



Use of Molecular Hydrogen in Food Technologies

Duried Alwazeer^{1,2,3,a,*}, Tunahan Engin^{2,3,4,b}

¹Department of Nutrition and Dietetic, Faculty of Health Sciences, Iğdır University, 76000 Iğdır, Turkey

²Research Center for Redox Applications in Foods (RCRAF), Iğdır University, 76000 Iğdır, Turkey

³Innovative Food Technologies Development, Application and Research Center, Iğdır University, 76000 Iğdır, Turkey

⁴YÖK 100/2000 PhD Scholarship

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Review Article</i></p> <p>Received : 08/02/2022 Accepted : 30/03/2022</p> <p>Keywords: Antioxidant Food and food products Molecular hydrogen Shelf-life Quality</p>	<p>Molecular hydrogen is a colorless, odorless, tasteless, non-toxic, flammable, and diatomic gas. Molecular hydrogen is dissolved directly in water to be used in the form of hydrogen-rich water (HRW) to keep the freshness of fruits and vegetables. The shelf-life of the product was increased and the quality attributes were maintained when hydrogen was applied to some food products such as milk, tea, and fruit juices. Some grain products and greens grew rapidly and their antioxidant substance levels increased when they were supplied with hydrogen-rich water. Molecular hydrogen has shown an important application in food drying in recent years, was used especially in reducing atmosphere drying (RAD) technology. Few studies have been conducted on the use of molecular hydrogen in food products. Due to its various positive effects, the use of molecular hydrogen in the food industries using different techniques and processes could be encouraged by the presence review.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10(7): 1205-1213, 2022

Moleküler Hidrojenin Gıda Teknolojilerinde Kullanımı

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p><i>Derlem Makale</i></p> <p>Geliş : 08/02/2022 Kabul : 30/03/2022</p> <p>Anahtar Kelimeler: Antioksidan Gıda ve gıda ürünleri Moleküler hidrojen Kalite Raf ömrü</p>	<p>Moleküler hidrojen (H₂) renksiz, kokusuz, tatsız, toksik olmayan, yanıcı ve diatomik bir gazdır. H₂, direkt gaz formunda ve su içerisinde çözündürüldükten sonra hidrojenle zenginleştirilmiş su (HZS) şeklinde kullanılarak meyve ve sebzelerin taze kalmasını sağlar. Süt, çay ve meyve sularının kalite kriterlerini koruduğunu ve uzun süre depolanmasına yardımcı olduğu belirtilmektedir. Bazı tahıl ürünlerinin ve yeşilliklerinin hızlı bir şekilde büyümesine etki ettiği ve antioksidan maddelerinin aktivitesini artırdığı bildirilmektedir. Son yıllarda gıdaların kurutulmasında önemli bir yere sahip olan hidrojen gazı, özellikle indirgen atmosfer kurutma (İAK) teknolojisinde kullanılmaktadır. Moleküler hidrojenin gıdalarda kullanımı üzerine çok az sayıda çalışma yapılmıştır. Çeşitli olumlu etkileri sebebiyle, gıda endüstrisinde moleküler hidrojenin farklı teknikler ve prosesler kullanımının teşvik edilmesi sağlanmalıdır.</p>

^a alwazeerd@gmail.com

^b <https://orcid.org/0000-0002-2291-1628> | tunahan.engin.3@gmail.com

^c <https://orcid.org/0000-0002-8767-9268>



This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International License

Giriş

Moleküler Hidrojenin Özellikleri

Hidrojen, “H” sembolü ile gösterilen ve atom numarası “1” olan kimyasal bir elementtir (CHFCA, 2019). Moleküler hidrojen (H_2), birbirine bağlanmış iki hidrojen atomundan meydana gelmektedir. Basit kimyasal formülü H_2 veya H-H şeklindedir (MHI, 2019). Saf halde iki atomlu gaz formunda bulunan H_2 , havanın 1/14 yoğunluğunda olduğundan ortamda hızlı bir şekilde dağılma göstermektedir. Evrende en fazla bulunan element olmasına rağmen, dünyada saf halde bulunmadığı bildirilmektedir. Hidrojen; suda oksijenle, fosil yakıtlarda ve sayısız hidrokarbon bileşiklerinde ise karbon ve diğer elementlerle birleşik halde bulunmaktadır (Johnson ve ark., 2005; Alwazeer ve Çiğdem, 2022).

H_2 rensiz, kokusuz, metalik ve toksik olmayan, tatsız, son derece yanıcı bir diatomik gazdır (Kawamura ve ark., 2020). Yoğunluğu $0,09 \text{ kg/m}^3$ olan H_2 , periyodik tablonun en hafif elementi olmasının yanı sıra helyumdan (He) sonra sıvılaştırılması en zor olan gazdır. Havada kendiliğinden tutuşma sıcaklığı 527°C iken günlük hayattaki konsantrasyonu %4’ün üstünde olduğunda tehlikeli olduğu saptanmıştır (Ohta, 2012).

Hidrojen atomu yalnızca yüksek sıcaklıklarda çok reaktif olduğundan doğada kimyasal olarak serbest halde bulunmamaktadır. Moleküler hidrojeni atomik hidrojene parçalamak için çok yüksek sıcaklıklara ihtiyaç vardır. Örneğin, $4726,850^\circ\text{C}$ ’da bile, hidrojenin yaklaşık %5’i ayrışmadan kalır. Doğada çoğunlukla hidrojen, oksijene veya karbon atomlarına bağlıdır (Pant ve Gupta, 2008).

Seçici bir antioksidan olan moleküler hidrojenin çeşitli alanlarda yararlı etkilerinin bulunduğu ve belirli koşullar altında indirgen bir ajan olarak işlev gösterdiği bildirilmektedir. Sağlık alanında yapılan çalışmalarla H_2 ’nin anti-inflamatuar ve anti-apoptotik etki gösterdiği tespit edilmiştir (Kawamura ve ark., 2020). Ayrıca hidroksil ($\cdot\text{OH}$) radikallerini seçici olarak nötralize ederek beyni I/R hasarı ve felce karşı koruduğu gözlemlenmiştir (Deniz, 2006; Hong ve ark., 2010; Kawamura ve ark., 2020). Moleküler hidrojenin bilinen hiçbir toksik etkisi tespit edilmemiş ve etkili bir antioksidan olduğu belirtilmiştir (Ohsawa ve ark., 2007). Ayrıca H_2 gıda katkı maddesi olarak E949 kodu ile sınıflandırılmaktadır (Alwazeer, 2019).

Moleküler Hidrojenin Biyolojik Etki Mekanizması

Moleküler hidrojenin (H_2) seçici anti-oksidatif, anti-inflamatuar ve anti-apoptotik özelliklere sahip olduğu bildirilmektedir. H_2 ’nin moleküler yapısının küçük boyutlu olması ve polar yapıda olmamasından dolayı hücre zarlarından hızla yayılarak hücre organellerine nüfuz edebilmektedir (Alwazeer ve ark., 2021; Ge ve ark., 2017). Son çalışmalar, tatsız ve kokusuz bir gaz olan moleküler hidrojenin (H_2) biyolojik etkilerinin altında yatan kimyasal mekanizmanın, bazı serbest radikalleri nötralize ederek koruyucu etki oluşturmasından kaynaklı olduğunu ortaya koymuştur (Liu ve ark., 2015). Hidrojenin bu koruyucu etkisi kapsamında, reaktif oksijen türlerinden (ROS) en sitotoksik olan hidroksil radikalini seçici olarak azaltarak hücreleri etkin bir şekilde koruduğu, ancak fizyolojik rollere sahip diğer ROS’lar ile reaksiyona girmediği belirtilmektedir (Ohsawa ve ark., 2007). Seçici olarak OH

ve ONOO⁻ temizleyerek DNA hasarını önlediği ve sinyal iletimini modüle ettiğine dair araştırmalar da mevcuttur (Ge ve ark., 2017). Bunlara ek olarak hidrofobiklik, nötralite, boyut, kütle, yüksek lipid çözünürlüğü vb. gibi benzersiz fizikokimyasal özellikleri, hidrojene biyomembranlara (örn. hücre zarları, kan-beyin, plasenta vb.) ve hücre altı bölümlere (örn. mitokondri, çekirdek, vb.) bile hızla nüfuz etmesine olanak sağlamaktadır (Ohta, 2012; Qian ve ark., 2015). Moleküler hidrojenin (H_2) deney hayvanlarında ağır metal detoksifikasyonunu sağladığı tespit edilmiştir (Köktürk ve ark., 2021; Köktürk ve ark., 2022).

Moleküler Hidrojenin Uygulama Yöntemleri ve Depolanması

Moleküler hidrojen solunum terapisi, hidrojenle zenginleştirilmiş su hidrojenle zenginleştirilmiş hemodiyaliz solüsyonu, hidrojenle zengin salin enjeksiyonu, doğrudan hidrojenin difüzyonu (banyolar, göz damlaları ve daldırma) gibi pek çok alanda uygulanmaktadır (Anonim, 2019; Ohta, 2015).

H_2 ; amonyak ve metanol üretimi, petrolün rafine edilmesi gibi alanlarda da kullanılmaktadır. Katı, sıvı ve gaz şeklinde depolanabilmektedir. Hidrojen, süper izolasyonlu vakumlu tanklarda -253°C ’de sıvı halde (LH_2) depolanabilirken, gaz formu ise boşalmış doğal gaz yatakları, mağaralar ve büyük depolama tanklarında depolanmaktadır. Hidrojenin katı olarak depolanması ise metal hidratlar şeklinde gerçekleştirilmektedir (Dao, 2016).

Hidrojen Gazı Üreten Gıdalar

İnce bağırsak tarafından emilemeyen bazı ilaçlar ve yiyecekler, bakteriler tarafından kullanılarak H_2 üretebilmekte ve üretilen H_2 bağırsak kolonuna taşınmaktadır. Bazı araştırmacılar oral akarboz, modifiye nişasta, süt, kurkumin ve laktulozun insan vücudunda üretilen H_2 ’yi destekleyebileceğini ifade etmiştir. Ayrıca kolonda bakteriler tarafından üretilen H_2 oluşturan diğer gıda bileşenleri arasında pamuk tohumu şekeri, laktoz, sorbitol, mannitol, kitosan ve çözünür liflerinde bulunduğunu saptamışlardır. Bağırsak bakterilerinin fazla miktarda indükleyebildiği H_2 gazının bir kısmı, metan bakterileri gibi bazı bakteriler tarafından kullanılabilir de çoğu bağırsak mukozası yoluyla kan dolaşımına emilmekte ve diğer organlara taşınabilmektedir (Chen ve ark., 2011; Liu ve ark., 2010; Sun ve ark., 2015).

Moleküler Hidrojenin Gıda Uygulamalarında Kullanımı

Hidrojen gazının gıda uygulamalarında kullanımı ile ilgili olarak bu konuyu kapsayan az sayıda çalışma bulunmaktadır. Hidrojen gazının gıda endüstrisinde farklı ürünler üretiminde kullanılabilmesi belirlenmiştir (Şekil 1).

Hidrojenle Zenginleştirilmiş Su

Japonya’da özellikle indirgenmiş su olmak üzere fonksiyonel su üzerine yapılan bir çalışmada, doğal ve elektrokimyasal olarak indirgenmiş suların kültürlenmiş hücrelerdeki reaktif oksijen türlerini temizlediği ifade

edilmiştir. İndirgenmiş suyun, sağlığa yararlı olduğu ve diyabet, kanser, damar sertliği, nörodejeneratif hastalıklar ve hemodiyaliz yan etkileri gibi oksidatif stresle ilişkili hastalıkları baskıladığı belirtilmiştir. Elektrokimyasal olarak indirgenmiş sular (ERW), hidrojen molekülleri ve mineral nanopartikülleri içermektedir. Hidrojen molekülleri ve aktif hidrojen, antioksidatif enzimlerin gen ekspresyonunu indükleyebilen yeni bir redoks regülasyonu oluşturabilmektedir. Hidrojen molekülleri, daha güçlü indirgenebilirlik sergilemek için metal nanopartiküllerin katalizör etkisiyle aktif hidrojene dönüştürülebilmektedirler. Ayrıca mineral nanopartiküllerin de yeni çok işlevli antioksidan türler olduğu saptanmıştır. İndirgenmiş sular; yiyeceklerin tadını, dokusunu ve muhafazasını iyileştirerek gıda endüstrisine de katkıda bulunabilmektedir (Shirahata ve ark., 2012).

Hidrojenle zenginleştirilmiş suyun (HZS) antioksidan etkisi *in vitro* ve hayvan modellerinde test edilmiş ve birkaç hasta üzerinde uygulanan çalışmalardan elde edilen veriler, HZS'nin antioksidan kapasitesini artırdığını ortaya koymuştur (Sim ve ark., 2020). Dört haftalık HZS tüketimi ile, antioksidan kapasitesinde önemli bir artışın ve DNA'lardaki oksidatif strese ise azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca HZS etkilerinin katılımcıların yaşına göre değişebileceği ve 30 yaş üstü yetişkinler için biyolojik antioksidan kapasitesinin genç bireylere göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir (Sim ve ark., 2020).

Eh değeri suyun kalitesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Su ve atık sulardaki klor fazlalığı yüksek pozitif Eh değerine neden olurken, mikrobiyal yük tarafından üretilen hidrojen sülfid veya hidrojen gazının varlığı Eh değerini negatif değerlere çekmektedir (Alwazeer, 2020).

H₂'nin yiyecek-içecek ve suyun antioksidan aktivitesi üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada; hidrojenin gıda endüstrisi alanında ürünlerin oksidasyonu ve bozulmasını önlemeye yardımcı gaz olarak kullanıldığı belirtilmiştir. Normal içme suyu içildiğinde hücre ve dokulardan %80-90 oranında elektron geçişi olmaktadır. Böylece vücudun biyolojik yapıları oksidatif yıkıma uğrayarak hayati organlar işlevlerini kaybetmektedir. Bu olumsuz durumun giderilmesi için vücuda yiyecek ve içeceklerin koruyucu olarak alınması gerekmektedir. Bu sebeple su, meyve suları ve diğer içeceklerin sulu çözeltilerinin artırılması, oksidasyon ve indirgeme özelliklerinin değiştirilmesi ve negatif oksidasyon potansiyelinin azaltılması için hidrojenle doyurma işlemi uygulanmaktadır (Lapin ve ark., 2019).

Hidrojenle Zenginleştirilmiş Su Üretim Yöntemleri

Hidrojenle zenginleştirilmiş su (HZS) üretmek için birçok farklı yöntem bulunmaktadır. HZS, yüksek basınç altında hidrojen gazının su içerisinde çözülmesi, elektroliz yöntemiyle hidrojenin suda çözülmesi ve magnezyum gibi alkali metallerin su ile reaksiyona girmesi sonucunda elde edilebilmektedir (Huang ve ark., 2010; Ohta, 2011).

Alkali ve Magnezyum Çubuk ile HZS Üretimi

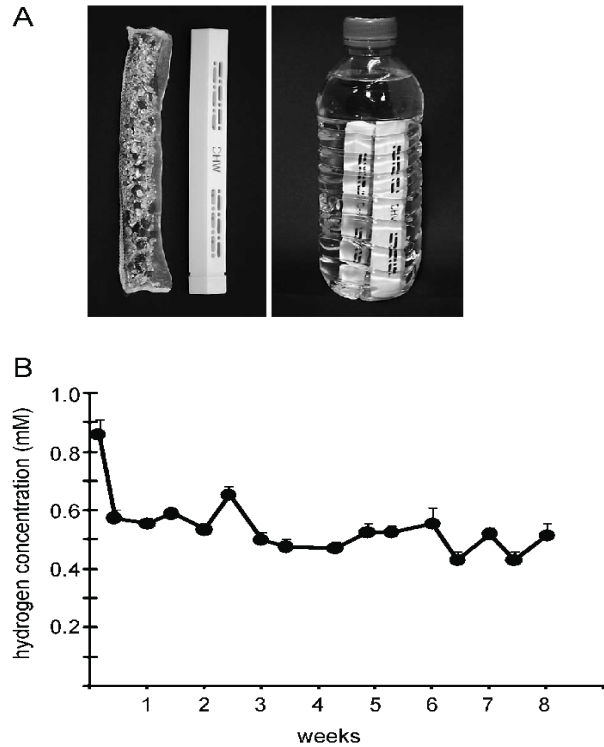
HZS, üretmek için basit, düşük maliyetli ve güvenli yöntemlerin en başında alkali veya magnezyum çubukların kullanımı gelmektedir (Farahani, 2017).

Fujita ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada magnezyum boncuklarını içeren bir çubuğu, yarım litrelik şişenin içerisine daldırılmış ve 2 saat süre sonunda suda 0,8 ppm hidrojen üretildiğini tespit etmişlerdir (Şekil 2). Bu durum 1,5 ppm çözülmüş hidrojen içeren hidrojene su sistemlerine göre benzer antioksidatif özellikler göstermiştir. Ayrıca alkali veya magnezyum çubuk ile üretilen hidrojenli suyun kararlılığının, hidrojen kabarcıklı üfleyiciden nispeten daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.



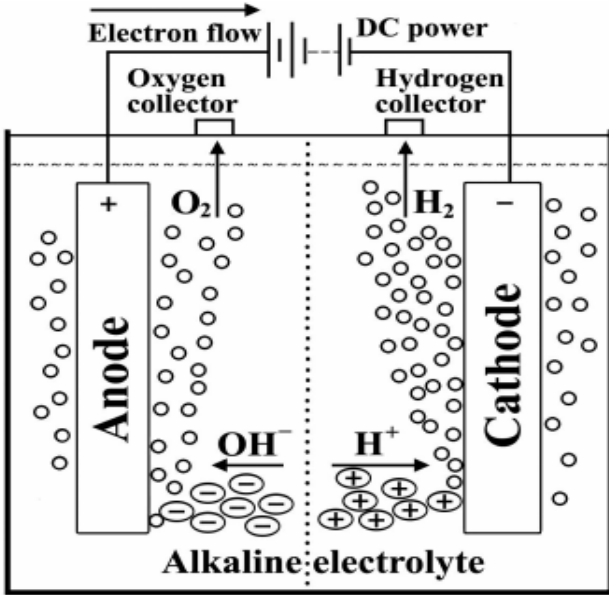
Şekil 1. Moleküler Hidrojenin Gıda Uygulamalarında Kullanımı

Figure 1. Use of Molecular Hydrogen in Food Applications



Şekil 2. A: 500 ml su şişesine magnezyum çubuk konularak hidrojenli su üretimi; B: 8 hafta boyunca su şişesindeki hidrojen konsantrasyonu (Nakao ve ark., 2010)

Figure 2. A: Hydrogen water production by placing a magnesium rod in a 500 ml water bottle; B: Hydrogen-rich water production by placing in the water bottle during 8 weeks (Nakao et al., 2010)



Şekil 3. Elektroliz yöntemiyle hidrojenli su üretimi (Santos ve ark., 2013)

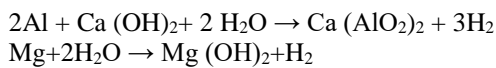
Figure 3. Hydrogen-rich water production Alwazeer, 2019



Şekil 4. Alkali ve hidrojenli su içeceği

Figure 4. Alkaline Water and Hydrogen-Infused Water Are They Actually Healthier? 11.04.2019) Zero Calorie Molecular) Hydrogen & Nitric Oxide Super Drink, 15.12.2020)

Alkali metaller ve magnezyum içeren çubukların (hidrojen konsantrasyonu; 0,55-0,65 mM) su ile kimyasal reaksiyonu aşağıdaki gibi verilmiştir (Fujita ve ark., 2009; Nakao ve ark., 2010).



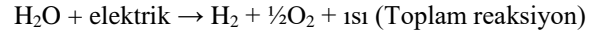
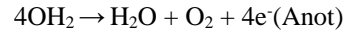
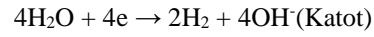
Hidrojen Gazının Suda Çözündürülmesi ile HZS Üretimi

Bir hidrojen gazı jeneratörü tarafından üretilen veya hidrojen tüpünden saf H₂'nin (%99,99, v/v), çözeltiyi H₂ ile doymak üzere belli bir süre boyunca suda çözündürülmesiyle HZS elde edilebilmektedir (Bernardi ve ark., 2008).

Elektroliz Yöntemiyle HZS Üretimi

HZS üretmek için kullanılan diğer bir yöntem de elektroliz işlemi ile su içerisinde hidrojenin köpük oluşturması sonucunda hidrojenli su üretilmektedir.

Elektroliz işlemi genellikle bir düzlem metal veya karbon içerikli plakalar yardımıyla gerçekleştirilmektedir. İki elektrot ve elektrolit sıvısı bulunmaktadır. Elektrota bağlanan doğru akım kaynağı, iletken sıvı yardımıyla pozitif elektrottan (anot) negatif elektrota (katot) aktarılmaktadır (Şekil 3). Bu işlem sonucunda elektrolit içinde bulunan su, katottan gelen hidrojen ve anottan gelen oksijene ayrılmaktadır. Elektroliz işlemindeki elektrokimyasal reaksiyonlar aşağıda gösterilmektedir (Amikam ve ark., 2018).



Meşrubat ve Meyve Suyu Teknolojisi

Taze ve ısı işlem görmüş portakal suyunda *Lactobacillus plantarum* ve *Saccharomyces cerevisiae* davranışının incelendiği bir araştırmada; portakal suyuna verilen N₂ veya N₂-H₂ gaz karışımının portakal suyunun renk kalitesi ve askorbik asit stabilitesini artırdığı belirtilmiştir. Hidrojenin, pastörizasyon sırasında normal portakal suyunda mikrobiyal yıkımı en üst düzeye çıkardığı, mikroorganizma gelişimini önlediği ve depolama sırasında renk ve askorbik asit içeriğini koruduğu tespit edilmiştir (Alwazeer, 2019a; Alwazeer ve ark., 2003).

Moleküler hidrojenin serebral enfarktüs ve travmatik beyin hasarı (TBI) dahil nörodejeneratif hastalıklara karşı nöroprotektif tıbbi bir gaz olarak ortaya çıktığı saptanmıştır. Hidrojenin, çeşitli transkripsiyon faktörlerini ve protein fosforilasyon basamaklarını düzenleyerek seçici anti-inflamatuar, antioksidan ve anti-apoptotik etkiler gösterdiğini tespit etmişlerdir. Nitrik oksit ise TBI'ların korunmasını ve geri kazanılması için kullanılmaktadır. Ayrıca TBI'ların patofizyolojilerine ve yaralanmalarına katkıda bulunan başka bir tıbbi gaz olduğunu belirtmişlerdir. İndüklenebilir nitrik oksit sentezinin aşırı aktivasyonu, aşırı inflamasyonu, oksidatif/nitrozatif hasara ve ihtiyaç duyulan yerlerde paradoksal bir nitrik oksit tükenmesine yol açtığını ifade etmişlerdir. Hidrojen bu zararları azaltarak nitrik oksit üretimini ve metabolizmasını düzenlediğini bildirmişlerdir. H₂ ilave edilmiş, nitrik oksit üreten yeni bir içecek Hydro Shot üretilmiştir. Bu içeceğin TBI'lar için önemli nöroprotektif faydalara sahip olabileceği ve adjuvan tedavi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir (LeBaron ve ark., 2021). (Şekil 4).

Taze Meyvelerin Muhafazası

HZS kullanılan kivi meyvesinde antioksidan savunma sisteminin düzenlenerek hasat sonrası olgunlaşmayı ve depolama sırasında meydana gelen yaşlanmayı geciktirdiği saptanmıştır (Zhu ve ark., 2016). Başka bir çalışmada ise; yine hidrojen gazının etilen biyosentezini azaltarak kivi meyvesinin raf ömrünü uzattığı, HZS'nin kivi meyvesinin tazeliğini koruduğu belirtilmiştir (Hu ve ark., 2018) (Şekil 5). H₂ gazının zararsız olması, yan etkilerin olmaması, kolay yayılması ve meyvelerin hasat sonrası muamelesi için umut verici bir gaz olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Süt Teknolojisi

Sütlü İçecek

%2 keten tohumu ile zenginleştirilerek N₂ veya N₂/H₂ gibi farklı gaz karışımlarına tabi tutulan süütün sterilizasyonu sonucu lipit oksidasyonunun tam bir inhibisyon saptanmıştır. Ayrıca, N₂ veya N₂/H₂ karışımı ile doyunluğun oksidatif bozulmayı önemli ölçüde azalttığı ve depolama sırasında renk değerlerindeki değişikliklere karşı bir miktar koruma sağladığı tespit edilmiştir (Giroux ve ark., 2008).

Süt

Hidrojen gazının farklı mikrobiyal fizyolojik parametreler üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, hidrojen gazının oksidatif bozulmayı azalttığını ve süütün lipit oksidasyonunu inhibe ettiğini saptamışlardır (Cachon ve ark., 2002).

Yoğurt

Farklı gaz koşullarının (hava ile muamele edilmiş süt +433 mV, işlem görmemiş süt +405 mV, N₂ gazı verilmiş süt +283 mV ve N₂-H₂ gaz karışımı verilmiş süt -349 mV) yoğurdun bazı fiziko-kimyasal özellikleri üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, yoğurtların reolojik özellikleri, mikro yapısı, görünür viskozite ve peynir altı suyu ayrımı belirlenmiştir. N₂-H₂ kullanılan yoğurtların daha yüksek jel agregasyonu, daha düşük gözenek oranı ve düşük peynir altı suyu ayrımı gösterdiği saptanmıştır. N₂-H₂ indirgenme ortamının görünür viskozite oranını azalttığı da bildirilmiştir. Ayrıca laktik asit bakterileri tarafından Eh 7 de ekzopolisakkarit üretimi sağlanmış ve en yüksek değerlerin hava (oksitlenme) ve N₂-H₂ (indirgenme) koşulunda olduğu tespit edilmiştir (Martin ve ark., 2010).

Fermente edilmiş süütün redoks potansiyeli değiştirilerek *Bifidobacterium bifidum*'un hayatta kalmasını iyileştirmek için bazı gazlar kullanılmış ve probiyotik bir suş olan *Bifidobacterium bifidum* ile *Streptococcus thermophilus* ve *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* yoğurt suşları üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk redoks potansiyeli değerleri +440 mV (kontrol), +350 mV (N₂ ile muamele edilmiş süt) ve -300 mV [N₂ + %4 (v/v) H₂ gazı verilmiş süt (N₂-H₂)] olarak ölçülmüştür. Depolama sırasında, N₂ gazı ile muamele edilerek hazırlanan fermente probiyotik süt ürünleri ile N₂-H₂ gaz karışımı ile muamele edilen süt ürünlerinin fermentasyon kinetiğini ve *Bifidobacterium bifidum*'un canlılığını önemli ölçüde uzatmıştır (Ebel ve ark., 2011).

Tereyağı

Tereyağı yıkama suyunda hidrojen açısından zengin su (H₂S) ve magnezyum içeren suyun (Mg su) kullanıldığı çalışmada (Bulut ve ark., 2022), ham tereyağının H₂S ile yıkanmasının, triptamin, 2-feniletilamin, spermidin ve spermin oluşumunda önemli bir azalmaya yol açtığı belirlenmiştir. Ayrıca en düşük histamin düzeyinin H₂ ve Mg ile yıkanan tereyağı örneklerinde ve en yüksek düzeyin normal su ile yıkanan tereyağında olduğu belirlenmiştir.

İndirgen Atmosferik Kurutma Teknolojisi

Kurutma; et, tahıl, meyve ve sebzeler gibi çeşitli gıdaların nem içeriğinin azaltılması, raf ömrünün uzatılması, depolama boyunca fiziksel ve kimyasal değişimlerin önlenmesi ve gıdaların mevsimi dışında da tüketilebilir hale getirilmesi için kullanılan en eski, ucuz ve yaygın gıda muhafaza yöntemlerinden biridir. Geleneksel

kurutma yöntemleri kurutma sırasında genellikle yüksek sıcaklık ve kurutma ortamı olarak hava kullandığından, ürün kalitesinde istenmeyen sonuçlar doğurmaktadır. Kurutulan ürünlerde meydana gelebilecek bu kalite kayıplarını önleyebilmek için %21 seviyesinde O₂ muhteva eden hava; N₂ ve CO₂ gibi gazlarla modifiye edilerek O₂ ortamdan uzaklaştırılmaktadır. Bu gaz çeşitlerine alternatif olarak H₂ içeren bir kurutma atmosferi ile kurutma işlemi yapan İndirgen Atmosferik Kurutma (İAK) adlı yeni bir teknik geliştirilmiştir (Örs, 2019).

Modifiye atmosfer kurutma (İAK) sisteminden farklı olarak, indirgen gaz (H₂) içeren gaz karışımı (CO₂ ve/veya N₂ ve/veya H₂) kullanımına dayanan İndirgen Atmosferik Kurutma tekniği, Alwazeer ve Örs (2019), tarafınca Heat Pump Kurutma (HPK) sistemine benzer şekilde laboratuvar şartlarında tasarlanmış ve dünyada ilk defa uygulanmış yeni bir kurutma tekniğidir. Bu kurutma tekniği ile modifiye atmosfer kurutma yönteminde kullanılan N₂ ve CO₂ gibi gazlara ilaveten ilk defa indirgen gaz (H₂) kullanılmış ve hem gıda hem de ortamda bulunan O₂, serbest radikaller ve diğer oksidan maddelerin indirgenmesiyle N₂ ve CO₂ gazlarından daha etkili sonuçlar elde etmek amaçlanmıştır. Ayrıca yüksek duyuşal ve besinsel kalitede kuru kayısı elde etmek; esmerleşme reaksiyonlarının neden olduğu renk kayıplarını önleyebilmek; vitamin, antioksidanlar ve pigmentler gibi besin öğelerinin kaybını en aza indirmek ve enerji verimini artırmak hedeflenmiştir (Örs, 2019).

Alwazeer, (2018) elma ve kayısı meyveleri; dondurarak (liyoofilizasyon), vakumda, fırında ve İndirgen Atmosferik Kurutma [hava, %100 azot ve indirgen gaz içeren bir gaz karışımı (RAD (Mix); %1-4 H₂, %5 CO₂, %91-94 N₂) ile 3 farklı kurutma atmosferinde] olmak üzere farklı şekillerde kurutulmuştur. Kurutulan ürünlerin renk değerleri (L*, a*, b*) ölçülmüş ve karşılaştırılmış, sonuç olarak elmada tazeye en yakın renk değerlerine, ilk sırada liyoofilizasyon, ikinci sırada ise RAD (Mix) ile ulaşılmış ve esmerleşmenin en fazla fırın ile kurutulan elmalarda gerçekleştiği tespit edilmiştir (Şekil 6).

Alwazeer ve Örs, (2019) kayısı meyvesini İAK sistemiyle CO₂/N₂/H₂ (% 91/5/4, v/v) gazlarından oluşan bir gaz karışımı ile kurutmuş ve kayısının renk profili ve antioksidan özelliği üzerinde koruyucu etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca kayısının toplam fenolik, DPPH, ABTS ve toplam flavonoid içeriklerinin taze ürünle benzer olduğunu saptamışlardır.

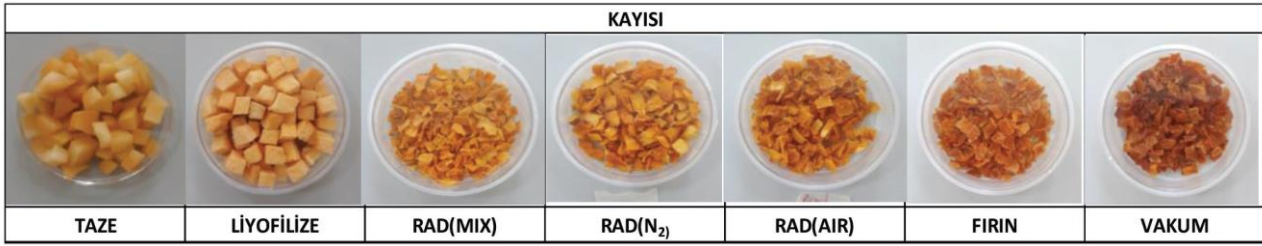
İndirgen Atmosfer Paketleme Teknolojisi

Modifiye atmosfer paketleme (MAP), son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte taze veya işlenmiş gıda ürünlerinin pazara dağıtımı ve tüketiciye ulaşması için kullanılan bir paketleme tekniğidir. Biyokimyasal, enzimatik ve mikrobiyolojik gelişmeleri engelleyerek gıdaların bozulmasını önlemektedir. Bu bozulma olaylarının kontrol altına almak için üç temel gaz (CO₂, O₂, N₂) kullanılmaktadır. MAP tekniğinde kullanılan oksijenin uzaklaştırılması için oksijen tutucu kullanılmaktadır. Ayrıca MAP, kullanılan oksijen konsantrasyonu 100 ppm gibi düşük seviyelere düşürülmesi ve bu seviyelerde tutulması ile ürün tazeliğini koruması için kullanılan bir paketleme tekniğidir (Erđing, 1996).



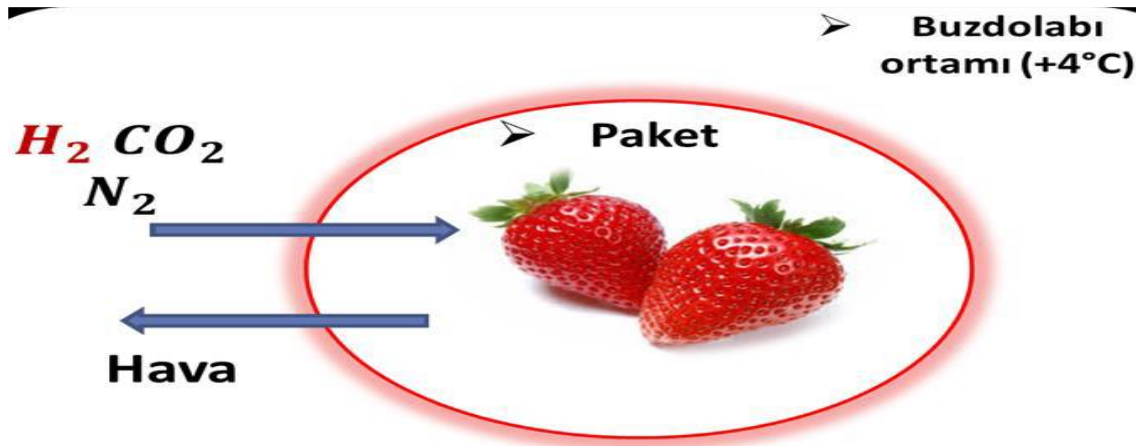
Şekil 5. Oda sıcaklığında depolanan kivi meyvesine hava (kontrol), hidrojen gazı ($4.5 \mu\text{L L}^{-1} \text{H}_2$), C_2H_4 ($1.0 \mu\text{L L}^{-1}$) ve $\text{C}_2\text{H}_4+\text{H}_2$ karışımının etkileri (Hue ve ark., 2018)

Figure 5. Effects of air (control), hydrogen gas ($4.5 \mu\text{L L}^{-1} \text{H}_2$), C_2H_4 ($1.0 \mu\text{L L}^{-1}$) and $\text{C}_2\text{H}_4+\text{H}_2$ mixture on



Şekil 6. Farklı kurutma işlemleri sonucu taze kayısı meyvesinde meydana gelen renk değişimi (Alwazeer, 2018)

Figure 6. Color change in fresh apricot fruit as a result of different drying processes (Alwazeer, 2018)



Şekil 7. İndirgen atmosfer paketleme (İAP) ile çileğin depolanma prensibi (Özkan, 2019)

Figure 7. Reducing atmosphere packaging (IAP) and the storage principle of strawberry (Özkan, 2019)

Birçok gıda sektöründe CO_2 , O_2 ve N_2 gibi gazlar (et, balık, süt ürünleri, hazır yemekler, içecekler, şarap, fırıncılık vb.) kullanılmaktadır. Ambalajdaki hava farklı gazlarla değiştirilerek, lipidler ve proteinler üzerindeki kimyasal veya enzimatik oksidasyon reaksiyonları yavaşlatılmaktadır. Ayrıca patojenik veya bozucu aerobik ve anaerobik bakterilerin, mayaların, küflerin ve virüslerin gelişimi azaltılmakta veya engellenmektedir (Majou, 2019). MAP'ta genellikle CO_2 , O_2 ve N_2 gazları kullanılmasına rağmen, H_2 'nin indirgen özelliğinden dolayı N_2 ile karışımı da kullanılmaktadır (Alwazeer, 2019). Redoks potansiyelinin H_2 tarafından modüle edilmesi, bir yandan bakteriler üzerinde pozitif ve negatif seçici bir baskı uygularken, diğer yandan ürünün duyuşal ve besleyici etkileri üzerine de olumlu etkileri bulunmaktadır (Majou, 2019).

Alwazeer ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada taze peynir numunelerini paketlemek için indirgen atmosfer

paketleme tekniğini (İAP) kullanarak H_2 içeren bir gaz karışımını taze peynir örneklerine uygulamışlardır. Peynir örneklerini, indirgen atmosfer paketleme (İAP) [İAP 1 (%90 CO_2 / %6 N_2 / %4 H_2), İAP 2 (%50 CO_2 / %46 N_2 / %4 H_2)], ile modifiye atmosfer paketleme (MAP) [MAP 1 (%90 CO_2 / %10 N_2), MAP 2 (%50 CO_2 / %50 N_2) ve MAP 3 (Hava)] ve açık hava (Kontrol) şartlarında paketleyerek herhangi bir tuzlama, salamura veya koruyucu kullanmadan 7 hafta boyunca 4°C 'de depolamışlardır. Taze peynir numunelerine en yakın renk ve titre edilebilir asitlik değerlerine İAP 1'de örneklerinde rastlamışlardır. En yüksek ve en düşük toplam mezofilik-aerobik bakteri (TMAB) sayılarına sırasıyla kontrol ve İAP 1 numunelerinde ulaşmışlardır. İAP ve taze numuneler arasındaki benzerliğin H_2 'nin koruyucu özelliğinden kaynaklandığını belirtmiş ve H_2 'nin önemine dikkat çekmişlerdir (Alwazeer ve ark., 2020).

Özkan, (2019) yeni bir depolama yöntemi olan İAP'ın çilek meyvesinin kimyasal ve fiziksel kalitesi üzerine etkisini incelediği çalışmada, çilekleri İAP 1 (%5 CO₂/ %91 N₂ / %4 H₂), İAP 2 (%10 CO₂ / %86 N₂ / %4 H₂), MAP 1 (%5 CO₂ / %95 N₂), MAP 2 (%10 CO₂ / %90 N₂) ve açık hava (kontrol) gibi 5 farklı konsantrasyonlarda 4±1°C sıcaklıkta 12 hafta süreyle depolanmıştır. Depolama sonunda İAP yönteminin MAP ve kontrol uygulamalarına göre yüksek oranda CO₂ ve koruyucu madde kullanmadan çileğin raf ömrünü uzattığını belirtmiştir (Alwazeer ve Özkan, 2022). Bu durumun İAP yönteminde kullandığı H₂'nin etkinliğinin diğer gazlardan daha yüksek olmasından kaynaklandığını bildirmiştir (Şekil 7). Sezer ve arkadaşları (2022), moleküler hidrojenin (H₂) modifiye atmosfer paketlemesine dahil edilmesinin hem tatlı su hem de deniz suyu balıklarında, yani sırasıyla gökkuşuğu alabalığı ve istavritte +4°C'de saklanan biyojenik aminlerin (BA) oluşumu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 15 gün boyunca balık örnekleri, modifiye atmosfer ambalajında [MAP1 (%50 CO₂/ %50 N₂) ve MAP2 (%60 CO₂/ %40 N₂)], indirgen atmosfer ambalajında [RAP1 (%50 CO₂/ %46 N₂/ %4 H₂) ve RAP2 (%60 CO₂/ %36 N₂/ %4 H₂)] ve hava altında (kontrol) paketlenmişlerdir. Hem MAP'lar hem de RAP'lar, her iki balık türünde de heterosiklik, aromatik ve alifatik diaminlerin (histamin, tiramin, putresin, kadaverin) oluşumu üzerinde önemli kısıtlayıcı etkiler göstermiş ve MAP'tan ziyade RAP'da daha güçlü bir etki görülmüştür. RAP'larda BA'ların azalma oranları, MAP'larından yaklaşık iki kat daha yüksek çıktığını belirlemişlerdir (Sezer ve ark., 2022).

Yağ Teknolojisi

Hidrojenasyon, sıvı yağların margarin, katı yağ, uçucu yağ ve diğer özel ürünler için uygun yarı katı yağlara dönüştürme işlemidir (Babae ve ark., 2007; Cizmeci ve ark., 2005). Gıda endüstrisinde hidrojen, yağ asitlerinin doymamış bağlarını dourma özelliği nedeniyle, sıvı yağların hidrojenasyonu ile margarin üretiminde kullanılmaktadır (Alwazeer, 2019).

Soya fasulyesi yağının mevcut yoğunluğunun, sıcaklığının ve yağ akış hızının yağ hidrojenasyonu mevcut verimliliği ve ürün seçiciliği üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, bir elektrokimyasal reaktöründe yağ (H₂/O₂ yakıt hücresinde kullanılan) kısmen hidrojenize edilmiştir. Yağ asidi çift bağına ilave edilen H₂'nin etkinliği sıcaklık ile artmış, mevcut yoğunluğu ise %45-97 arasında değişiklik göstererek azalmıştır. Kısmen hidrojene yağ ürünleri, düşük yüzdeli trans-yağ asidi izomerleri ve orta derecede yüksek bir doymuş stearik asit konsantrasyonu ile karakterize edilmiştir. Bir dizi elektrohidrojene soya fasulyesi yağı ürünündeki stearik asit ve trans izomerlerin toplam konsantrasyonu, Ni katalizörü ile yüksek sıcaklıktaki bir kimyasal hidrojenasyon işleminden elde edilenden %20-40 daha düşük bulunmuştur. Bimetalik bir katodun (Pd/Co veya Pd/Fe) kullanımı, bir Pd-siyah katod kullanımına kıyasla hidrojenasyon işleminin seçiciliğini arttırmıştır. Seçicilik arttığında mevcut verimlilikte bir düşüş, hidro-yağ ürünlerinin trans izomer içeriğinde ise bir artış meydana gelmiştir (Pintauro ve ark., 2005).

Yemeklik sıvı yağ ve katı yağ üreticileri için, yenilebilir yağların hidrojenasyonunda katalizörlerin ve trans yağ asitlerinin sağlık açısından önemi incelenmiştir. Katalizörlerin, seçicilik oranı, yağ asidi bileşimi, trans izomer oluşumu üzerindeki etkisi, kayma erime noktaları,

çoklu doymamışların doymuş ve trans yağ asitleri üzerine önemli olduğu belirlenmiştir. Şekerlemelerdeki kaplama ürünleri, dolgu kremleri ve sürülebilir ürünler gibi pek çok ürünün, oda sıcaklığında yarı katı olması, ancak vücut sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta kolayca eriyebilmesi için oldukça seçici koşullar altında yağların üretimi sağlanmalıdır (Babae ve ark., 2007). Kültüre edilmiş tereyağının hidrojen zengin su ile yıkanmasının fizikokimyasal özellikleri iyileştirdiği (Ceylan ve ark., 2022), ağır metal içeriğini azalttığı (Alwazeer ve ark., 2022) ve tereyağında biyojenik aminlerin oluşumunu kısıtladığı bildirilmiştir (Bulut ve ark., 2022).

Alkollü İçecekler Teknolojisi

Kükürt dioksit (SO₂) indirgeyici madde olarak, aroma kaybını geciktirmek ve biranın raf ömrünü uzatmak için kullanılmaktadır. Ancak kükürt dioksit ve sülfidler alerjen olarak kabul edilmekte ve gıda katkı maddesi olarak kullanımı gıda güvenliği açısından tehlike arz etmektedir (Guido, 2016). Bu yüzden biradaki gıda güvenliğinin önüne geçilmesi amacıyla bira üretiminin bazı aşamalarında %4'ten daha düşük seviyelerde hidrojen gazı içeren indirgeyici gaz halindeki karışımlar kullanılabilir. H₂ kullanımının, SO₂ kullanımının önlenmesi veya azaltılması için alternatif bir yöntem olduğu belirtilmektedir (Alwazeer, 2020).

Girault ve Ibarra (2013) yaptıkları bir çalışmada N₂-H₂ (%96-4, v/v) (-290 mV) ile fokurdayan mayşeyi, havalandırılmış bir kontrol şirasına (ortalama Eh değeri yaklaşık +291 mV) ve N₂ içeren şıra (ortalama Eh değeri yaklaşık +216 mV) içerisine ekleyerek biranın köpük tutma özelliğini geliştirmişler ve redoks potansiyeli değerinin düşük olmasının köpük tutma özelliğini iyileştireceği sonucuna varmışlardır.

Bitkilerden Biyoaktif Bileşiklerin Ekstraksiyonu

Ryu ve ark., (2019) tarafınca uygulanan bir çalışmada su; azot (N₂), oksijen (O₂), hidrojen (H₂), karbondioksit (CO₂) ve hava ile muamele edilerek bu gazların yeşil çayda antioksidan aktivitesi ve fitokimyasalların ekstraksiyon verimi üzerine etkisi incelenmiştir. H₂ ile muamele edilen suyla hazırlanan yeşil çay infüzyonunun, diğer gazlar ve hava içeren su ile hazırlananlara kıyasla önemli seviyede yüksek fenolik bileşik içerdiği ve yüksek antioksidan aktivite sergilediği tespit edilmiştir. Kontrol örnekleri ve CO₂ ile hazırlanan yeşil çay infüzyonunun en düşük antioksidan aktivite gösterdiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, en düşük kateşin içeriğine O₂ ile muamele edilen yeşil çay infüzyonlarında rastlanmıştır. H₂ ile muamele edilen suyla işlenmiş yeşil çay yapraklarının daha fazla fenolik bileşik içermesi sebebiyle, yüzey morfolojik özelliklerinin diğer gruplara kıyasla daha fazla zarar gördüğü tespit edilmiştir. Genel olarak, yeşil çay yapraklarındaki fenolik ekstraksiyon veriminin, diğer gazlarla muamele edilmiş sulara nazaran H₂ içerikli su ile daha yüksek olduğu elde edilmiştir. HZS kullanılarak hazırlanan yeşil çay yapraklarının yüksek bir oksido-reduksiyon potansiyeline (ORP) sahip olduğu belirtilmiştir. Bu durumun yeşil çay yapraklarında bulunan fenolik bileşiklerin, yeşil çay ekstraktındaki fenolik bileşiklere oranla daha yüksek olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ayrıca HZS'nin çeşitli çay yapraklarından elde edilmiş polifenol içerikli çayların hazırlanmasında da faydalı olabileceği bildirilmiştir (Ryu ve ark., 2019).

Sonuç

Moleküler hidrojenin gıda alanında kullanımı giderek artmaktadır. İlk olarak katı yağ (margarin) üretiminde kullanılmaya başlayan H₂, zamanla meyve-sebze ve süt ürünleri, içme suyu üretimi, kurutma ve paketlenme teknolojisi alanlarında da kullanılmaya başlamıştır. Ayrıca, tarım, sağlık ve çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrojenin havada alev alabilirlik düzeyi %4 ile %75 (v/v); normal sıcaklık ve atmosfer şartlarında patlayabilme sınırı ise %18,3 ile %59 (v/v) arasında olduğu bilinmektedir. N₂ ile seyreltilmiş hidrojenin patlama riskini düşürdüğü belirtilmiştir. Hidrojenin %4'ün üzerinde kullanımı gıda sektöründe uygun görülmemektedir. Hidrojen, sıkıştırılmış gaz veya sıvı hidrojen olarak, hidrürler oluşturularak ve mağaralarda depolanabilmektedir. Bütün bu yöntemlerin dışında hidrojen gazını depolamanın en ucuz yöntemi, doğalgaza benzer şekilde, yeraltında, tükenmiş petrol veya doğal gaz rezervuarlarında depolamaktır. Seçici bir antioksidan olan moleküler hidrojenin şu ana kadar hiçbir yan etkisi bulunmamıştır. Antiinflammatuar ve antiapoptik özelliklerinden dolayı ilaçların etki gösteremediği bölgelerde etki edebilmektedir. Diyabet, kanser, iskemi reperfüzyon gibi çeşitli hastalıklar üzerinde tedavi edici etkisi bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar moleküler hidrojenin birçok alanda olumlu etkilerinin olduğunu göstermektedir. Buna rağmen moleküler hidrojen ile ilgili çalışmaların kısıtlı olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı moleküler hidrojenin gıdalarda uygulama alanları ile ilgili çalışmaların yaygınlaşması önerilmektedir.

Teşekkür

Epoch (Tayvan) firmasına Oksi-hidrojen cihazını Redoks Araştırma Merkezine hibe olarak verdiği için teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Alkaline Water and Hydrogen-Infused Water: Are They Actually Healthier? (11.04.2019). https://www.huffpost.com/entry/wellness-waters-hydrogen-alkaline_1_5ca239a2e4b09786986a6966

Alwazeer D, Ceylan MM, Bulut M, Koyuncu M. 2022. Evaluation of the Impact of Hydrogen-Rich Water on the Deaccumulation of Heavy Metals in Butter. *Journal of Food Safety*, Under revision.

Alwazeer D, Çiğdem A. 2022. Use of the molecular hydrogen in agriculture field. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 10(1): 14-20.

Alwazeer D, Delbeau C, Divies C, Cachon R. 2003. Use of redox potential modification by gas improves microbial quality, color retention, and ascorbic acid stability of pasteurized orange juice. *International Journal of Food Microbiology*. 89(1): 21-29.

Alwazeer D, Liu FFC, Wu XY, LeBaron TW. 2021. Combating oxidative stress and inflammation in COVID-19 by molecular hydrogen therapy: Mechanisms and perspectives. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*.

Alwazeer D, Örs B. 2019. Reducing atmosphere drying as a novel drying technique for preserving the sensorial and nutritional notes of foods. *Journal of Food Science and Technology*, 56(8): 3790-3800.

Alwazeer D, Özkan N. 2022. Incorporation of hydrogen into the packaging atmosphere protects the nutritional, textural and sensorial freshness notes of strawberries and extends shelf life. *Journal of Food Science and Technology*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05427-y>.

Alwazeer D, Tan K, Örs B. 2020. Reducing atmosphere packaging as a novel alternative technique for extending shelf life of fresh cheese. *Journal of Food Science and Technology*, 1-11.

Alwazeer D. 2018. Kuru gıdaların rengini muhafaza etmeye yönelik yeni bir teknik: indirgen atmosferik kurutma. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 8(4): 125-131.

Alwazeer D. 2019. Reducing atmosphere packaging technique for extending the shelf-life of food products. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(4): 2117-2123.

Alwazeer D. 2020. Importance of consideration of oxidoreduction potential as a critical quality parameter in food industries. *Food Research International*, 132, 109108.

Amikam G, Nativ P, Gendel Y. 2018. Chlorine-free alkaline seawater electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(13): 6504-6514.

Anonim 2019. Hidrojen Nedir? Nerelerde Kullanılır? <https://www.enerjiportali.com/hidrojen-nedir-nerelerde-kullanilir>

Babae Z, Nikoopour H, Safafar H. 2007. A comparison of commercial nickel catalysts effects on hydrogenation of soybean oil. *World Applied Sciences Journal*. 2(6): 621-626.

Bernardi C, Chiesa LM, Soncin S, Passerò E, Biondi PA. 2008. Determination of carbon monoxide in tuna by gas chromatography with micro-thermal conductivity detector. *Journal of Chromatographic Science*, 46(5): 392-394.

Bulut M, Çelebi Sezer Y, Ceylan MM, Alwazeer D. 2022. Hydrogen-rich water can reduce the formation of biogenic amines in butter. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132613>.

Bulut M, Sezer YÇ, Ceylan,MM, Alwazeer D, Koyuncu M. 2022. Hydrogen-rich water can reduce the formation of biogenic amines in butter. *Food Chemistry*, 132613

Cachon R, Jeanson S, Aldarf M, Divies C. 2002. Characterisation of lactic starters based on acidification and reduction activities. *Le Lait*, 82(3): 281-288.

Ceylan MM, Bulut M, Alwazeer D, Koyuncu M. 2022. Evaluation of the Impact of Hydrogen-Rich Water on the Quality Attribute Notes of Butter. *Journal of Dairy Research*, Under revision.

Chen X, Zuo Q, Hai Y, Sun XJ. 2011. Lactulose: an indirect antioxidant ameliorating inflammatory bowel disease by increasing hydrogen production. *Medical Hypotheses*. 76(3): 325-327.

CHFCA. 2019. The canadian hydrogen and fuel cell association. <http://www.chfca.ca>.

Çizmeçi M, Musavi A, Kayahan M, Tekin A. 2005. Monitoring of hydrogenation with various catalyst ratios. *Journal of the American Oil Chemist's Society*. 82(12): 925-929.

Dao S. 2016. Atık şeftali posasından karanlık fermentasyon ile hidrojen gazı üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Deniz M. 2006. Glukagon benzeri peptid-2 (GLP-2)'nin ince bağırsak kan akımı ve iskemi-reperfüzyon hasarı üzerindeki etkisi. Marmara Üniversitesi. Türkiye.

Ebel B, Martin F, Le L, Gervais P, Cachon R. 2011. Use of gases to improve survival of *Bifidobacterium bifidum* by modifying redox potential in fermented milk. *Journal of Dairy Science*, 94(5): 2185-2191.

Farahani H. 2017. Effect of drinking hydrogen rich water produced by "Alkaline Stick" for Skin care. Science and Engineering in the Technology Era. International Conference. Avusturya.

Fujita K, Seike T, Yutsudo N, Ohno M, Yamada H, Yamaguchi H, Sakumi K, Yamakawa Y, Kido MA, Takaki A. 2009. Hydrogen in drinking water reduces dopaminergic neuronal loss in the 1-methyl-4-phenyl-1, 2, 3, 6-tetrahydropyridine mouse model of Parkinson's disease. *PloS One*, 4(9): e7247.

- Ge L, Yang M, Yang NN, Yin XX, Song WG. 2017. Molecular hydrogen: a preventive and therapeutic medical gas for various diseases. *Oncotarget*, 8(60): 102653.
- Giroux HJ, St-Amant JB, Fustier P, Chapuzet JM, Britten M. 2008. Effect of electroreduction and heat treatments on oxidative degradation of a dairy beverage enriched with polyunsaturated fatty acids. *Food Research International*, 41(2): 145-153.
- Guido LF. 2016. Sulfites in beer: reviewing regulation, analysis and role. *Scientia Agricola*, 73(2): 189-197.
- Hong Y, Chen S, Zhang J. 2010. Hydrogen as a selective antioxidant: a review of clinical and experimental studies. *Journal of International Medical Research*, 38(6): 1893-1903.
- Hu H, Zhao S, Li P, Shen W. 2018. Hydrogen gas prolongs the shelf life of kiwifruit by decreasing ethylene biosynthesis. *Postharvest Biology and Technology*, 135: 123-130.
- Huang CS, Kawamura T, Toyoda Y, Nakao A. 2010. Recent advances in hydrogen research as a therapeutic medical gas. *Free Radic Res*, 44(9): 971-982. <https://doi.org/10.3109/10715762.2010.500328>
- Johnson JA, Herwig F, Beers TC, Christlieb N. 2005. Nitrogen in the early Universe. *Nuclear Physics A*, 758: 221-224.
- Kawamura T, Higashida K, Muraoka I. 2020. Application of molecular hydrogen as a novel antioxidant in sports science. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020.
- Köktürk M, Atalar MN, Odunkiran A, Bulut M, Alwazeer D. 2022. Evaluation of the hydrogen-rich water alleviation -potential on mercury toxicity in earthworms using ATR FTIR and LC-ESI-MS/MS spectroscopy. *Environmental Science and Pollution Research*, (13)29: 19642-19656.
- Köktürk M, Yıldırım S, Eser G, Bulut M, Alwazeer D. 2021. Hydrogen-rich water alleviates the nickel-induced toxic responses (inflammatory responses, oxidative stress, DNA damage) and ameliorates cocoon production in earthworm. *Biological Trace Element Research*, 1-11
- Lapin A, Kalayda A, Filippov S, Zelenkov V. 2019. Biochemical effects of molecular hydrogen in aqueous systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*,
- LeBaron TW, Kharman J, McCullough ML. 2021. An H₂-infused, nitric oxide-producing functional beverage as a neuroprotective agent for TBIs and concussions. *Journal of Integrative Neuroscience*, 20(3): 667-676.
- Liu S, Sun Q, Tao H, Sun X. 2010. Oral administration of mannitol may be an effective treatment for ischemia-reperfusion injury. *Medical Hypotheses*, 75(6): 620-622.
- Liu W, Sun X, Ohta S. 2015. Hydrogen Element and Hydrogen Gas. In *Hydrogen Molecular Biology and Medicine*. pp. 1-23. Springer.
- Majou D. 2019. Introduction: Modified atmosphere packaging and processing; a technology of the future for sustainable food preservation. In *Gases in Agro-Food Processes*. pp. 3-4. Elsevier.
- Martin F, Cayot N, Vergoignan C, Journaux L, Gervais P, Cachon R. 2010. Impact of oxidoreduction potential and of gas bubbling on rheological properties of non-fat yoghurt. *Food Research International*, 43(1): 218-223.
- MHI. 2019. Hydrogen: An Emerging Medical Gas. <http://www.molecularhydrogeninstitute.com/hydrogen-an-emerging-medical-gas>
- Nakao A, Toyoda Y, Sharma P, Evans M, Guthrie N. 2010. Effectiveness of hydrogen rich water on antioxidant status of subjects with potential metabolic syndrome-an open label pilot study. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 46(2): 140-149.
- Ohsawa I, Ishikawa M, Takahashi K, Watanabe M, Nishimaki K, Yamagata K, Katsura Ki, Katayama Y, Asoh S, Ohta S. 2007. Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals. *Nature Medicine*, 13(6): 688-694.
- Ohta S. 2011. Recent progress toward hydrogen medicine: potential of molecular hydrogen for preventive and therapeutic applications. *Curr Pharm Des*, 17(22): 2241-2252.
- Ohta S. 2012. Molecular hydrogen is a novel antioxidant to efficiently reduce oxidative stress with potential for the improvement of mitochondrial diseases. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1820(5): 586-594.
- Ohta S. 2015. Molecular hydrogen as a novel antioxidant: overview of the advantages of hydrogen for medical applications. *Methods in Enzymology*, 555: 289-317.
- Örs B. 2019. Sağlıklı ve cazip kuru kayısı üretimine yönelik yeni bir teknik: indirgen atmosferik kurutma. Yüksek Lisans Tezi, Iğdır Üniversitesi. Iğdır.
- Özkan N. 2019. Yeni bir depolama yöntemi olan indirgen atmosferde paketlemenin (İAP) çilek meyvesinin kimyasal ve fiziksel kalitesi üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Iğdır Üniversitesi. Iğdır.
- Pant K, Gupta RB. 2008. Fundamentals and use of hydrogen as a fuel. In *Hydrogen Fuel*. pp. 15-44. CRC Press.
- Pintauro P, Gil MP, Warner K, List G, Neff W. 2005. Electrochemical hydrogenation of soybean oil with hydrogen gas. *Industrial and engineering chemistry research*, 44(16): 6188-6195.
- Qian L, Shen J, Sun X. 2015. Methods of hydrogen application. In *Hydrogen Molecular Biology and Medicine*. pp. 99-107. Springer.
- Ryu J, Kim MJ, Lee J. 2019. Extraction of green tea phenolics using water bubbled with gases. *Journal of Food Science*, 84(6): 1308-1314.
- Santos DM, Sequeira CA, Figueiredo JL. 2013. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. *Química Nova*, 36: 1176-1193.
- Sezer YÇ, Bulut M, Boran G, Alwazeer D. 2022. The effects of hydrogen incorporation in modified atmosphere packaging on the formation of biogenic amines in cold stored rainbow trout and horse mackerel. *Journal of Food Composition and Analysis*, 112, 104688. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104688>.
- Shirahata S, Hamasaki T, Teruya K. 2012. Advanced research on the health benefit of reduced water. *Trends in Food Science and Technology*, 23(2): 124-131.
- Sim M, Kim CS, Shon WJ, Lee YK, Choi EY, Shin DM. 2020. Hydrogen-rich water reduces inflammatory responses and prevents apoptosis of peripheral blood cells in healthy adults: a randomized, double-blind, controlled trial. *Scientific Reports*, 10(1): 1-10.
- Sun X, Ohta S, Nakao A. 2015. *Hydrogen molecular biology and medicine*. Springer.
- Zhu Y, Liao W, Niu L, Wang M, Ma Z. 2016. Nitric oxide is involved in hydrogen gas-induced cell cycle activation during adventitious root formation in cucumber. *BMC Plant Biology*, 16(1): 1-13.