

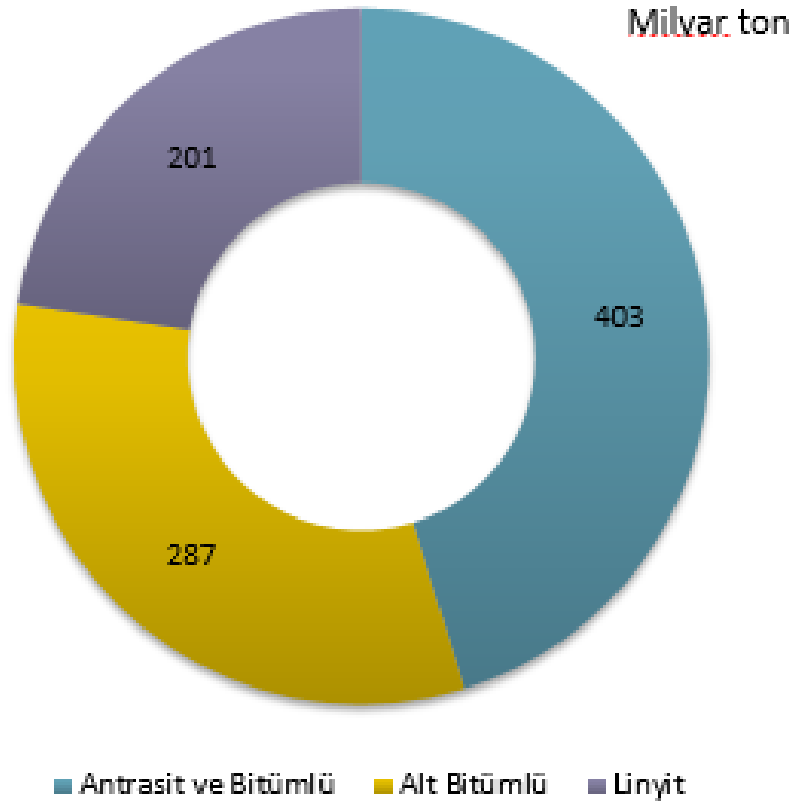
Kömürün Gazlaştırılmasıyla Hidrojen Üretilmesi



Ayşe Özer
TKİ Genel Müdürlüğü

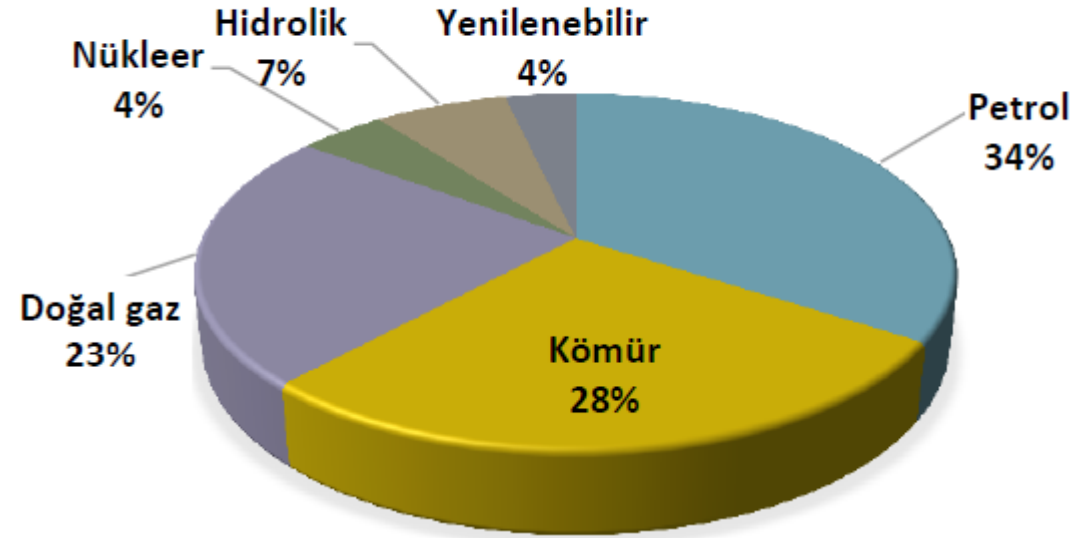
Enerjide Arama Buluşmaları Hidrojen
15 Ocak 2020, Ankara, Bakanlık
Konferans Salonu

Dünya Kömür Rezervlerinin Dağılımı, 2017



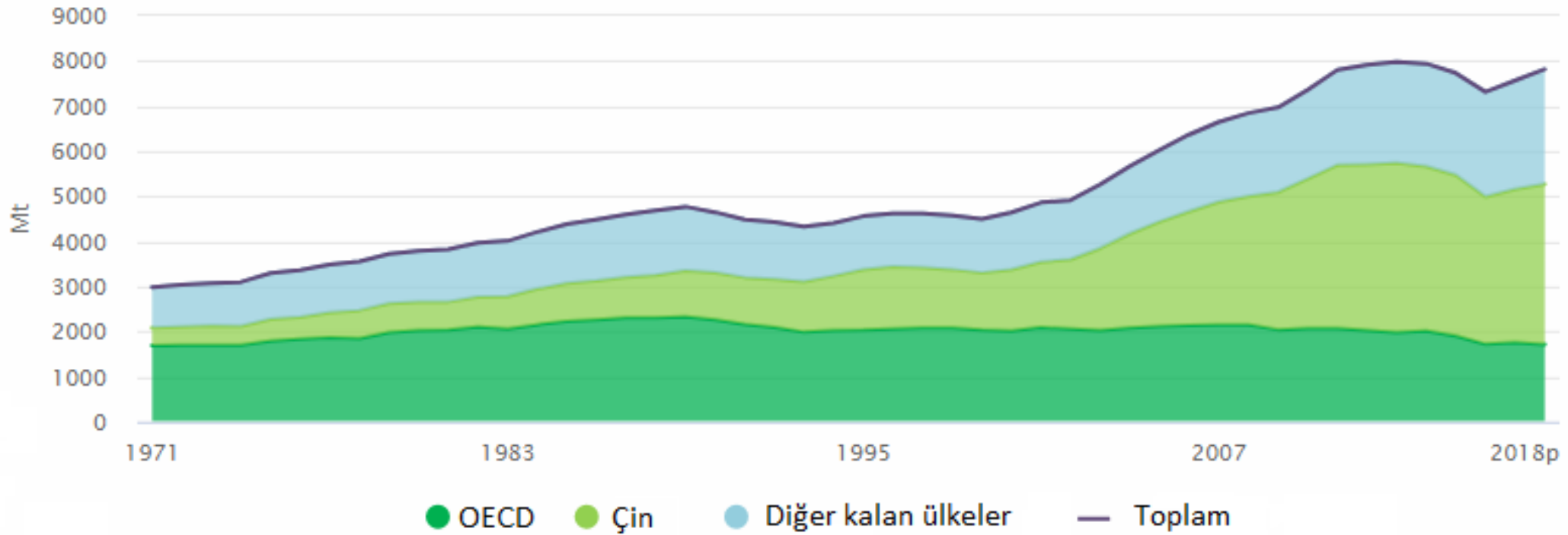
Dünya Enerji Konseyi'nin araştırmalarına göre; Dünya kanıtlanmış işletilebilir kömür rezervi toplam **892 milyar tondur**. Söz konusu rezervin; **403 milyar tonu** antrasit ve bitümlü kömür, **287 milyar tonu** alt bitümlü kömür ve **201 milyar tonu** ise linyit kategorisindedir (WEC 2013, s.1.9-1.10)

Dünya Birincil Enerji Arzı, 2017



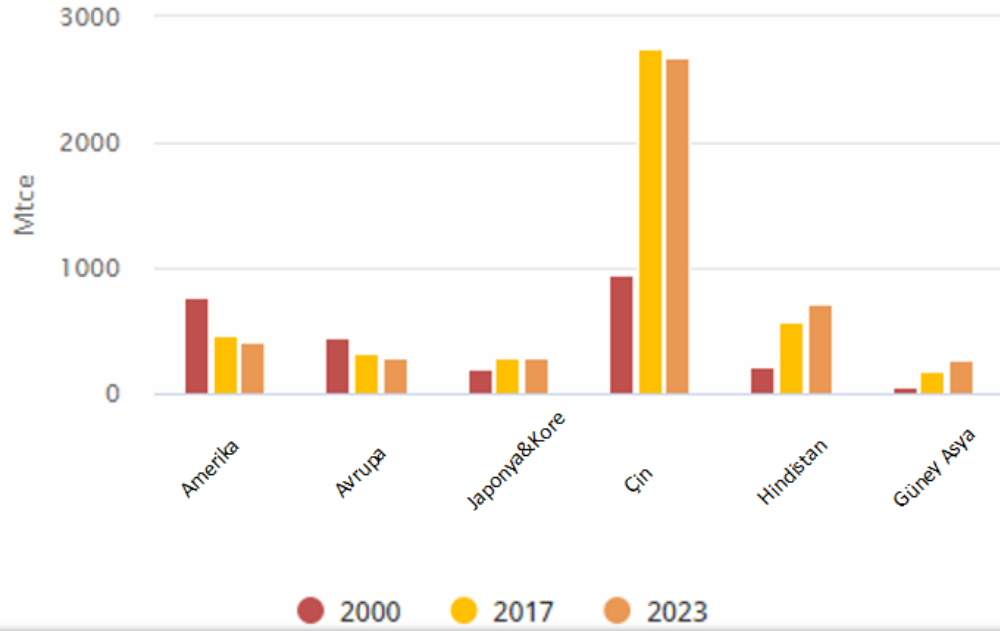
Dünya birincil enerji arzı 2017 yılı itibariyle **13.511 mtep** (milyon ton eşdeğer petrol) düzeyine ulaşmıştır. Aynı dönemde kömürün payı 3,5 puan artışla %24,5'dan %28 düzeyine ulaşmıştır. (BP, 2018)

Toplam Dünya Kömür Üretimi, 1971-2018

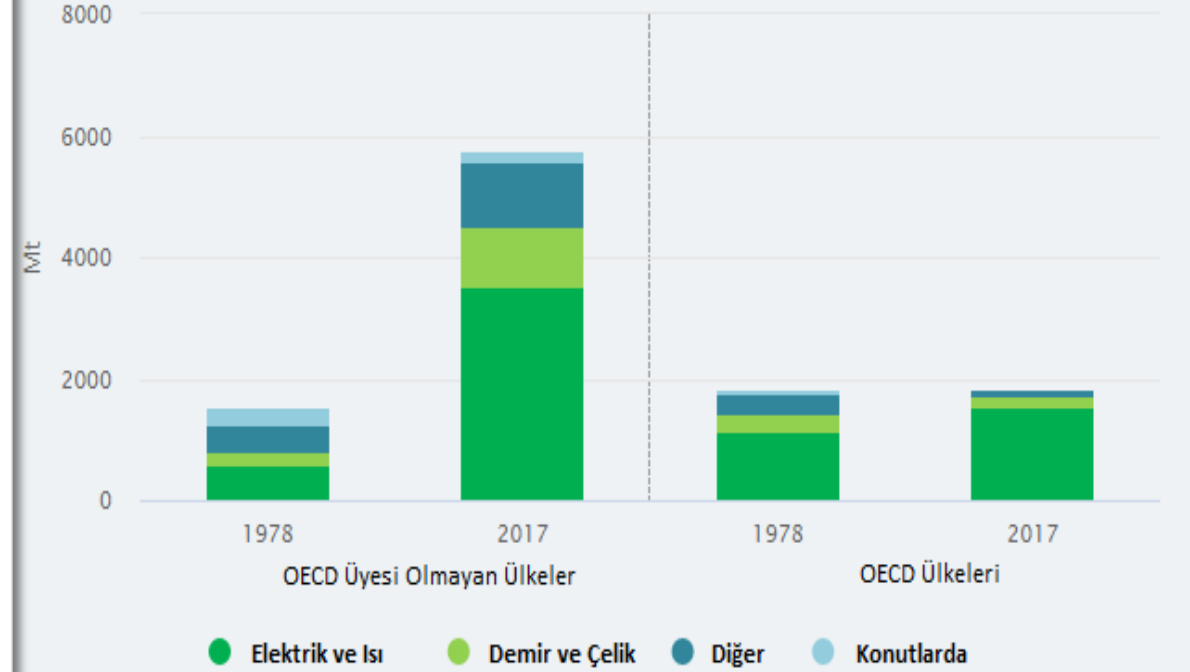


2018
OECD: 1 750
Çin: 3.550
Dünyanın geri kalanı: 2.543
Toplam:7.813

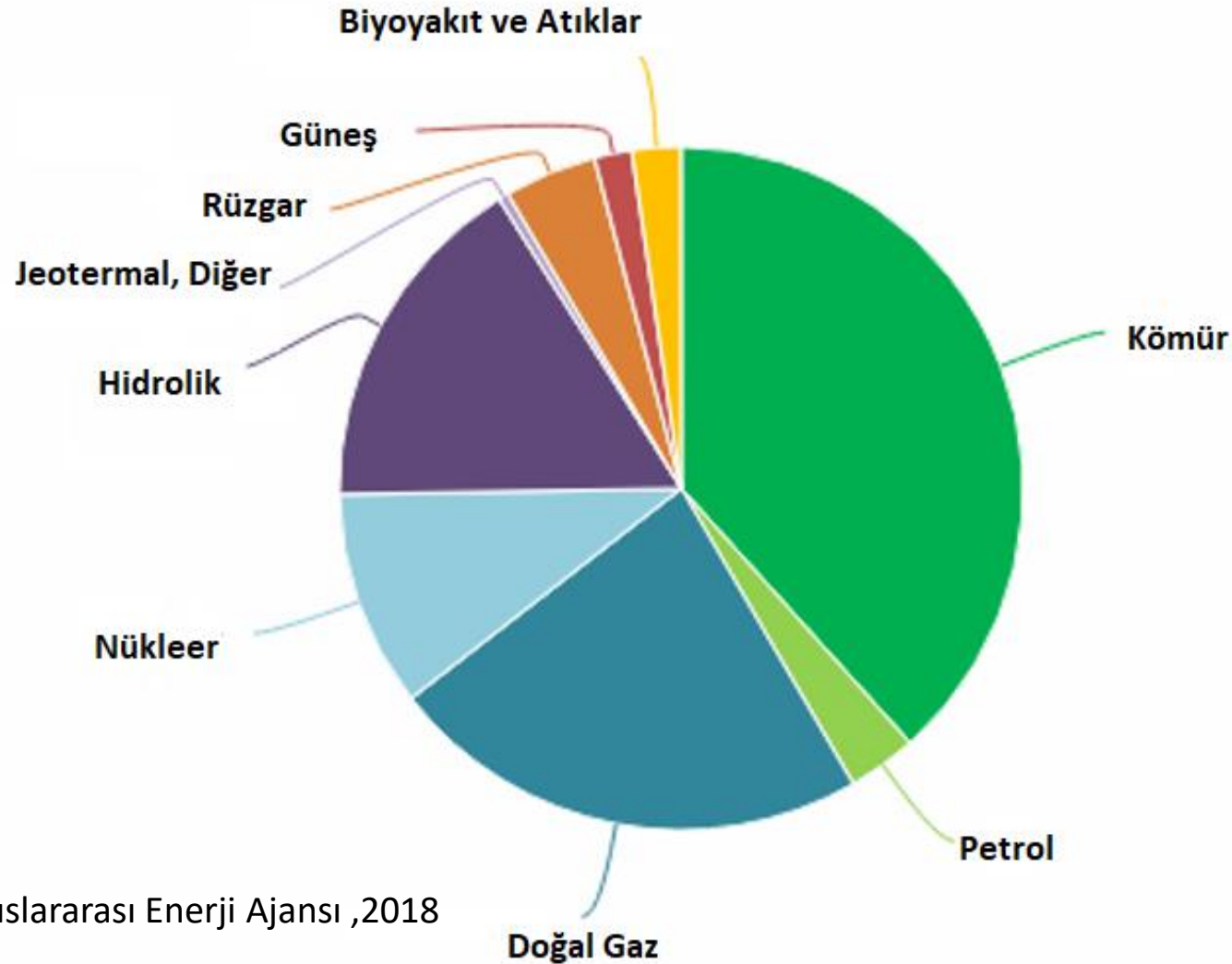
Bölgeler ve Ülkeler Bazında Kömür Talepleri



Kömür Kullanım Alanları



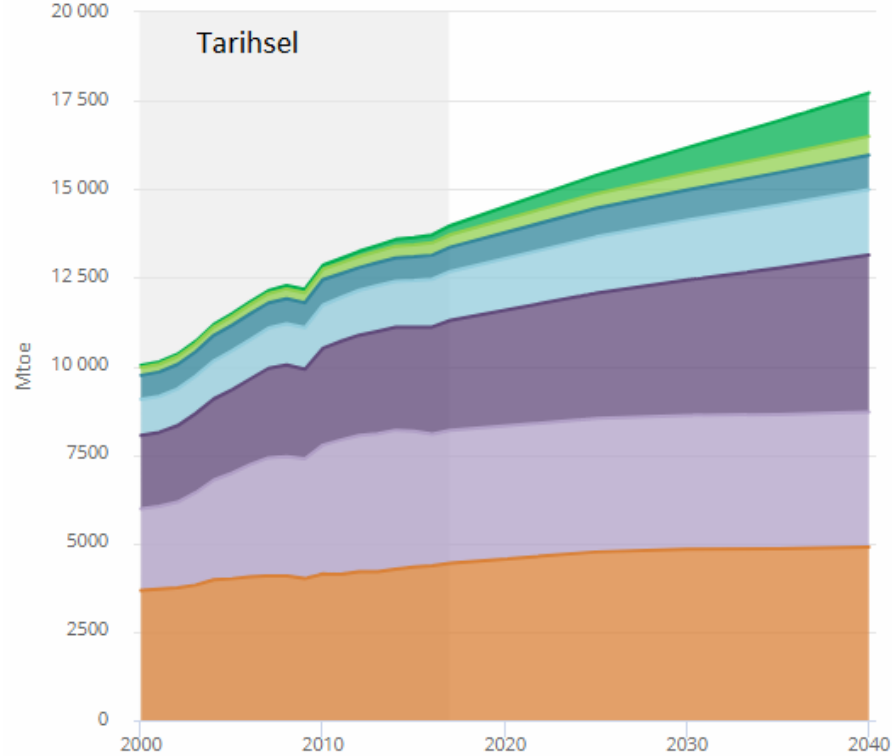
Kaynaklar Bazında Toplam Dünya Elektrik Üretimi, 2017



Kömür: %38.3
Doğalgaz: %22.9
Hidrolik: %16.3
Nükleer: %10.2
Rüzgar: %4.4
Petrol: %3.3
Biyoyakıt ve Atıklar: %2.3
Güneş: %1.8

Yeni Politikalar Senaryosu (NPS)

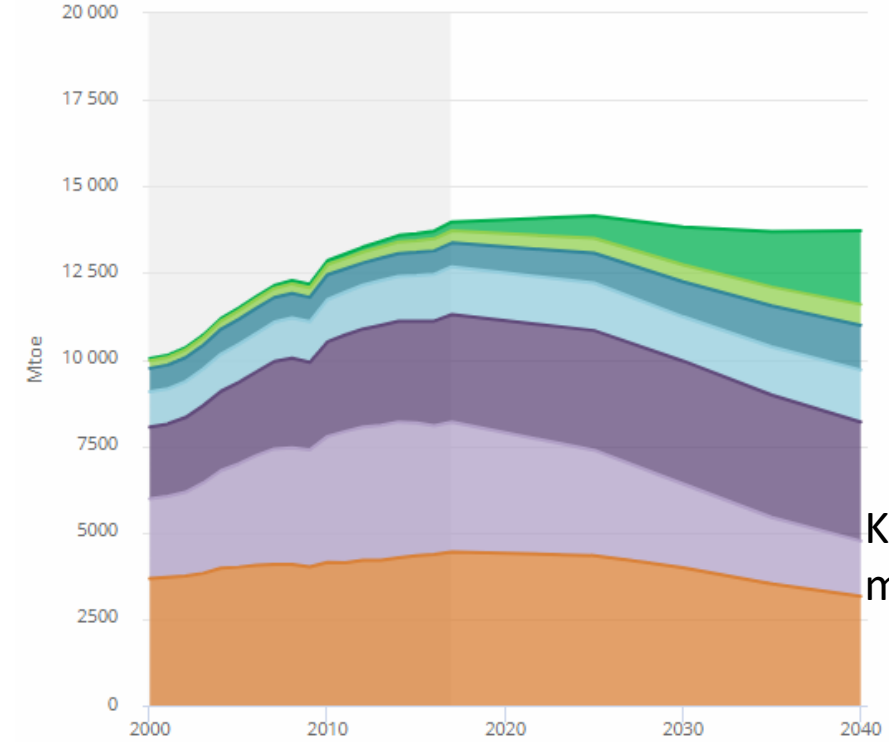
Açıklanan politika niyetlerinin uygulanmasından kaynaklanabilecek sonuçların değerlendirmesinin yanı sıra mevcut enerji politikalarını da içerir.



Kömür 3.809
mtoe

Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu (SDS)

İklim değişikliği, hava kalitesi ve modern enerjiye evrensel erişim konularında uluslararası kabul görmüş hedeflere ulaşmak için

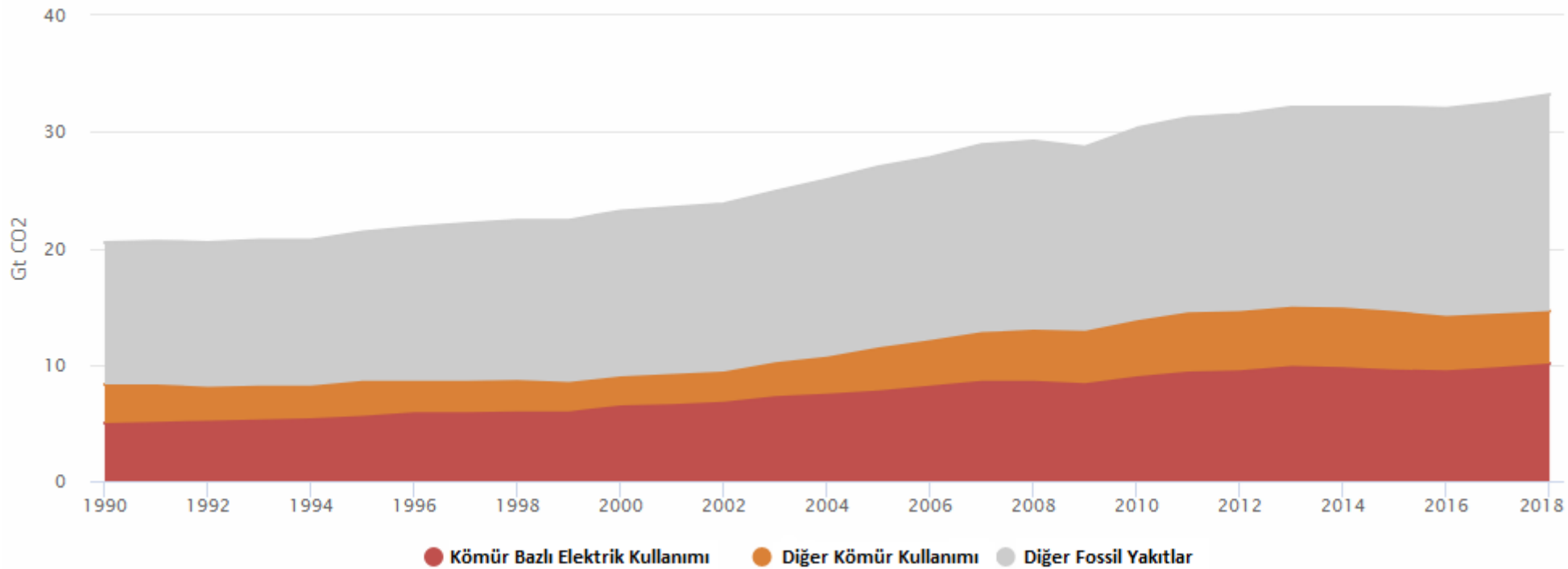


Kömür 1.597,2
mtoe

- Diğer yenilenebilir
- Hidrolik
- Nükleer
- Biyoenerji
- Doğal Gaz
- Kömür
- Petrol

UEA, Dünya Enerji Görünümü 2018

Uluslararası Enerji Ajansı'nın; yenilenebilir ya da alternatif yakıtların kullanımlarının artacağı ve enerji verimliliğine ya da karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik çabaların geliştirileceği öngörülerine dayalı olan daha iyimser "**Yeni Politikalar Senaryosu**"nda kömürün 2040 yılında küresel enerji arzı içerisindeki payı **%23,1** düzeyinde tahmin edilmektedir(IEA, 2018)



33,1 Gt CO₂

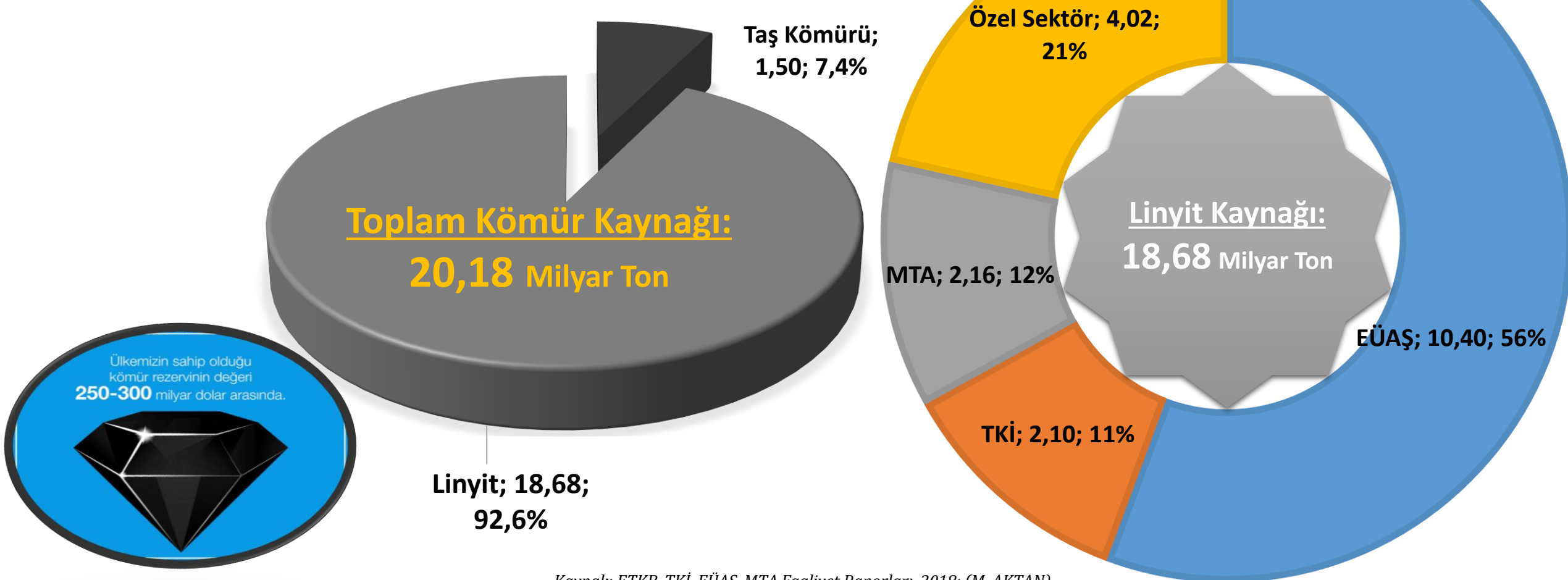
Uluslararası Enerji Ajansı, 2018

2018'de yüksek enerji talebine bağlı olarak, küresel enerji kaynaklı CO2 emisyonları% 1,7 artarak tarihi 33,1 Gt CO2 salınımı ile en yüksek değerine ulaşmıştır. Tüm fosil yakıtlardan kaynaklanan emisyonlar artarken, enerji sektörü emisyon büyümesinin yaklaşık üçte ikisini oluşturdu. Sadece elektrikte kömür kullanımı çoğunlukla Asya, Çin ve Hindistan'da olmak üzere 10 Gt CO2'yi aştı. Çin, Hindistan ve ABD, emisyonlardaki net artışın % 85'ini oluştururken, Almanya, Japonya, Meksika, Fransa ve İngiltere için emisyonlar düşmüştür.

Dünyada Kömür Kaynaklı Emisyon Değerlerinin Düşürülmesi İle ilgili Uygulanan Teknolojiler

- Yıkama yoluyla kömürün temizlenmesi,
- Elektrostatik çöktürücüler ve kumaş filtreler, baca gazlarından uçucu küllerin % 99'u tutulabilir,
- Baca gazı kükürt giderme,
- Düşük NO_x yakıcıları,
- HELE Teknolojiler (Süperkritik Santraller, Ultra süperkritik santraller-termal verimliliğin artırılmasıyla),
- Gazlaştırma Teknolojileri (Yeraltı gazlaştırma dahil)
- Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrim (IGCC) ve Basınçlı Akışkan Yataklı Yakma (PFBC) gibi gelişmiş teknolojiler,
- CO₂ Yakalama ve Depolama Teknolojileri (CCS), CO₂ Kullanma Yakalama ve Depolama(CCUS) Teknolojileri

TÜRKİYE KÖMÜR KAYNAK DURUMU

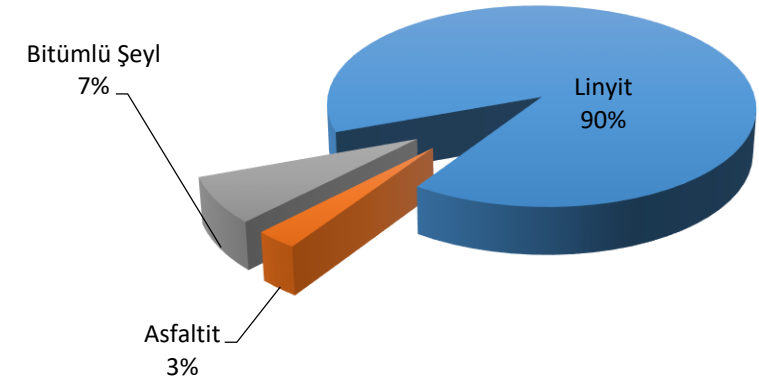


Kaynak: ETKB, TKİ, EÜAŞ, MTA Faaliyet Raporları, 2018; (M. AKTAN)

TKİ Bünyesindeki Kömür Rezervleri

Ülkemizde bulunan 17,27 milyar ton linyit kömürü kaynağının 2,13 milyar tonu (%12'si) TKİ uhdesindeki ruhsatlı sahalarda bulunmaktadır. TKİ kömür kaynağının büyük bir kısmı yapılan çalışmalarla görünür rezerv kategorisine alınmıştır.

	MÜMKÜN	MUHTEMEL	GÖRÜNÜR	HAZIR	TOPLAM
ELİ	-	-	477.536	2.981	480.517
GLİ	-	-	210.321	-	210.321
ÇLİ	-	-	65.318	1.000	66.318
KONTROL MÜDÜRLÜKLERİ	-	146.559	392.782	-	539.341
TERMİK SANTRAL İHALELİ RÖDOVANSLI SAHALAR	1.560	46.945	749.622	-	798.127
(Bin ton) DİĞER	-	11.999	26.229		38.228
TOPLAM	1.560	205.503	1.921.808	3.981	2.132.852



TKİ Ruhsatlı Sahalarının Kaynak Türüne Göre Dağılımı

Linyit ve Alt-Bitümlü Kömürlerimizin Kalorifik dağılımı:

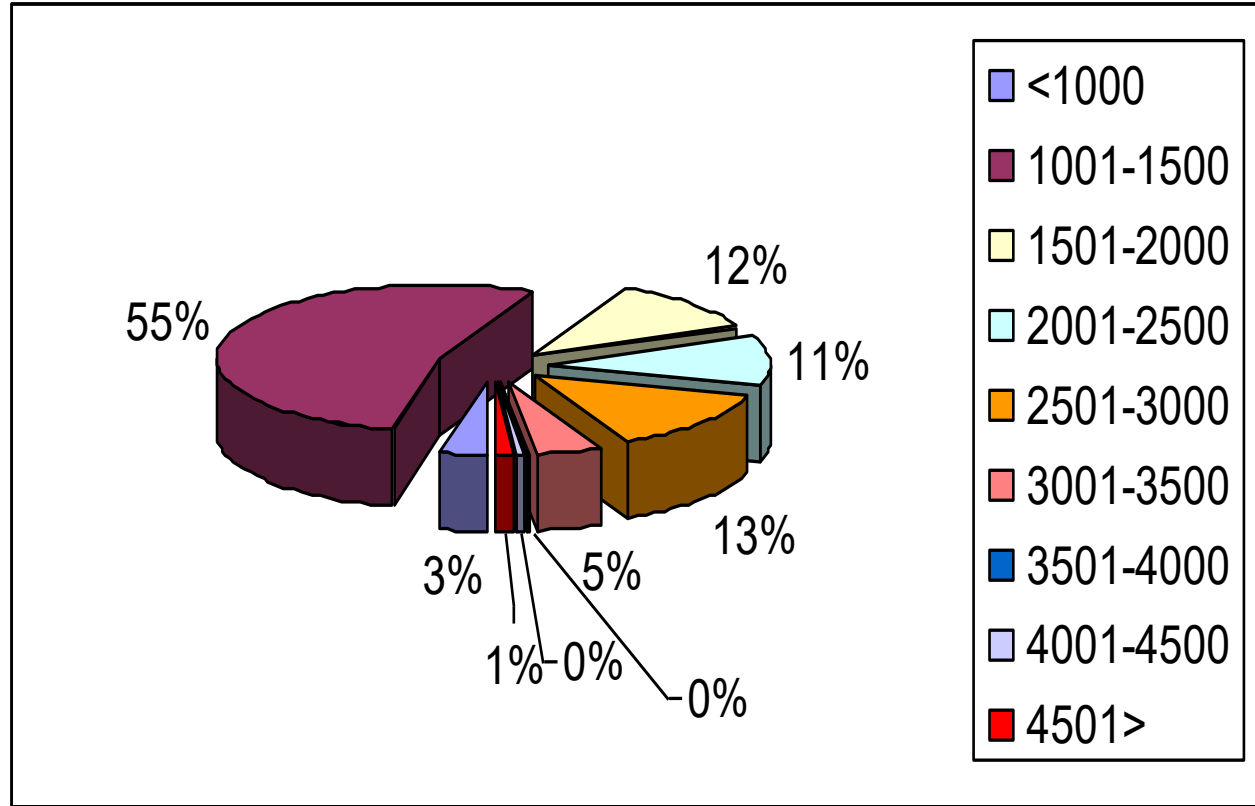
Ülkemizin linyit kaynakları rezerv açısından 18,68 milyar ton gibi oldukça yüksek miktarda ise de kalite ve özellikleri yönünden incelediğinde; Isıl değer açısından

%55'i 1000-1500 kcal/kg,

%23'ü 1500-2500 kcal/kg

%18'i 2500-3500 kcal/kg

gibi genellikle düşük kalori, yüksek kül ve nem içeriğine sahiptirler. Kükürt oranları açısından da yaklaşık olarak yarısında toplam kükürt oranı %2'nin üstündedir. Yani linyitlerimiz kalite yönünden genellikle düşük kaliteli sınıfındadır.



KÖMÜRDE AR-GE NEDEN GEREKLİ

Kömürlerimizin düşük kaliteli olması (düşük kalori değeri, yüksek kül, nem, sülfür vb.)

Kömürün ülkemizin en önemli yerli enerji kaynağı olması

Ülkemizin enerji bağımsızlığı

Kyoto Protokolü ve AB Yaptırımları
Ulusal çevre sınırlamalarının
günden güne artışı

Katma değer sağlayan ileri teknolojilerin kullanılmasıyla verimliliğin artırılması, maliyetlerin düşürülmesi

Güvenli üretim yöntemlerinin geliştirilmesi

Ulusal ve uluslararası rekabet için yerli ve yenilikçi temiz kömür teknolojilerinin geliştirilmesi

Sürdürülebilir Madencilik

TEMİZ KÖMÜR TEKNOLOJİLERİ ALANINDAKİ AR-GE PROJELERİ:

1. KÖMÜR İYİLEŞTİRME VE HAZIRLAMA

- ❖ Lavvar performanslarının arttırılması ve yoğunluk izleyiciler, kömür yıkama tesisi simülatörü lave'nin geliştirilmesi ve ince ebatlı kömürlerin değerlendirilmesi

2. KÖMÜRÜN GAZLAŞTIRILMASI VE YERLİ TEKNOLOJİLERİN GELİŞTİRİLMESİ

- ❖ Kömürden sentez gazı, sıvı yakıt, elektrik ve muhtelif kimyasalların üretiminin sağlanmasına yönelik yerli teknolojilerin geliştirilmesi,
- ❖ Yerli linyitlerimiz için yeraltı kömür gazlaştırma imkanlarının araştırılması,

3. MADENCİLİK ve ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

- ❖ Kendiliğinden yanma,

4. ÇEVRESEL UYGULAMALAR

- ❖ Üretimi tamamlanmış sahaların rehabilitasyonu, ağaçlandırma çalışmaları ve ilgili çevre mevzuatları doğrultusundaki projeler (yeraltı ve kuyu suları, şlam malzemeleri, ÖTL, ambalaj ve yağ atıkları vb)

5. KÖMÜRDEN TÜRETİLMİŞ ÜRÜNLER (HÜMİK ASİT V.B)

- ❖ Kömür sahalarımızda mevcut bulunan leonarditlerin değerlendirilerek tarımda hümik ve fülvik asit ürünleri, kozmetik ve muhtelif sanayiide (çimento,seramik vb) katkı maddesi olarak kullanılması,

1- Biyokütle ve Kömür Karışımlarından Sıvı Yakıt Üretimi (TRİJEN)- SOMA



1-) TÜBİTAK KAMAG destekli olarak TÜBİTAK MAM-TKİ işbirliği ile ELİ Soma'da 2016 yılında kurulmuştur.

2-) Tesisin kurulum kapasitesi **250 Kg kömür** ve **termal gücü 1,1 MW_{th}**'dir. Dolaşımli Akışkan yataklıdır.

3-) Tesise **130 kg kömür** beslenerek, **günde 2-3 varil** ham dizel ve **160 kg parafin** üretilmiştir.

4-) Yürütülen Ar-Ge ve test faaliyetleri sırasında **860-915** OC sıcaklık, **4800 kcal/kg** ısı değeri, **0,5-1,5 mm** boyutlu kömür kullanılmıştır.

5-)Gazlaştırma ajanı olarak **hava, oksijen+su buharı** karışımı kullanılmıştır.

6-)Çıkışta **sentez gazı** ; CO %17.8-20.6, H₂ %11.4-42.9, CH₄ %1.79-4.9, CO₂ %10.2-32.1, N₂ %1.7-56.1 aralıklarında olmuştur.

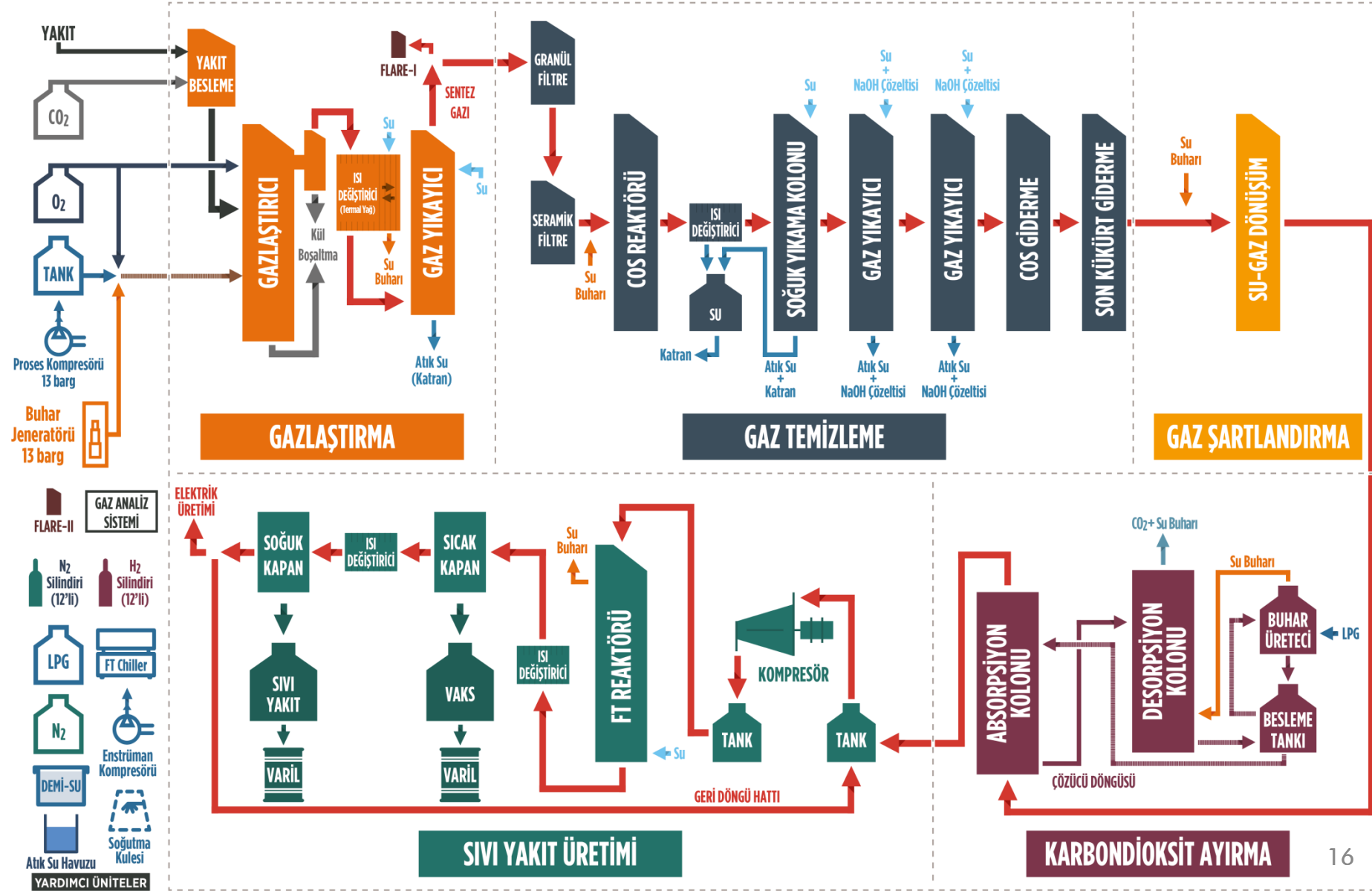
7-) 4.24-9.39 MJ/Nm³ ısı değeri, %67.9-74.4 **soğuk gaz verimi** şeklinde ürün elde edilmiştir. Bu sonuçların dünyadaki diğer benzer çalışmalarla benzer olduğu görülmüştür.

2- TKİ Tunçbilek Kömür Gazlaştırma Tesisi, Metanol ve/veya Elektrik Üretimi



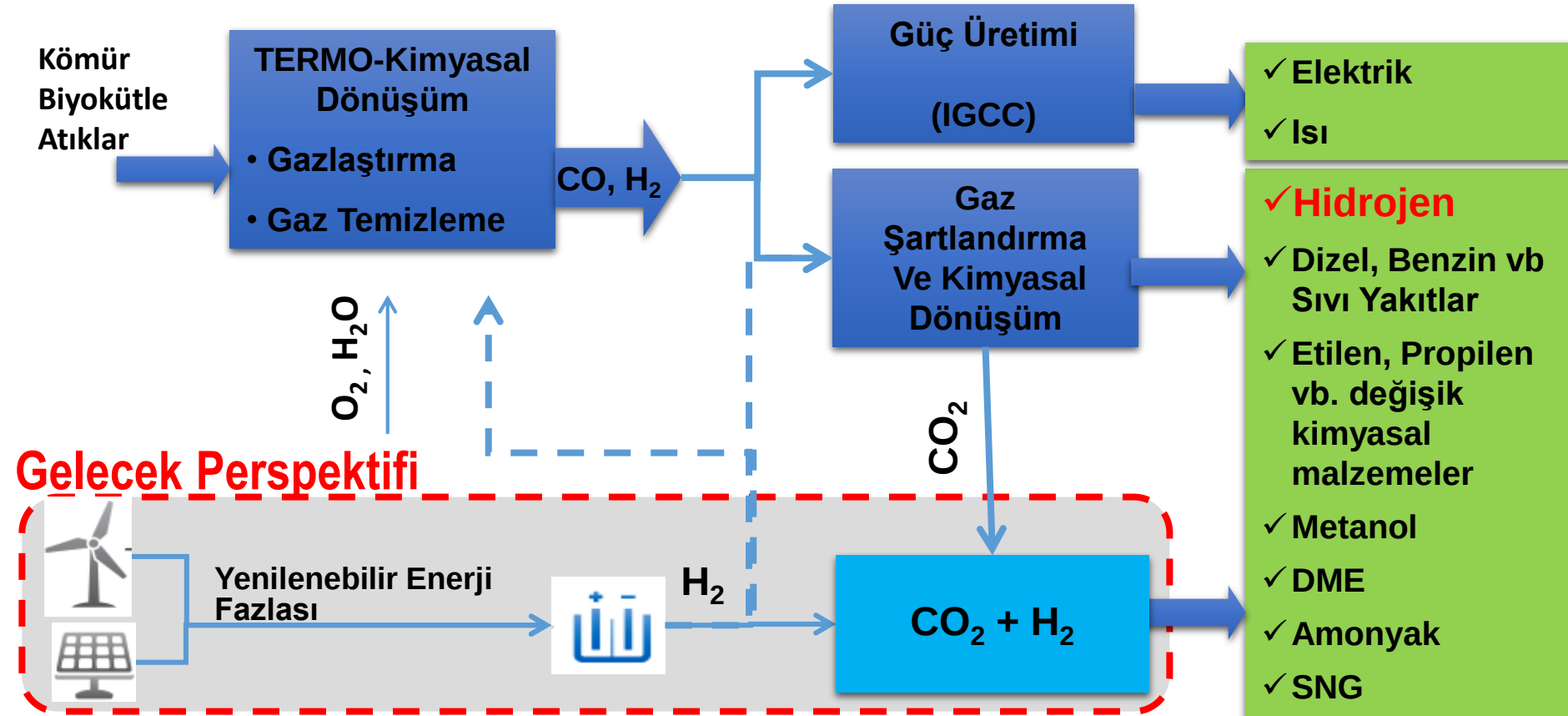
- Pilot sistemler için 2009 yılında çalışmalar başlatılmış ve 2012 yılında GLİ Tunçbilekte işletmeye alınmıştır. Küçük ölçekli 20 kg/saat kapasiteli ve akışkan yataklıdır. Büyük ölçekli tesis 250 kg/saat kömür besleme kapasitelidir ve sürüklemeli tipindedir. Sistemin termal gücü $1,1 \text{ MW}_{\text{th}}$ 'dır.
- Tesiste kömürden sentez gazının üretilmesi ve gaz temizleme üniteleri tamamlanmıştır.
- Metanol üretimi için ürün miktarına bağlı olarak 30-40 milyon TL harcanması gerekmektedir. Bu nedenle alternatif olarak gaz motoru ile elektrik ve ısı (kojenerasyon) üretimi için yaklaşık olarak 100-110 bin TL harcama ile tesisin çalıştırılması ve metanol için beklenilmesi kararı verilmiştir.

TRİJEN Proses Akım Şeması

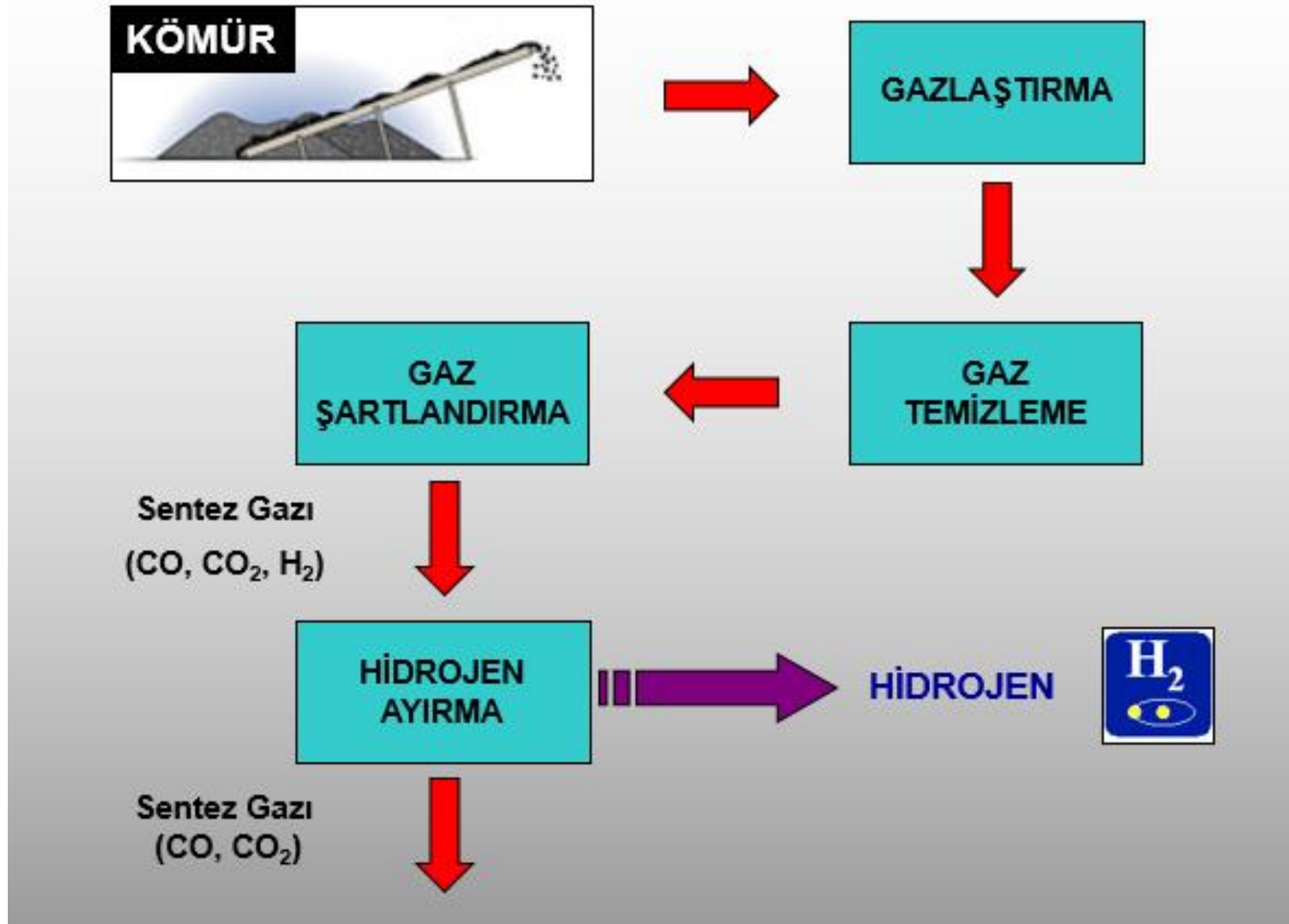


Gazlaştırma Teknolojisi ile Çoklu Üretim İmkânı (Polygeneration)

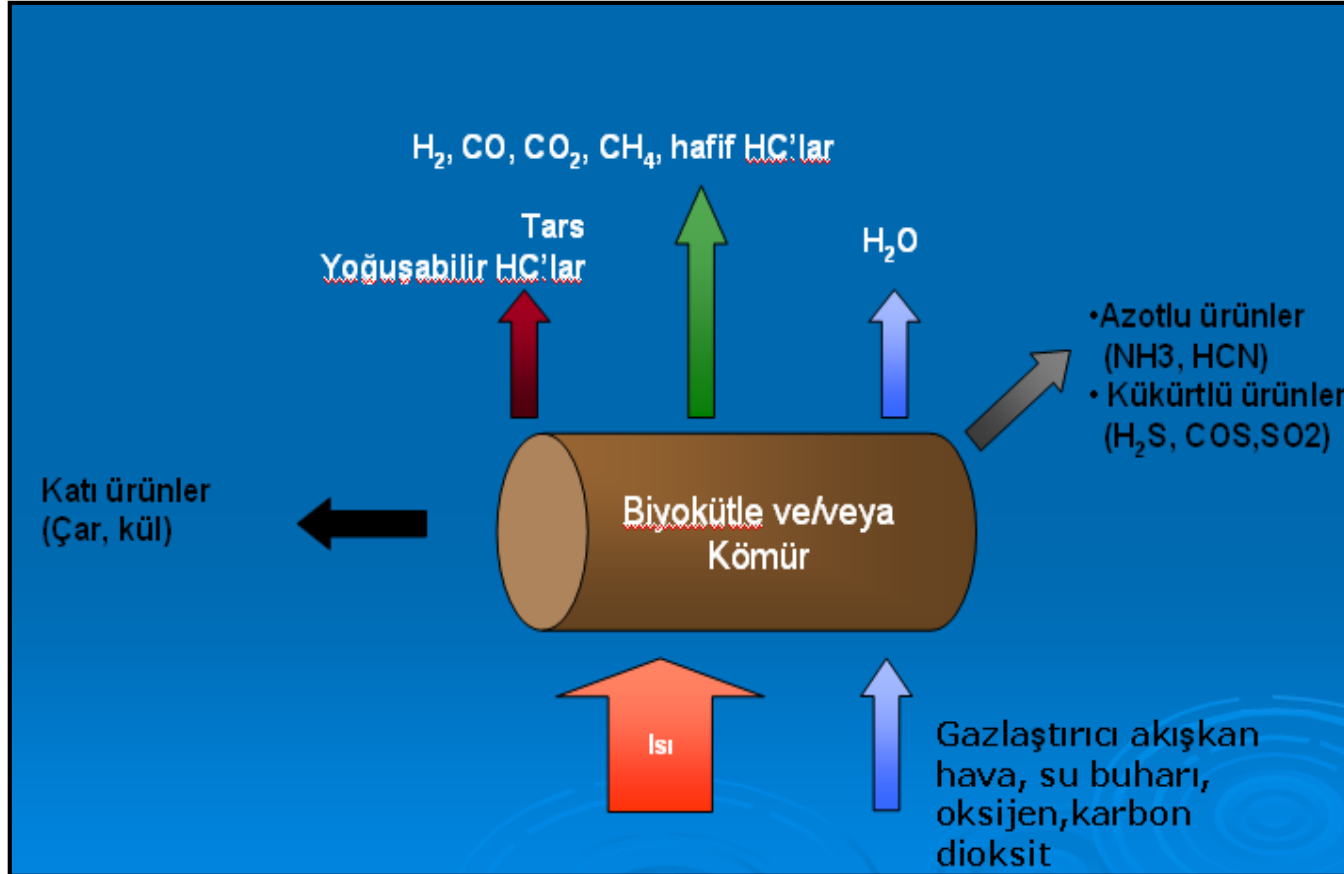
Bu teknolojiler doğrudan sıvı yakıt üretiminde kullanıldığı gibi, IGCC uygulamaları, SNG, muhtelif kimyasallar ve diğer sıvı yakıt üretimi alanlarında da kullanılmaktadır.



Kömürden Hidrojen Üretimi



Gazlaştırma Prosesi



Gazlaştırma, karbon içerikli maddelere sınırlı miktarda oksijen, hava, hava-su buharı karışımı veya zenginleştirilmiş oksijen içerikli hava verilerek yanabilen gaz bileşenlerin (**CO**, **H₂**, CH₄ v.b.) oluşumunu sağlayan kimyasal bir prosestir.

Gazlaştırmada Sınıflandırma

Basınca Göre

- ❖ Atmosferik Basıncılı Sistem
- ❖ Vakumlu Sistem
- ❖ Basıncılı Sistem

Gazlaştırma Ajanına Göre

- ❖ Hava ile Gazlaştırma
- ❖ Oksijenle Gazlaştırma
- ❖ Su Buharı ile Gazlaştırma

Gazlaştırıcı Tipine Göre

- ❖ Sabit Yataklı Gazlaştırıcı
- ❖ Akışkan Yatak Gazlaştırıcı
- ❖ Sürüklemeli Yataklı Gazlaştırıcı

Gazlaştırıcı Reaktör Tipleri

Sürüklemeli Akış

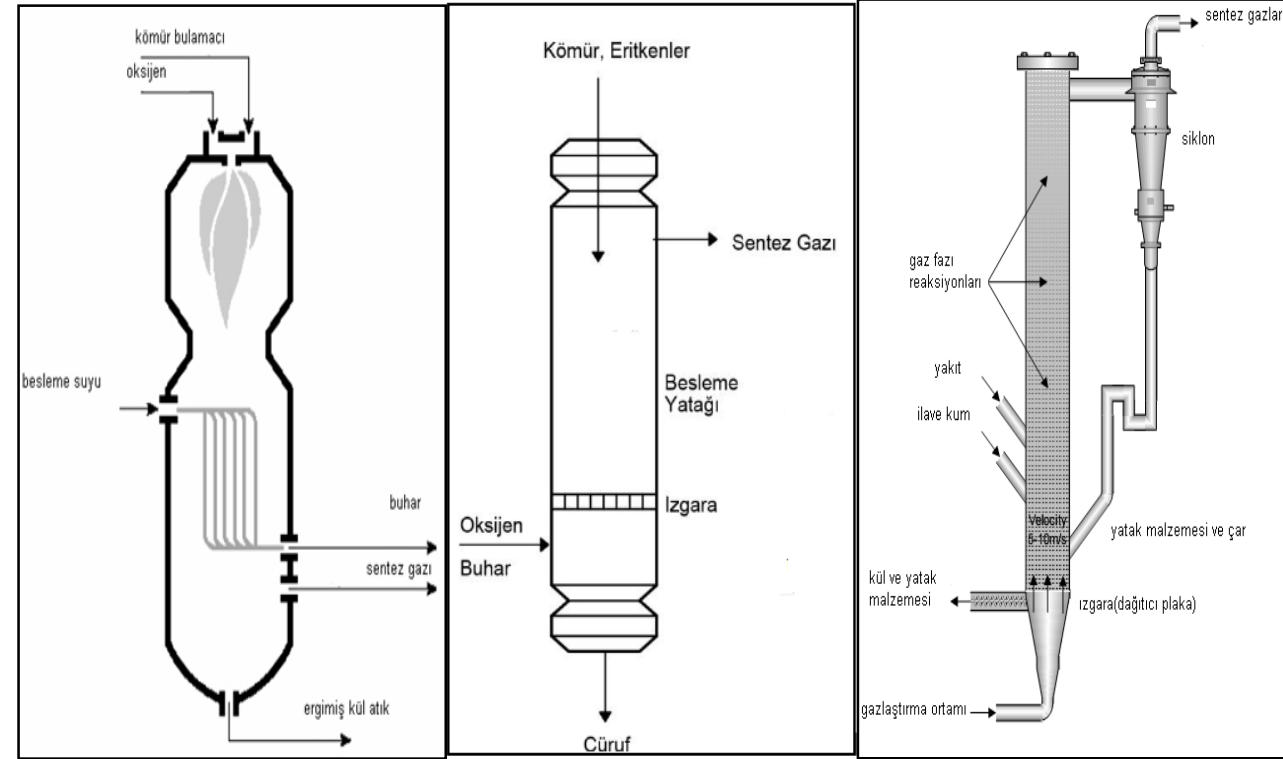
- Yüksek sıcaklık, reaktivitesi düşük yakıtlar için ideal
- Tar oluşumu az veya yok,
- Yüksek sıcaklık ısı geri kazanımı gerekli

Akışkan Yatak (Sirkülasyonlu, transport, kabarcıklı):

- Yüksek kül ve kükürt içeren yakıtlar için daha uygun
- Aglomerasyon riski nedeniyle yatak sıcaklığı $< 950\text{ C}$
- Linyit gibi reaktivitesi yüksek yakıtlar için uygun
- Dönüşüm için daha karmaşık bir tasarım

Sabit yatak (Updraft, Downdraft and Crossdraft gaz çıkışı):

- Çıkış gazı yüksek oranda tar, fenol and metan içerir
- Kurutma ihtiyacı daha düşük,
- Küçük kapasiteler için kullanım.



Sürüklemeli yatak

Sabit yatak (Lurgi)

Akışkan Yatak

Gazlaştırma Reaksiyonları

- **Piroliz**

- Kömür $\rightarrow$ çar + uçucu maddeler (endotermik)

- **Katı Faz Yanma Reaksiyonları**

- $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$ -111 MJ/kmol
 - $CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$ - 283 MJ/kmol
 - $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ - 242 MJ/kmol

- **Gaz Faz Yanma Reaksiyonları**

- Uçucular + $O_2 \rightarrow CO + H_2O$

- **Katı Faz İndirgeme Reaksiyonları**

- $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$ +172 MJ/kmol (Boudouard)
 - $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ +131 MJ/kmol (Su-Gaz)
 - $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$ - 75 MJ/kmol (Hydrogenation)

- **Shift and Reforming Reaksiyonları**

- $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ - 41 MJ/kmol (water-gas shift, CO shift)
 - $CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$ - 206 MJ/kmol (methanasyon)

Gaz Temizleme

Üretilen sentez gazı içindeki kirleticilerin giderildiği bölümdür.

- Granüler Filtre
- Seramik Filtre
- COS Reaktörü
- Katran Giderme Bölümü
- H₂S Yıkama Kolonları
- Son Kükürt Giderme (ZnO)
- SGS (Su-Gaz Dönüşüm) Reaktörü

SGS reaktörü



Hidrojen Ayırma Teknolojileri

Absorpsiyon ile ayırma

Fiziksel

Kimyasal

Kriyojenik ayırma

Adsorpsiyon ile ayırma

Basınç salınımlı adsorpsiyon, PSA

Sıcaklık salınımlı adsorpsiyon, TSA

Membran ile ayırma

Polimerik membran

Metalik membran

Sentez Gazından H₂ Ayırma Teknolojileri

1. Membran Teknolojisi (Henüz Ar-Ge Aşamasındadır...)

- Polimerik Membranlar
- Mikrogözenekli Membranlar
- Yoğun Metal Membranlar

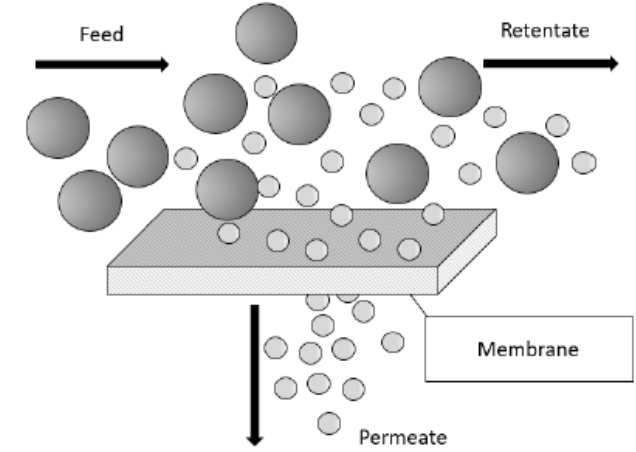
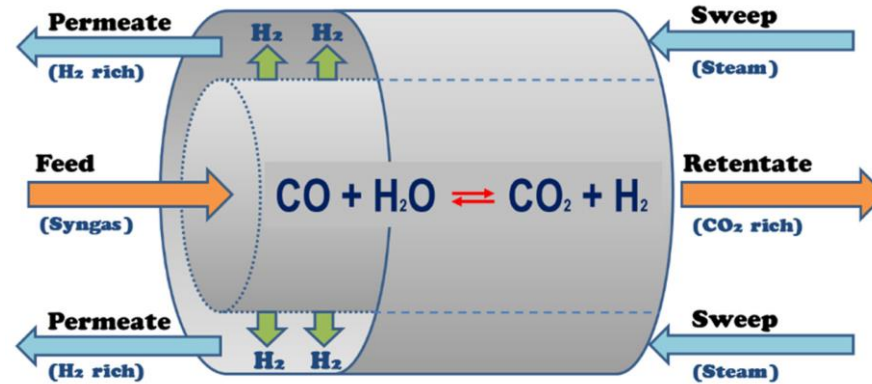
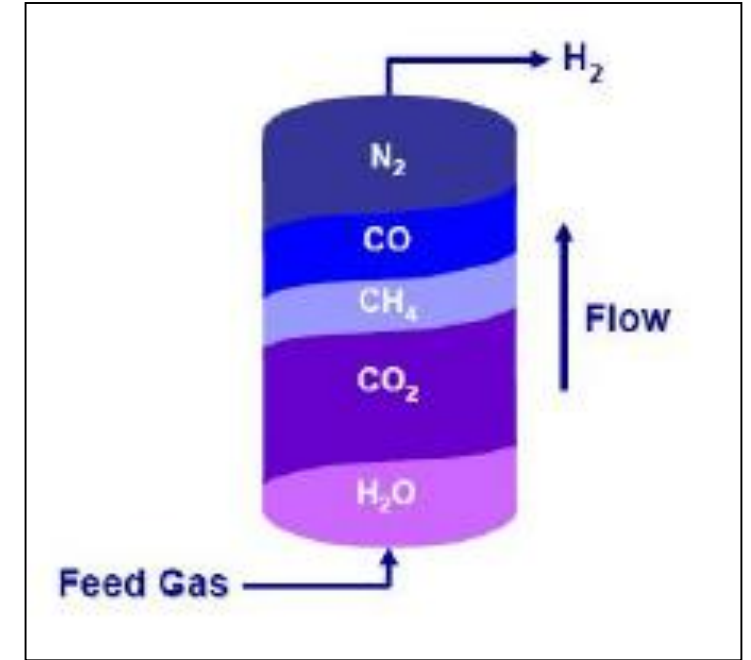


Figure 2. Schematic of membrane separation.

1. Basınç Salınımlı Adsorpsiyon Prosesi (PSA)

- PSA, Hidrojen saflaştırma için yaygın olarak kullanılan bir prosestir.
- Hem yanma gazında hem de gazlaştırma sonucunda elde edilen sentez gazında su-gaz dönüşüm reaksiyonundan geçirilen gazdan H_2 ayrılmasında, bir başka deyişle CO_2 uzaklaştırılmasında kullanılır...
 $\checkmark CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ (Su-Gaz Dönüşüm Reaksiyonu)
- İçinde adsorbent malzeme bulunan birbirine bağlı bir seri kolondan oluşur
- Hidrojen saflaştırma için genellikle Zeolit çeşitleri kullanılır
- Adsorbent yataklar basınç altındayken istenmeyen gazları adsorplar (tutar), basınç düşüşü ile ise bu gazları tekrar serbest bırakır
- Hidrojen (H_2), Helyum (He), Oksijen (O_2), Azot (N_2) ve Argon (Ar) gibi gazlar ya hiç adsorplanmazlar yada çok az adsorplanırlar
- CO , CO_2 and CH_4 orta düzeyde, su buharı (H_2O) ise yüksek miktarda adsorplanır
- PSA kolonları çıkışında **Hidrojen saflığının %99,999'a ulaşması** mümkün olabilmektedir.



Relative Strength of Adsorption of Typical Impurities

Non-Adsorbed	Light	Intermediate	Heavy
H_2	O_2	CO	C_3H_6
He	N_2	CH_4	C_4H_{10}
	Ar	C_2H_6	C_5+
		CO_2	H_2S
		C_3H_8	NH_3
		C_2H_4	BTX
			H_2O

HİDROJEN ENERJİSİ SİSTEMİ

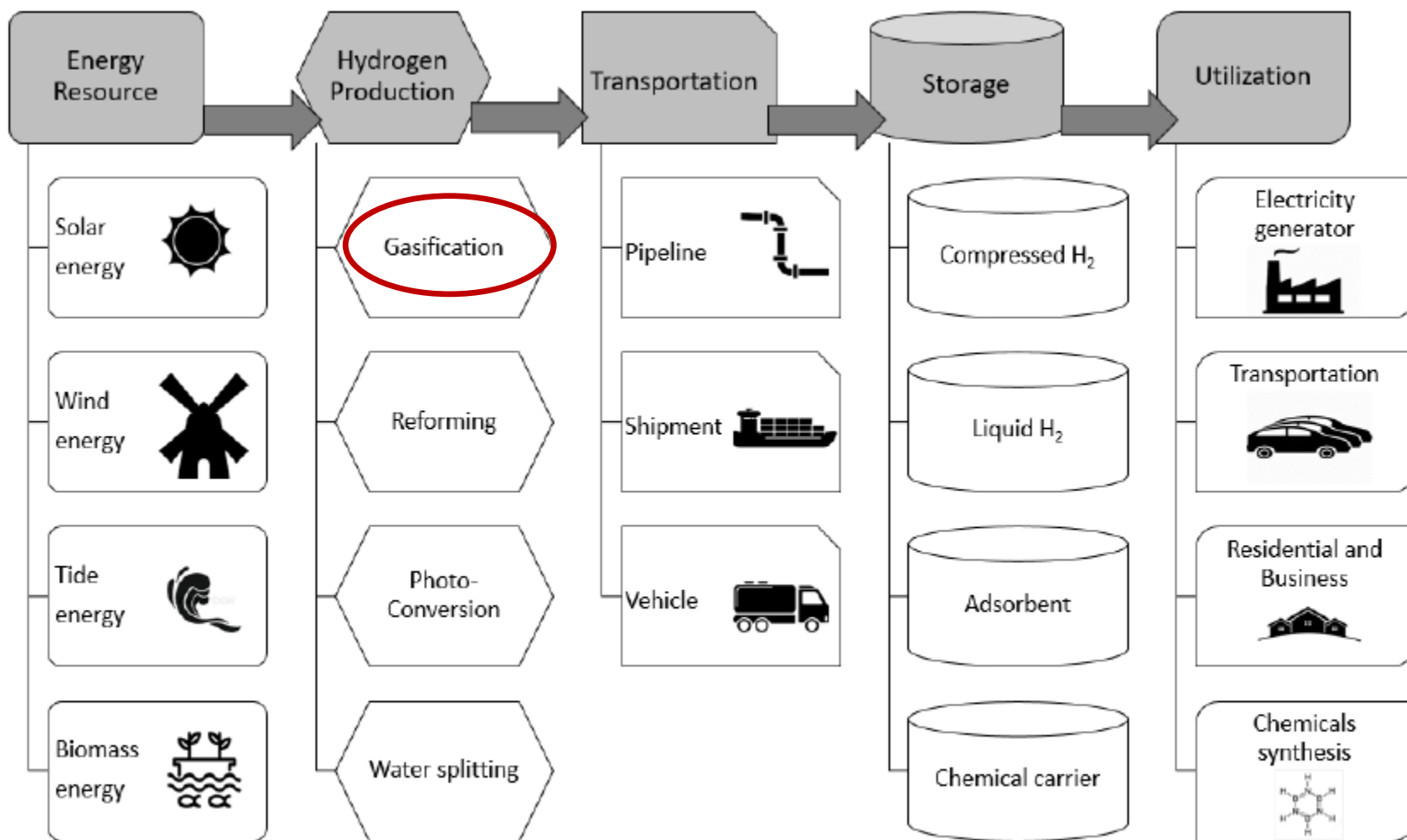
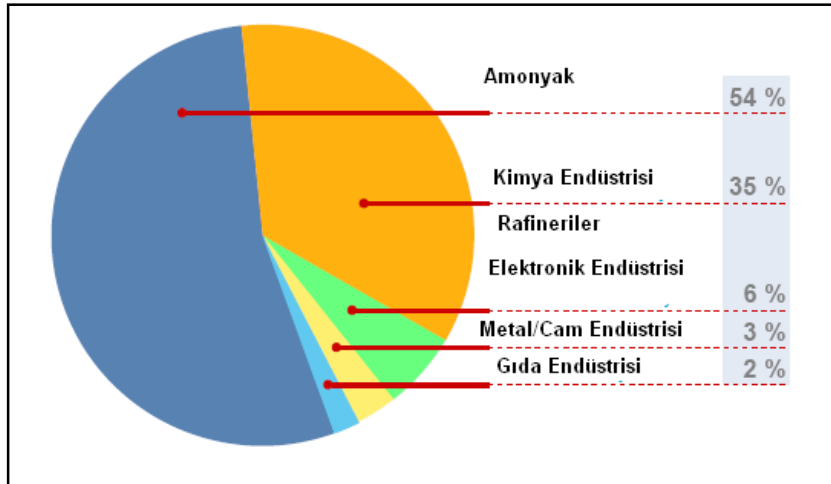


Figure 1. Hydrogen energy system.

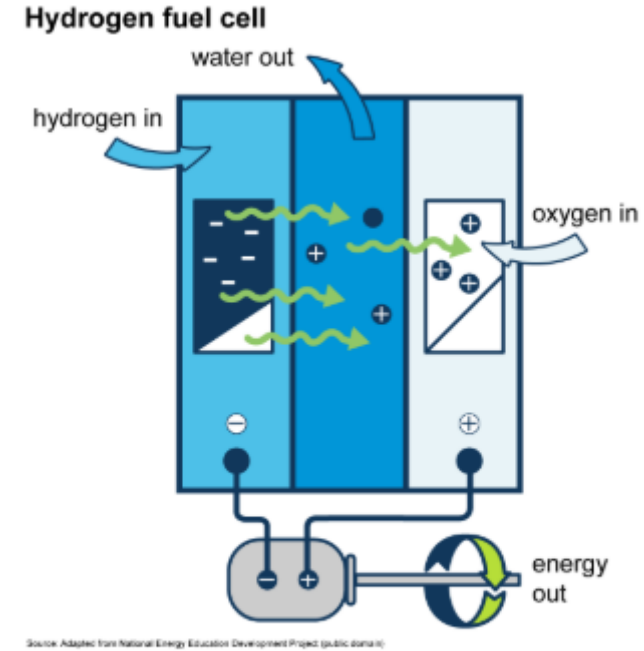
HİDROJEN KULLANIM ALANLARI

Hidrojen yakıtının en önemli kullanım alanı

- ✓ Ulaşım sektörü (otomobil, otobüs, uçak, tren ve diğer taşıtlar)
- ✓ Yakıt olarak uzay mekiği ve roketlerde
- ✓ Mobil uygulamalar (cep telefonu, bilgisayar, vs)
- ✓ Yerleşik uygulamalar (yedek güç üniteleri, uzak mekanlarda güç gereksinimi, vs) dır.
- ✓ Kimyasal sentez



K. Wawrzinek / HDV / Nov. 21, 2007 / Industrial H2 Production & Technology.ppt



Source: Adapted from the National Energy Education Project (public domain)



A NASA space rocket
Source: (NASA) (public domain)

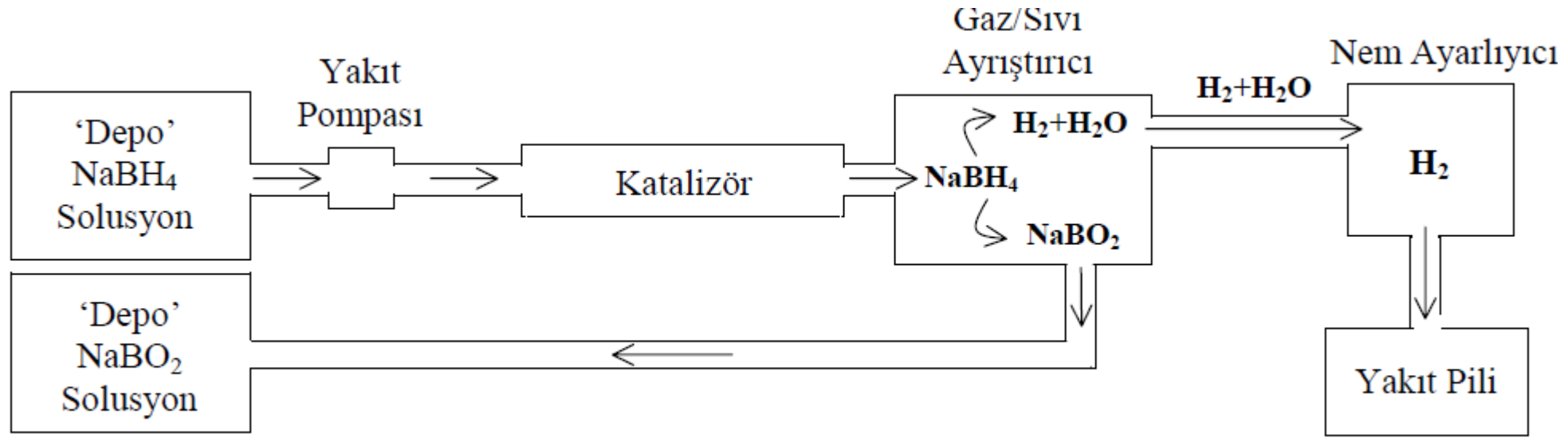


Hydrogen fuel cell hybrid vehicle

Source: Wikimedia Commons

- ✓ Kömür, doğalgaz, benzin gibi fosil yakıtlardan termokimyasal yöntemlerle hidrojen elde edilmesi.
- ✓ Suyun elektrolizi ile hidrojen elde edilmesi.
- ✓ Fotoelektrokimyasal yöntemle güneş enerjisinden hidrojen elde etme.
- ✓ Çeşitli hidrit bileşiklerinden kimyasal yöntemlerle hidrojen elde etme. Bunların en önemlisi sodyum borohidrit'tir.

Hidrojen halen en ucuz olarak fosil yakıtlardan buharla reaksiyon yöntemi ile elde edilmektedir. Diğer en çok kullanılan yöntem elektolizle suyun ayrıştırılmasıdır. Elektroliz yönteminin ve diğer yöntemlerin verimlerinin artırılması ve üretim maliyetlerinin azaltılması için yoğun araştırmalar yapılmaktadır.



Otomotiv ve Benzer Uygulamalar İçin Sıvı Esaslı Sodyum Bor Hidrür Sisteminde Akış Diyagramı (Amendola, Sharp-Goldman, Janjua, Kelly, Petillo, Binder 2000).

Hidrojen; **gaz halinde, sıvı halinde veya bir kimyasal bileşik içinde** depolanabilir.

Katı şekilde hidrojen depolaması için metal hidritler kullanılmaktadır.

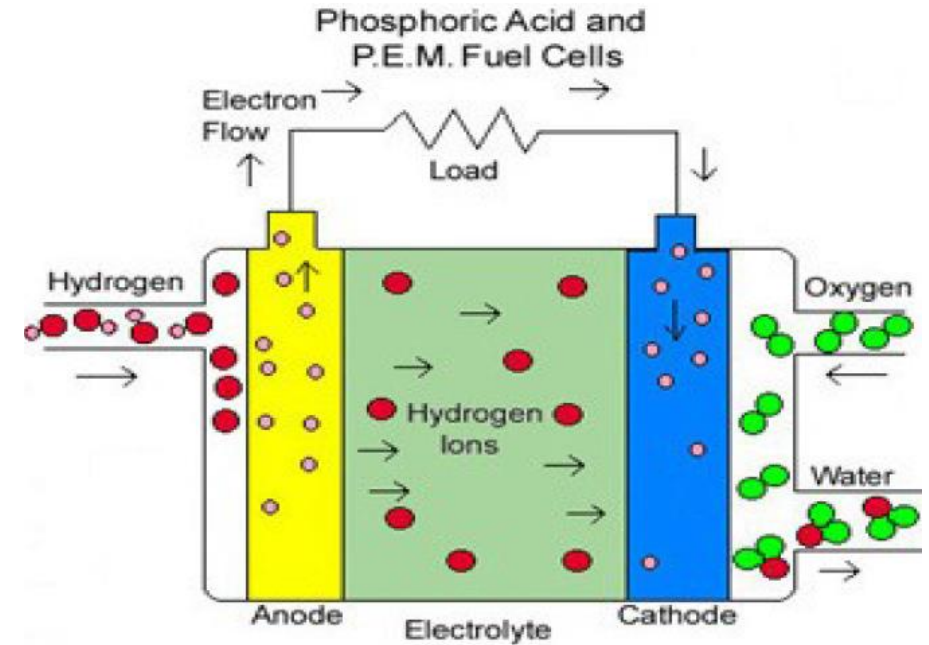
Tanklarda, Nanotüplerde, metalhidrürlerde, alanatlarda, bor esaslı depolama

Hidrojenden Enerji Elde Edilmesi:

Hidrojenden şu yöntemlerle enerji elde edilir:

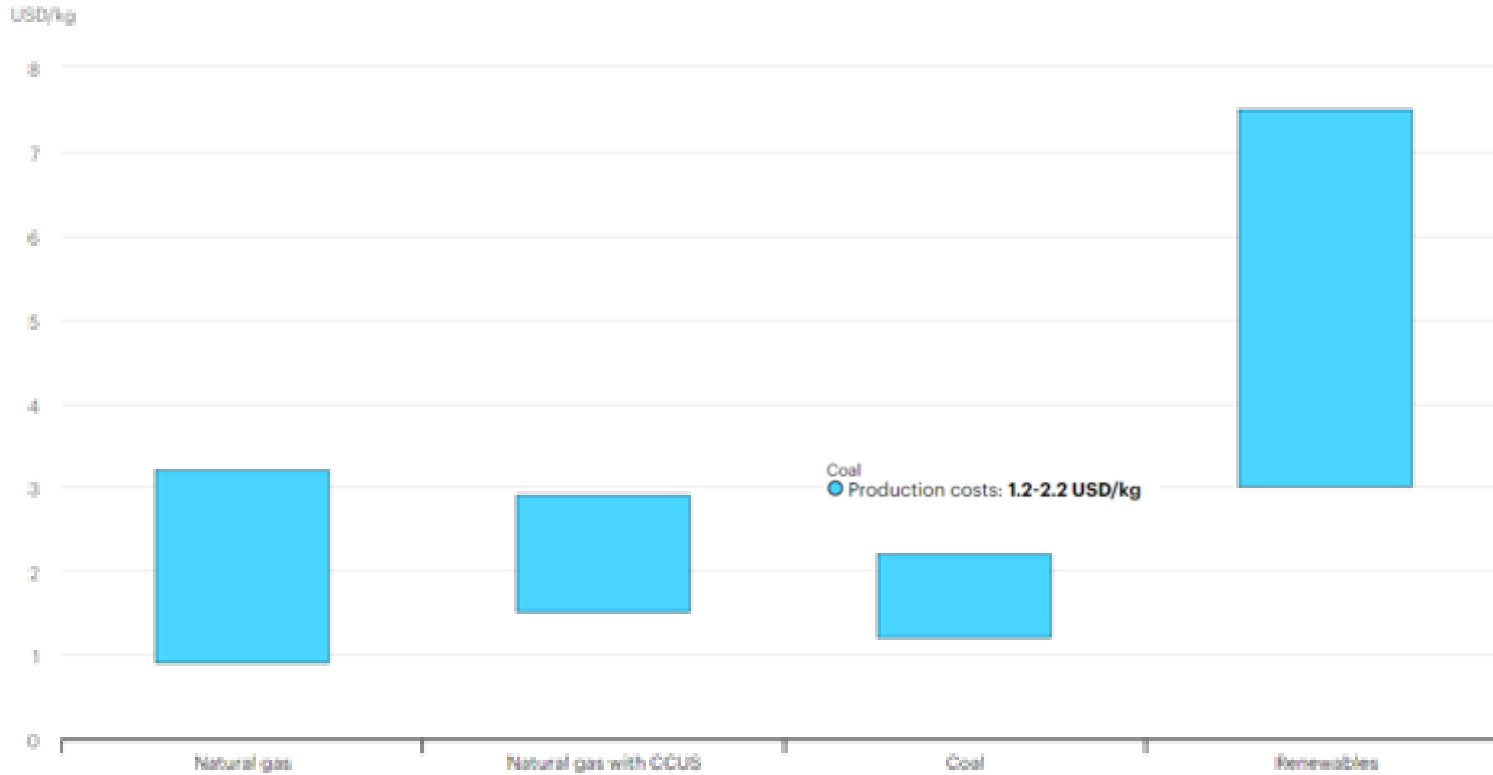
- **Yakma:**
- **Yakıt pili:** En çok kullanılan tip olan PEM (Proton exchange membrane) yakıt pilidir.

Hidrojen enerji sisteminin hem ulaşım hem de diğer uygulama alanlarında genel kabul görmesi için hidrojen üretim maliyeti ile yakıt pili maliyetinin daha da azalması, zaman içinde bir hidrojen iletim altyapısının gelişmesi gerekmektedir.



YAKIT PİLİNİN YAPISI

Hydrogen production costs by production source, 2018



Dünyada 70 milyon ton hidrojen üretilmektedir. Bunun ¼'ü doğalgazdan, ikinci sırada kömür bulunmaktadır. .

SONUÇ VE ÖNERİLER

- Ülkenin sürdürülebilir kalkınması ve enerji güvenliği için; ulusal kaynaklara dayalı, ekonomik, verimli, temiz, kaynak çeşitliliği sağlayacak teknolojilerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.
- Hidrojen ve yakıt hücrelerinin, çevresel açıdan, ülkemizin enerji güvenliği ve sera gazı emisyonlarının azaltılması, petrol tüketiminin azaltılması, yenilenebilir enerjinin genişletilmiş kullanımı (enerji depolama ve şanzıman), yüksek verimli enerji dönüşümü, yakıt esnekliği (temiz ve yenilenebilir yakıtlar dahil olmak üzere çeşitli yerli yakıtların kullanımı) ve son derece güvenilir şebeke desteği gibi avantajları bulunmaktadır.
- Hidrojen yakıt pillerinin sessiz çalışma, düşük bakım ihtiyaçları ve yüksek güvenilirlik gibi son kullanıcılar için çekici olmalarını sağlayan birçok avantajı vardır.
- Kömürden hidrojen üretimi, kömür gazlaştırma, enerji üretimi ve karbon yakalama, kullanma ve depolamada ileri teknolojilerle entegre edildiğinde çevresel faydalar da sunmaktadır. Bu teknolojilerin entegrasyonu, kükürt oksitler, azot oksitler, cıva ve partiküller gibi çoklu kirleticilerin yanı sıra karbon dioksit gibi sera gazlarının tutulmasını kolaylaştırır.
- Üretim sürecinde minimum karbondioksit salınmasını sağlayan karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojileri geliştirilmesi gerekmektedir. Şu anda gerekli oksijeni havadan ayırmak için kullanılan kriyojenik sürecin yerini alabilecek yeni teknolojiler geliştirilmesi gerekmektedir.

**HEDEF: YERLİ LİNYİT KAYNAKLARIMIZ İÇİN YERLİ, KALİTELİ ve VERİMLİ
TEMİZ KÖMÜR TEKNOLOJİLERİ**

TEŞEKKÜRLER

Solid organo-
minerals fertilizers



NPK organo-mineral
balanced fertilizers, more
natural with a greater organic
matter content (up to 30%).
All-round, effective fertilizers in
pellets or granules for ease of
application.

