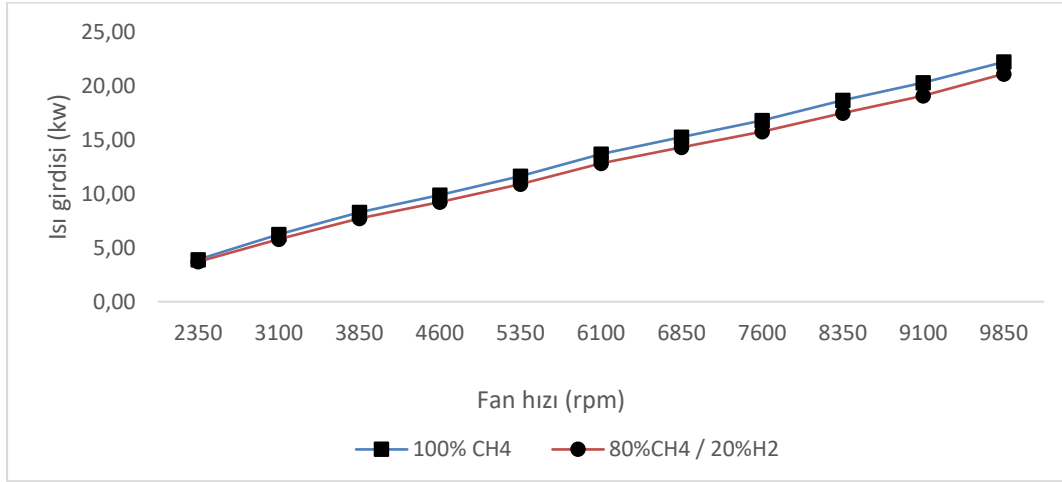
Tablo 4.1. Kapasite, emisyon ve verime ilişkin özet test sonuçları.

Test	Değer	Referans (EN15502)	Sembol	Birim	Kapasite	Sonuç %100 CH4 %0 H2	Sonuç %80 CH4 %20 H2
1	Isı Girdisi	madde 8.4.1	$Q_{n,min}$	kW	min.	3,94	3,79
			Q_n	kW	maks.	22,53	21,40
1	CO	madde 8.4.1	-	ppm	min.	10	10
	Konsantrasyonu		-	ppm	maks.	71	42
1	CO ₂	madde 8.4.1	-	%	min.	8,70	7,76
	Konsantrasyonu		-	%	maks.	9,30	8,26
1	O ₂	madde 8.4.1	-	%	min.	5,44	6,26
	Konsantrasyonu		-	%	maks.	4,34	5,40
1	Atık Gaz	madde 8.4.1	-	°C	min.	44,76	48,56
	Sıcaklığı		-	°C	maks.	61,78	61,36
2	NOx	madde 8.13	-	mg/kWh		18,9	11,7
	konsantrasyonu						
	NOx sınıfı		NOx	-		6	6
3	Verim	madde 9.2	-	%	maks.	101,91%	101,93%

Ayrıca, tüm modülasyon aralığında artan fan hızıyla birlikte ısı girdisinin, CO ve CO₂ emisyonlarının değişimi de hem %100 CH₄ için karışım gazı için karşılaştırmalı olarak Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de belirtilmiştir.

Isıl güç: Teorik incelemede, hidrojen gazının metana kıyasla kalorifik değeri daha düşük olduğu için, karışım gazından elde edilecek ısıl gücün düşeceği ön görülmüştür. %100 CH₄ ve %20 oranında H₂ içeren gaz karışımının Wobbe indeksleri arasında

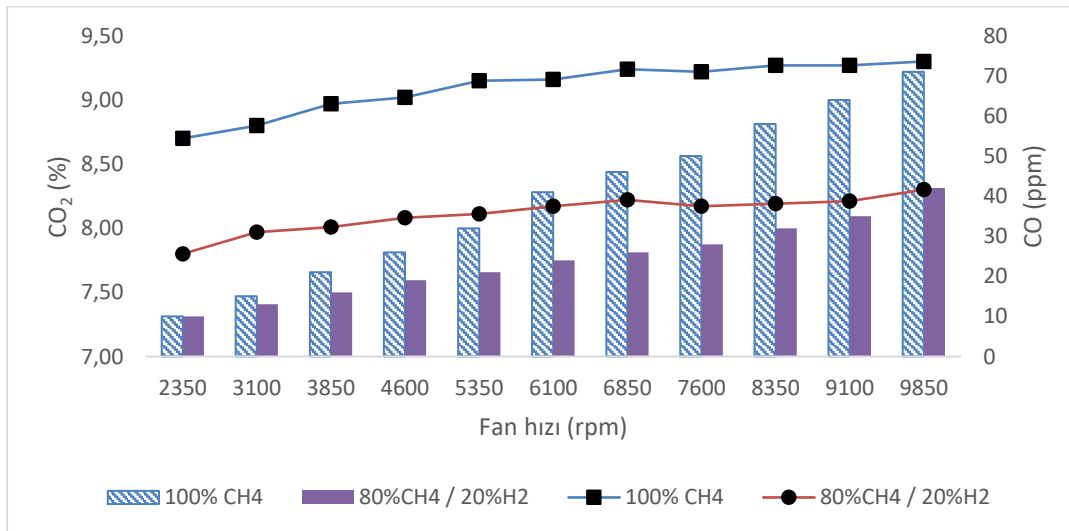
%5'lik bir fark hesaplanmıştır. Yani teorik incelemeye göre ısıl gücün, tam yanma koşulunda minimum %5 düşmesi beklenmiştir.



Şekil 4.1. Modülasyon aralığı boyunca ısı girdisinin değişimi.

Yapılan testler neticesinde ısıl gücün, minimum kapasitede %5, maksimum kapasitede ise %4,0 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Buna göre yapılan teorik inceleme ile deneysel çalışmanın sonuçları örtüşmektedir.

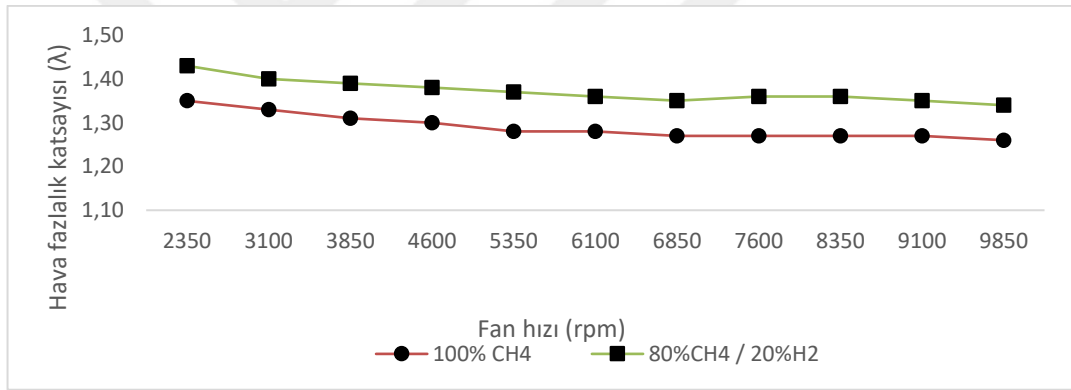
CO ve CO₂ emisyonları: Teorik incelemede yanma reaksiyonuna giren metan oranının, yani karbon temelli yakıtın azalmasına paralel olarak CO₂ emisyonlarının azalması ön görülmüştür ve bu test sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Buna göre yapılan teorik inceleme ile deneysel çalışmanın sonuçları örtüşmektedir. CO emisyonları konusunda yapılan öngörü artan hava fazlalık katsayısı sebebiyle alevin kararsız hale gelmemesi koşuluyla yine azalma eğiliminde olacağı yönündedir.



Şekil 4.2. Modülasyon aralığı boyunca CO₂ ve CO emisyonlarındaki değişim.

Testler esnasında artan hava fazlalık katsayısının alev stabilizasyonuna olumsuz bir etkisinin olmadığı, alevin kararlı bir şekilde oluştuğu ve dolayısı ile CO emisyonlarını artıracak yönde bir etki yaratmadığı teyit edilmiştir. Dolayısı ile CO emisyonlarının, ön görüldüğü şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Buna göre yapılan teorik inceleme ile deneysel çalışmanın sonuçları örtüşmektedir.

Hava fazlalık katsayısı: Teorik incelemede göre H_2 'nin CH_4 'e kıyasla daha düşük minimum hava gereksinimine sahip olmasından dolayı, %20 oranında H_2 içeren karışım için saf CH_4 'e kıyasla yakıt birimi başına daha az hava gerekeceği sonucu çıkarılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda karışım gazı ile yapılan testlerde alınan baca gazı emisyonu ve baca gazındaki O_2 ölçümleri sonucu yapılan hesaplara göre hava fazlalık katsayısının, tüm modülasyon aralığında saf CH_4 'e kıyasla arttığı gözlemlenmiştir. Buna göre yapılan teorik inceleme ile deneysel çalışmanın sonuçları örtüşmektedir.



Şekil 4.3. Modülasyon aralığında hava fazlalık katsayıları.

NO_x emisyonları: Teorik incelemeye göre NO_x oluşumuna ilişkin öngörü, NO_x emisyonları yakıt içeriğinden ziyade yanma odası sıcaklıkları ve bu sıcak bölgelerdeki oksijen varlığı ile orantılı olduğundan dolayı, her ne kadar beklenti azalacağı yönünde olsa da CO ve CO_2 emisyonlarına oranla teyide daha muhtaçtır. Yapılan testlerde, zaten yüksek olan hava fazlalık katsayısının hidrojen takviyesi ile daha da artması, yakıt özellikleri sebebiyle yükselecek adyabatik yanma sıcaklıklarını dengelemiştir ve sonuç olarak NO_x emisyonları azalmıştır. Buna göre yapılan teorik inceleme ile deneysel çalışmanın sonuçları örtüşmektedir.

Verim: Teorik incelemeye göre yanma gazındaki artan hidrojen oranı ile yanma reaksiyonunda verimi hem azaltıcı hem de arttırıcı farklı etkiler meydana gelmesi beklenmektedir. Bu etkilerin birbirini ne derece dengeleyeceğine dair bir ön görüde

bulunulamamıştır. Yapılan testler sonucu hesaplanan yanma verimleri saf doğalgaz ve karışım gazı için neredeyse aynıdır. Dolayısı ile öngörüldüğü üzere verimi arttırıcı ve azaltıcı etkiler birbirini dengelemiştir ve yakıta %20 oranında hidrojen eklenmesi cihazın yanma verimini verimi olumlu ya da olumsuz etkilememiştir.

4.2. 4 Numaralı Testin Sonucu

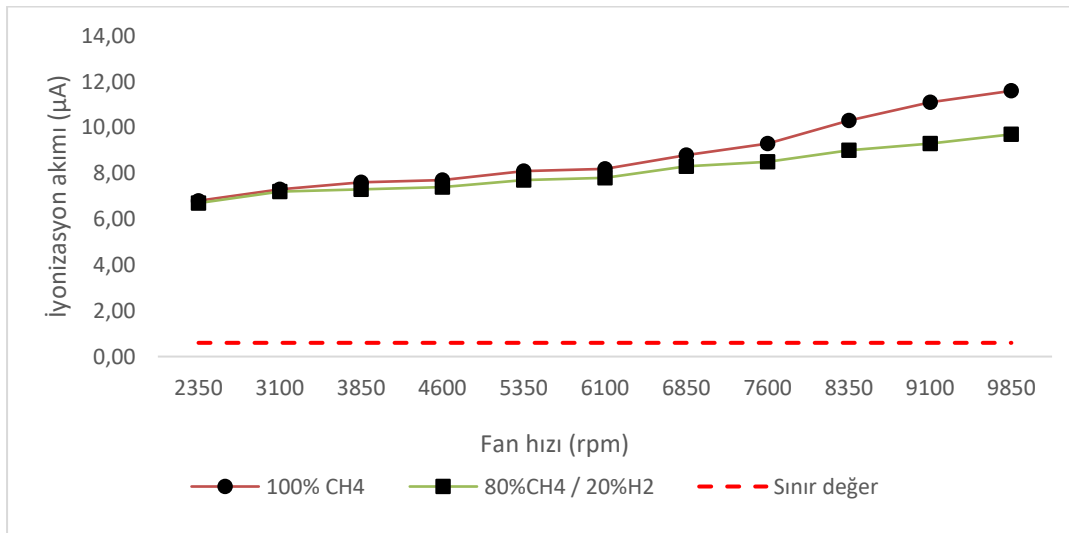
Alev geri tepmesi için sınır gazları ile farklı koşullarda yapılan testlerin sonuçları aşağıda belirtilmiştir. “Geçti” sonucu belirtilen koşullarda ateşlemenin sorunsuz bir şekilde oluştuğunu ve yanmanın kararlı bir şekilde devam ettiğini simgelemektedir.

Tablo 4.2. Alev geri tepme testi sonuçları.

	Deneme 1		Deneme 2		Deneme 3		Deneme 4	
Referans Gaz	%100 CH ₄ + %0 H ₂				%80 CH ₄ + %20 H ₂			
Sınır Gazı	%77 CH ₄ + %23 H ₂				%50 CH ₄ + %50 H ₂			
Isıl Yük	Maksimum		Minimum		Maksimum		Minimum	
Ateşleme koşulu	Sıcak	Soğuk	Sıcak	Soğuk	Sıcak	Soğuk	Sıcak	Soğuk
Sonuç	Geçti	Geçti	Geçti	Geçti	Geçti	Geçti	Geçti	Geçti

4.3. 5 Numaralı Testin Sonucu

Hem %100 CH₄ hem de karışım gazı ile tüm modülasyon aralığında yapılan iyonizasyon akımı ölçümleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Buna göre hidrojen takviyeli gaz ile, en düşük ısıl güçte ölçülen, en düşük iyonizasyon akımı, cihazın çalışmasına izin verilen sınır iyonizasyon akımı değeri olan 0.6 µA değerinden çok daha yüksektir.



Şekil 4.4. Modülasyon aralığında iyonizasyon akımları.

4.4. 6 Numaralı Testin Sonucu

Gaz devresinin sızdırmazlığı, standarda uygun şekilde üretici talimatlarında rutin bakım için sökülmesi gereken gaz devresindeki gaz sızdırmaz bağlantılar yerlerinden 5 kez söküldükten ve yerlerine tekrar takıldıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Bağlantı noktaları, portatif bir gaz kaçak cihazı kullanılarak kontrol edilmiştir ve kontrol cihazında ne CH₄' için, ne de H₂ için bir kaçağa rastlanmamıştır.





5. SONUÇLARIN YORUMLANMASI

5.1. Ürün Performansı

Testler ile teyit edildiği üzere doğalgaz içerisinde hidrojen gazı eklenmesi, sabit yakıt gazı giriş basıncında çalışan cihazlar, ki temel olarak tüm ev tipi cihazlar böyle çalışmaktadır, ısıtma girdisini azaltacaktır. Bu durumun kullanıcı konforuna etkileri birkaç başlık altında incelenebilir.

Mahal ısıtması açısından konuyu ele alırsak, şu anda pazarda bulunan duvar tipi kazanların ısıtma kapasitelerini belirleyen temel unsur, ısıtılacak mahalin ısıtma kaybı miktarı değil, konforlu bir kullanım sıcak suyu elde etmek için gereken minimum enerji miktarıdır. Diğer bir yandan, ev tipi cihazların büyük bir çoğunluğu ani ısıtıcı tiptedir. Yani kullanım sıcak suyu, şebekeden gelen kullanım suyunun ana eşanjörde ısınan ısıtma suyu kullanılarak cihaz içerisindeki bir plakalı eşanjörde ısıtılmasıyla elde edilmektedir. Dolayısıyla cihazdan alınabilecek maksimum sıcak su debisi, cihazın kapasitesiyle doğru orantılıdır.

Bu iki konuyu özetleyip, bir örnekle daha detaylı açıklamak gerekirse: Örneğin Türkiye pazarında satılan duvar tipi kazanların büyük bir çoğunluğunun ısıtma gücü 24 kW civarındadır. Ortalama 100 m²'lik bir daireyi ele alırsak, 24 kW ısıtma gücü, bu dairenin ısıtma kayıplarından çok daha fazladır. Fakat ısıtma gücü ihtiyacını belirleyen asıl faktör, yukarıda da belirtildiği üzere kullanım sıcak suyu talebidir. Bir kişinin konforlu bir şekilde banyo yapabilmesi için temin edilmesi gereken sıcak su debisini elde etmek için ısıtma gücü 24 kW mertebelerinde olması gerekmektedir.

Doğalgaz içerisine hidrojen takviyesi sebebiyle cihazın ısıtma gücünün düşmesinin, bu bağlamda mahal ısıtması açısından fark edilebilir bir konforsuzluk yaratmayacaktır. Kapasitenin düşmesinin kullanım sıcak suyu performansına olan etkisi, özellikle tesisat suyu sıcaklığının düşük olduğu kış aylarında daha gözlemlenebilir olsa da, %10'luk bir kapasite düşüşün müşteri tarafında bir memnuniyetsizlik yaratmayacağı beklenmektedir.

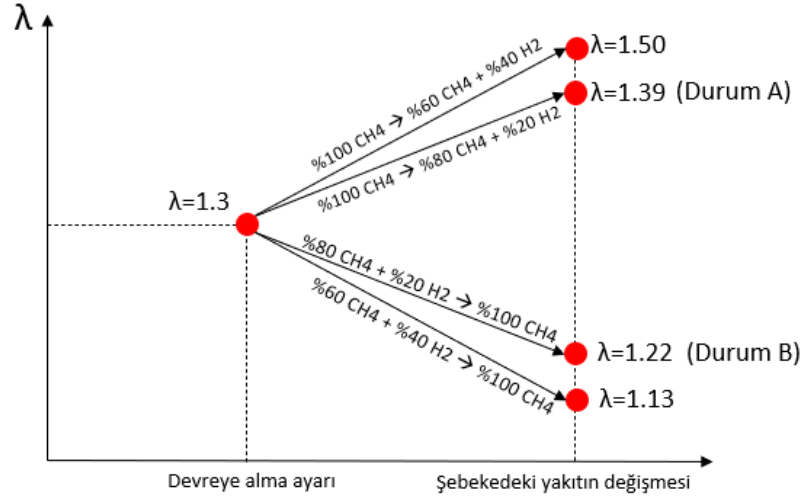
5.2. Ürünün Devreye Alınması

Bir ev veya ticari binada gaz yakan cihaz çalıştırırken en yaygın endişelerden biri, hem zehirli hem de yanıcı bir gaz olduğundan, CO emisyonlarıdır. Bu nedenle, mevcut gaz altyapısına hidrojen katkısının cihazlarda artan CO emisyonlarına yol açmaması çok önemlidir. Teorik incelemede açıklandığı gibi, CO oluşumu hava fazlalık katsayısı λ ve dolayısı ile cihazın fabrika ayarları ile yakından ilişkilidir. Bununla birlikte, dağıtılan doğal gazda değişen seviyelerde hidrojen bulunması, gaz yakan cihazlar için ortak ayarlama uygulamalarının yeniden değerlendirilmesi gerekebileceği anlamına gelir.

Teorik olarak, GAR (Gas Appliance Regulation) [16] ve bundan önceki geçerli direktif olan GAD (Gas Appliance Directive) [17] gerekliliklerine uygun şekilde üretilen cihazlar, üretici firmaları tarafından, üretim esnasında, sahada çalışacağı gaz tipine uygun bir referans gaz kullanılmak suretiyle uygun bir hava fazlalık katsayısı ile çalışacak şekilde ayarlanır.

Doğalgaz için, EN 437 [7] standardında göre bu referans gaz G20 olarak tanımlanır. Cihazın tasarımı esnasında ayarlamaları bu referans gazla yapıp, cihaz daha sonra sahada doğalgaz yerine doğalgaz-hidrojen karışımı ile çalıştırıldığında hava fazlalık katsayısı artacak ve tasarım değerinin üstüne çıkacaktır.

Pratikte bugün, sahada devreye alınan cihazlar devreye alma esnasında yetkili servis tarafından, gaz kalitesinin yerel olarak değişmesinden dolayı baca gazı ölçümü yapmak suretiyle, cihazın CO₂ yada O₂ emisyonlarının üretici firmanın beyan ettiği uygun aralıkta yer alacağı şekilde, yani uygun hava fazlalık katsayısı ile çalışması için ayarlanmaktadır [24]. Şebekedeki gaz kalitesinin dalgalanması hali hazırda emisyonlar için sorun oluşturmakla birlikte, şebekedeki doğalgaza ilave edilen hidrojen miktarının dalgalanması da beraberinde cihazın uygun ayarının nasıl yapılacağı hususunda yeni soru işaretleri oluşturmaktadır.



Şekil 5.1. İlk cihaz ayarının hava fazlalık katsayısı (λ) üzerindeki etkisi.

Durum A'da Devreye alma esnasında şebekede tamamen doğalgaz bulunmaktadır ve cihaz teknik servis tarafından $\lambda=1.3$ 'e göre ayarlanmıştır. Akabinde şebeke gazına %20 oranında hidrojen eklendiğinde hava fazlalık katsayısının değişimi gösterilmiştir.

Durum B: Devreye alma esnasında şebekede %20 hidrojen takviyeli doğalgaz bulunmaktadır ve cihaz teknik servis tarafından $\lambda=1.3$ 'e göre ayarlanmıştır. Akabinde tamamen doğalgaz verildiğinde hava fazlalık katsayısının değişimi gösterilmiştir.

Özetle devreye alma esnasında şebeke gazı hidrojen içermiyorsa, ayarlanan hava fazlalık katsayısı şebekedeki hidrojen oranının artması durumunda artacaktır. Bu durumun CO emisyonlarına olumlu yönde etki edeceği öngörülmüş ve teyit edilmiştir.

Fakat devreye alma ve ayarlama esnasında şebeke gazı yüksek oranda hidrojen içeriyorsa, ayarlanan hava fazlalık katsayısı şebekedeki hidrojen oranının azalması yada şebekeye saf doğalgaz verilmesi durumunda azalacaktır ve potansiyel olarak CO emisyonlarının artması ile sonuçlanacaktır. Bu durumda cihazın CO emisyonlarının, standart ile belirlenen değerlerin üstüne çıkmayacağı üretici tarafından kontrol edilmelidir.

5.3. Güvenlik

Teorik inceleme sonucu, yakıta hidrojen takviyesi ile oluşma ihtimali dile getirilen en önemli risk alev geri tepmesidir. Günümüzde EN15502 standardı gereğince, doğalgazla çalışacak cihazlar için EN437 [7] standardında belirtildiği üzere %23 hidrojen içeren bir sınır gazı (G222) ile alev geri tepme testleri yapılmaktadır.

Buradaki amaç, Őebekeye verilen doğalgazın gaz kalitesi sűreçli aynı olmayacağından dolayı, en kötü koŐulda bile cihazın alev geri tepmesine yol açmadan, kararlı bir Őekilde yanacağını teyit etmektir. Proje kapsamında, test edilen cihazın %50 oranında hidrojen içeren sınır gaz ile geri tepmesi açısından sorun teşkil etmediği tespit edilmiŐtir.

5.4. Diğer

Yakıt içerisindeki hidrojen oranı arttıkça, yanma sonucu oluşacak yoğuşma suyu miktarının artacağı daha önce teorik incelemede belirtilmiştir. Bu durum, kısa vadede ürün performansı yada güvenliği açısından bir sorun teşkil etmese de, yoğuşma suyunun asidik olduğu dikkate alındığında artan yoğuşma miktarının uzun vadede eŐanjörü daha kısa sürede aşındırabilir ve eŐanjörün ürün ömrünü azaltabilir. Bu etkinin ne denli büyük olduğunu anlamak için, ürünün uzun süren ömür testlerine tabi tutulması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; Connors, S.L.; Pean, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen, Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M.I.(2021).IPCC 2021: Summary for Policymakers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis; Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*
- [2]. U.S. Environmental Protection Agency(2021).Carbon Dioxide Emissions Coefficients by Fuel. *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2021*
- [3]. Flayyih, M.; Schaffert, J.; Carpentier, S.; Burmeister, F.; Albus, R.; Görner, K.(2020).THyGA project: Market segmentation of domestic and commercial natural gas appliances, Testing Hydrogen admixture for Gas Applications (THyGA); EU project, grant agreement no. 874983 (Project Report - Deliverable D2.1). *Essen, Germany; Stains, France : Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI)*
- [4]. GAZBİR-GAZMER Uluslararası İlişkiler Komisyonu(Temmuz 2020).Doğal Gaz Sistemlerinde Hidrojene Geçiş : Avrupa Örneği. *GAZBİR*
- [5]. Akman, M.A.; Marancı, M.K.; Sarıkaya, M.Ş.(Mart 2021).Doğal Gaz Sektörü Hidrojene Geçişte Yol Haritası Önerileri. *GAZBİR*
- [6]. Hodges, J.P; Geary, W.; Graham, S.; Goff, R.(2015).Injecting hydrogen into the gas network – a literature search. *Health and Safety Laboratory, Harpur Hill*
- [7]. Comité Européen de Normalisation(2003).EN 437 Test gases -Test pressures - Appliance categories. *Brussels, Belgium, European Norm EN 437:2003*
- [8]. (June 2021).HyDeploy Project: Project Close Down Report.
- [9]. Schaffert, J.; Fischer, P.; Leicher, J.; Burmeister, F.; Flayyih, M.; Cigarida, H.; Albus, R.; Görner, K.(December 2020).Impact of hydrogen admixture on combustion processes – Part II: Practice. *Essen, Germany; Stains, France : Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI)*
- [10]. Leicher, J.; Schaffert, J.; Carpentier, S.; Albus, R.; Görner, K.(24th of November, 2021).Impact of hydrogen admixture on combustion processes – Part I: Theory.
- [11]. Inoue, K.; Miyamoto, K.; Domen, S.; Tamura, I.; Kawakami, T.; Tanimura, S. (June 2018).Development of Hydrogen and Natural Gas Co-firing Gas Turbine. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 55 No. 2*
- [12]. Jones, H.R.N.(1989).The Application of Combustion Principles to Domestic Burner Design. *Taylor & Francis*

- [13]. Hermanns, R.T.E.(2007).Laminar Burning Velocities of Methane-Hydrogen-Air Mixtures. *Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, The Netherlands*
- [14]. Dzubiella, M.; Hack, S.; Gleim, E.; Hesse, W.; Vogt, A.; Brämer, R.(2017).Entwicklungsstand gasadaptiver Verbrennungsregelungssysteme für den Bereich der Gebäudebeheizung. 28. *Deutscher Flammentag, Darmstadt, Germany*
- [15]. Carpentier, S.; Milin, P.; Mostefaoui, N.; Nitschke-Kowsky, P.; Schweitzer, J.; Sadegh, N.; Thibaut, O.(2018).Self-regulated gas boilers able to cope with gas quality variation - State of the art and performances.
- [16]. (2016).Regulation (EU) 2016/426 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2016 on appliances burning gaseous fuels and repealing Directive 2009/142/EC. *Brussels, Belgium, Regulation (EU) 2016/426*
- [17]. (2009).Directive 2009/142/EC of the European Parliament and the Council of 30 November 2009 relating to appliances burning gaseous fuels. *European Union, Brussels, Belgium, Directive 2009/142/EC*
- [18]. Leicher, J.; Nowakowski, T.; Giese, A.; Görner, K.(2018).Hydrogen in natural gas: how does it impact industrial end users?. *World Gas Conference 2018, Washington DC, USA*
- [19]. Nowakowski, T.; Leicher, J.; Giese, A.(2017).Untersuchungen der Auswirkung von Wasserstoff-Zumischung ins Erdgasnetz auf industrielle Feuerungsprozesse in thermoprozesstechnischen Anlagen. *Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Essen, Schlussbericht IGF-Vorhaben Nr. 18518/1*
- [20]. Hankinson, G.; Mathurkar, H.; Lowesmith, B.J.(17 September 2009).Ignition Energy and Ignition Probability of Methane-Hydrogen-Air Mixtures. *International Conference on Hydrogen Safety*
- [21]. Verhelst, S.; Demuynck, J.; Sierens, R.; Scarcelli, R.; Matthias, N.S.; Wallner, T.(December 2013).Update on the Progress of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines. *Renewable Hydrogen Technologies, Chapter 18*
- [22]. Askar, E.; Schrödera, V.; Schützb, S.; Seemann,A.(2016).Power-to-Gas: Safety Characteristics of Hydrogen/NaturalGas Mixtures. *Chemical Engineering Transactions Vol. 48*
- [23]. Jin, Y., Fan, Y., Meng, X., Zhang, W., Meng, B., Yang, N., Liu, S.(2019).Theoretical and Experimental Insights into the Mechanism for Gas Separation through Nanochannels in 2D Lamina MXene Membranes. *MDPI*
- [24]. Leicher, J., Giese, A., Görner, K., Wersch, M., Krause, H., Dörr, H.(2017).Statistical Surveys on the Sensitivities of Industrial End-Users to Gas Quality Fluctuations in Germany. *International Gas Union Research Conference (IGRC), Rio de Janeiro, Brasilien*

EKLER

EK A. Olası Hata Türleri ve Etki Analizi

EK B. Gaz karışımları için fiziksel özellikler ve yanma özellikleri

EK C. Gaz karışımları için adyabatik yanma sıcaklıkları

EK D. Gaz karışımları için teorik laminar alev hızları

EK E. Gaz karışımları için teorik emisyonlar



EK A

Parametre	Hata modu	Muhtemel neden ve sorun	Tasarımda alınacak önlem	Doğrulama (Test yöntemi)
Kalorifik değer	1.Kapasitedeki değişim	Karışım gazının ısı değeri saf doğalgaza oranla daha düşük olduğu için, kazanın ısı gücü düşecektir. (Bkz. EK B) Net Kalorifik Değer (Hi) %100 CH4: 36,06 MJ/m ³ %80 CH4 / %20 H2: 31,01 MJ/m ³ Ayrıca bu durum, cihazın ısı verimini de etkileyebilir.	Standartta uygun olarak kapasite ve verim testleri, hem saf metan ile hem de karışım gazıyla EN standardına uygun şekilde yapılmalı ve sonuçlar karşılaştırılmalıdır.	Anma ısı girdisinin veya en yüksek ve en düşük ısı girdisinin tayini (Bkz. 8.4.1 @EN15502) Anma ısı yükünde faydalı verim (Bkz. 9.2 @EN15502)
Alev hızı	1.Üründe hasar 2.Uygun olmayan yanma	Karışım gazındaki hidrojenden dolayı, laminar yanma hızı doğalgaza oranla daha fazla olacaktır. (Bkz. EK D) örneğin Φ:0,80 için %100 CH4: 23 cm/s %80 CH4 / %20 H2: 29 cm/s Bu özellikle düşük fan hızlarında, yani düşük kapasitelerde geri tepme olma riskini arttırmaktadır.	Karışım gazı için otoriteler tarafından belirlenmiş bir geri tepme sınır gazı yoktur. İtalya gaz komitesinin yayınladığı taslak standart baz alınarak, %35 H2 içeren bir doğalgaz-hidrojen karışım gazıyla sınır koşul testleri EN standardına uygun şekilde yapılabilir.	Sınır şartları (Bkz. 8.6.2 @EN15502) Ayrıca Bkz. UNI1609377 (Comitato Italiano Gas) Tez kapsamında yapılan testlerde , daha da kötü bir koşulu canlandırmak ve çok daha yüksek hidrojen konsantrasyonlarında sınır şartı testlerinin gerekliliklerinin yerine getirilebildiğini göstermek adına %50 CH4 ve % 50 H2 içeren sınır gazı kullanılacaktır.
Alev sıcaklığı	1.Emisyonlar	Karışım gazındaki hidrokarbon oranı azaldığı için CO ve CO2 emisyonlarının azalması beklenir. (Bkz. EK E) Fakat NOx emisyonları, brülör ve eşanjör sıcaklıkları artarsa için yükselebilir.	EN standardına uygun olarak emisyon ölçümleri gerçekleştirilmeli ve emisyonların sınır değerlerin altında kaldığı teyit edilmeli	Anma ısı girdisinin veya en yüksek ve en düşük ısı girdisinin tayini (Bkz. 8.4.1 @EN15502) NOx (Bkz. 8.13 @EN15502)
İyonizasyon akımı	1.Alev kaybı	Karışım gazındaki hidrojenden dolayı, özellikle düşük kapasitelerde okunan iyonizasyon sinyali sınır değerinin altına düşebilir ve bu cihazın yanmayı sonlandırmasıyla sonuçlanabilir	Hem karışım gazı hem doğalgaz için, cihazın maksimum ve minimum kapasite aralığında okunan iyonizasyon değerlerinin eğrilerinin karşılaştırılması ve kritik değerlerin altına inmediğinin teyit edilmesi gerekmektedir.	Minimum-Maksimum kapasite aralığında iyonizasyon akımı eğrilerinin çıkarılması ve karşılaştırılması
Molekül boyutu	- Gaz kaçağı	Karışım gazındaki hidrojenden dolayı, yanmamış gazın parça yüzeyleri yada sızdırmazlık elemanlarından dışarıya kaçma riski saf doğalgaza oranla daha yüksektir.	Çalışma esnasında uygun sensörler kullanılarak kabin içerisinde ve özellikle bağlantı noktalarında kaçak olup olmadığı kontrol edilmeli.	H2 ve CH4 sensörleri ile gaz kaçak kontrolü

EK B

Karışımdeki hacimsel oran		Brüt Kalorifik Değer (Hs)			Net Kalorifik Değer (Hi)			Yoğunluk (15°C / 1 bar)			Brüt k. değer (Hs)	Net k. değer (Hi)	Min. hava ihtiyacı	Bağıl yoğunluk (d)
%		MJ/m3			MJ/m3			kg/m3			kg/m3	kg/m3	-	-
CH4	H2	CH4	H2	Karışım	CH4	H2	Karışım	CH4	H2	Karışım	Karışım	Karışım	Karışım	Karışım
100	0	39,9	0,0	39,9	36,1	0,0	36,1	0,67	0,00	0,67	60	54	9,5	0,55
90	10	35,9	1,3	37,2	32,5	1,1	33,5	0,60	0,01	0,61	61	55	8,8	0,50
80	20	32,0	2,6	34,5	28,8	2,2	31,0	0,54	0,02	0,55	62	56	8,1	0,45
70	30	28,0	3,8	31,8	25,2	3,2	28,5	0,47	0,03	0,49	64	58	7,4	0,40
60	40	24,0	5,1	29,1	21,6	4,3	26,0	0,40	0,03	0,44	67	60	6,6	0,36
50	50	20,0	6,4	26,4	18,0	5,4	23,4	0,34	0,04	0,38	70	62	5,9	0,31
40	60	16,0	7,7	23,6	14,4	6,5	20,9	0,27	0,05	0,32	74	66	5,2	0,26
30	70	12,0	8,9	20,9	10,8	7,6	18,4	0,20	0,06	0,26	80	71	4,5	0,21
20	80	8,0	10,2	18,2	7,2	8,7	15,9	0,13	0,07	0,20	90	79	3,8	0,16
10	90	4,0	11,5	15,5	3,6	9,7	13,4	0,07	0,08	0,14	109	94	3,1	0,12
0	100	0,0	12,8	12,8	0,0	10,8	10,8	0,00	0,08	0,08	152	129	2,4	0,07

EK B (devamı)

Karışımındaki hacimsel oran		Wobbe indeksi (Ws)	CARI	$\lambda_{\text{karışım}}$ *	$\lambda_{\text{karışım}}$ *	$\Lambda_{\text{karışım}}$ *	$\Lambda_{\text{karışım}}$ *
%		MJ/m ³	-				
CH ₄	H ₂	Karışım	Karışım	Denklem 2.6'ya göre	Denklem 2.7'ye göre	Denklem 2.9'ya göre	Denklem 2.10'ya göre
100	0	53,965	12,84	1,25	1,00	1,25	1,25
90	10	52,651	12,43	1,35	1,01	1,29	1,25
80	20	51,331	12,00	1,47	1,02	1,34	1,25
70	30	50,017	11,57	1,61	1,03	1,39	1,25
60	40	48,724	11,13	1,79	1,04	1,44	1,25
50	50	47,482	10,67	2,00	1,06	1,50	1,25

* Bu 4 sütunda bulunan değerler "2.4 Yanma Sitokiyometrisi" başlığı altında bulunan ve yukarıdaki tabloda numaraları verilen denklemler vasıtasıyla, yine aynı başlıkta bulunan ve Şekil 2.6. ile belirtilen grafiği oluşturmak için hesaplanmıştır.

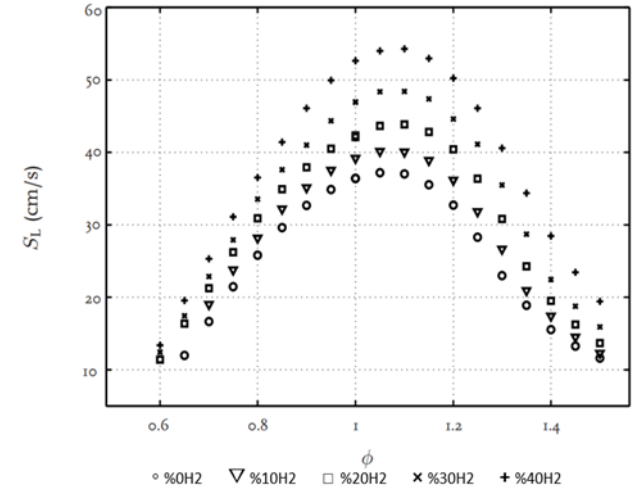
EK C

Adyabatik yanma sıcaklıkları (Tyakıt = 300K, Thava = 300K, p = 1 atm)											
Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	%100 CH4	%20 H2	%30 H2	%50 H2	%100 H2	Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	%100 CH4	%20 H2	%30 H2	%50 H2	%100 H2
0,60	1804 K	1830 K	1846 K	1890 K	2174 K	0,60	1531 °C	1556 °C	1573 °C	1617 °C	1901 °C
0,65	1880 K	1904 K	1924 K	1965 K	2228 K	0,65	1607 °C	1631 °C	1651 °C	1691 °C	1955 °C
0,70	1957 K	1980 K	1994 K	2031 K	2273 K	0,70	1683 °C	1707 °C	1721 °C	1758 °C	2000 °C
0,75	2026 K	2047 K	2059 K	2093 K	2314 K	0,75	1753 °C	1774 °C	1786 °C	1820 °C	2041 °C
0,80	2091 K	2110 K	2121 K	2151 K	2345 K	0,80	1818 °C	1836 °C	1848 °C	1878 °C	2072 °C
0,85	2150 K	2171 K	2181 K	2208 K	2378 K	0,85	1877 °C	1898 °C	1908 °C	1935 °C	2105 °C
0,90	2204 K	2218 K	2227 K	2251 K	2397 K	0,90	1931 °C	1945 °C	1953 °C	1977 °C	2124 °C
0,95	2236 K	2247 K	2254 K	2272 K	2401 K	0,95	1963 °C	1974 °C	1981 °C	1999 °C	2128 °C
1,00	2231 K	2240 K	2246 K	2261 K	2382 K	1,00	1958 °C	1967 °C	1973 °C	1988 °C	2108 °C
1,05	2197 K	2205 K	2211 K	2226 K	2340 K	1,05	1924 °C	1932 °C	1938 °C	1953 °C	2066 °C
1,10	2151 K	2160 K	2164 K	2179 K	2301 K	1,10	1878 °C	1886 °C	1890 °C	1906 °C	2028 °C
1,15	2101 K	2109 K	2115 K	2130 K	2251 K	1,15	1828 °C	1836 °C	1842 °C	1857 °C	1978 °C
1,20	2051 K	2060 K	2065 K	2081 K	2205 K	1,20	1778 °C	1786 °C	1792 °C	1808 °C	1932 °C
1,25	2002 K	2011 K	2016 K	2033 K	2157 K	1,25	1729 °C	1738 °C	1743 °C	1760 °C	1884 °C
1,30	1955 K	1963 K	1969 K	1986 K	2110 K	1,30	1682 °C	1690 °C	1696 °C	1713 °C	1837 °C
1,35	1909 K	1918 K	1924 K	1940 K	2065 K	1,35	1636 °C	1645 °C	1651 °C	1667 °C	1792 °C
1,40	1866 K	1875 K	1881 K	1896 K	2020 K	1,40	1593 °C	1602 °C	1607 °C	1623 °C	1747 °C
1,45	1825 K	1833 K	1839 K	1856 K	1977 K	1,45	1551 °C	1560 °C	1566 °C	1583 °C	1704 °C
1,50	1785 K	1794 K	1800 K	1817 K	1937 K	1,50	1512 °C	1521 °C	1527 °C	1544 °C	1664 °C

EK D

09

Eşdeğerlik oranı (Φ)	Hava fazlalık katsayısı (λ)	Laminer alev hızı (cm/s)				
		%50 CH ₄ / %50 H ₂	%60 CH ₄ / %40 H ₂	%70 CH ₄ / %30 H ₂	%80 CH ₄ / %20 H ₂	%100 CH ₄ / %0 H ₂
0,60	1,67	17	14	11		
0,65	1,54	24	21	17		
0,70	1,43	31	28	23	18	15
0,75	1,33	37,5	33	28,5	24	19
0,80	1,25	44	38	34	29	23
0,85	1,18	50	43	38,5	33,25	27
0,90	1,11	56	48	43	37,5	31
0,95	1,05	60	51,5	46	40,25	33,5
1,00	1,00	64	55	48	43	36
1,05	0,95	65,5	57	49,5	44	36,75
1,10	0,91	67	59	50	45	37,5
1,15	0,87	66	57	49	43,75	36,25
1,20	0,83	65	55	47	42,5	35
1,25	0,80	61	52	44	38,75	32
1,30	0,77	57	49	40	35	29
1,35	0,74	51	43	35	30,5	24,5
1,40	0,71	45	37	30	26	20
1,45	0,69	38,5	31	25	21	15,5
1,50	0,67	32	25	20	16	11



indikatif CO ve CO₂ emisyonları (Tyakıt = 300K, Thava = 300K, p = 1 atm)

CO (birim:1/%)						CO ₂ (birim:1/%)					
Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	%100 CH ₄	%20 H ₂	%30 H ₂	%50 H ₂	%100 H ₂	Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	%100 CH ₄	%20 H ₂	%30 H ₂	%50 H ₂	%100 H ₂
0,90	0,0284	0,0269	0,0260	0,0234	0,0000	0,9000	0,0735	0,0684	0,0652	0,0566	0,0000
0,95	0,0167	0,0160	0,0155	0,0142	0,0000	0,9500	0,0812	0,0757	0,0722	0,0627	0,0000
1,00	0,0088	0,0085	0,0083	0,0078	0,0000	1,0000	0,0852	0,0795	0,0759	0,0661	0,0000
1,05	0,0047	0,0046	0,0046	0,0043	0,0000	1,0500	0,0855	0,0798	0,0762	0,0666	0,0000
1,10	0,0026	0,0026	0,0027	0,0026	0,0000	1,1000	0,0839	0,0785	0,0749	0,0655	0,0000
1,15	0,0016	0,0015	0,0015	0,0015	0,0000	1,1500	0,0816	0,0764	0,0730	0,0640	0,0000
1,20	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009	0,0000	1,2000	0,0791	0,0741	0,0709	0,0622	0,0000
1,25	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0000	1,2500	0,0766	0,0717	0,0686	0,0603	0,0000
1,30	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0000	1,3000	0,0740	0,0694	0,0664	0,0583	0,0000
1,35	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0000	1,3500	0,0716	0,0671	0,0642	0,0565	0,0000
1,40	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	1,4000	0,0693	0,0649	0,0622	0,0547	0,0000
1,45	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	1,4500	0,0671	0,0629	0,0602	0,0530	0,0000
1,50	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,5000	0,0651	0,0610	0,0584	0,0514	0,0000



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Volkan TÜR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Yıldız Teknik Üniversitesi / Makine Fakültesi / Makine Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2016, Sakarya Üniversitesi / Sosyal Bilimler Enstitüsü / İşletme
- **Yükseklisans** : Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2013-2023 Daikin Isıtma ve Soğutma Sistemleri San. Tic. A.Ş. Isıtma Bölümü Ar-Ge Mühendisi
- 2023 – Halen Daikin Isıtma ve Soğutma Sistemleri San. Tic. A.Ş. Isıtma Bölümü Ar-Ge Müdürü