



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Pişmiş Brokoli ve Karnabahar İçin Vakum Soğutma Enerji Analizi

Hande MUTLU ÖZTÜRK ^{a,*}, Harun Kemal ÖZTÜRK ^b

^a *Turizm ve Gastronomi Bölümü, Turizm Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, TÜRKİYE*

^b *Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, TÜRKİYE*

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: hmozturk@pau.edu.tr

ÖZET

Vakum soğutma özellikle gözenekli yapı ve yüzey alanının ağırlığına göre büyük olan gıda ürünlerinin soğutulmasında kullanılabilecek hızlı bir soğutma yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Bu soğutma yöntemi kullanılarak; mantar, marul, ıspanak, brokoli gibi yapraksı sebzeler, ekmekek ve kurabiye gibi fırın ürünleri, balık ve et gibi pişirilmiş ürünler soğutulabilmektedir. Vakum soğutma hızlı bir soğutma sağladığı gibi, ürünün raf ömrünü artırmakta ve ürün kalitesinde olumlu katkılar sağlamaktadır. Bu çalışmada, pişirilmiş brokoli ve karnabaharın soğutulması için vakum soğutma tekniğini uygulanmıştır. Vakum soğutmadan elde edilen sonuçlar ile geleneksel soğutmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada pişmiş brokoli ve karnabahar için vakum soğutma enerjisi analizi çalışılmıştır. Çalışmanın sonunda, pişmiş brokoli ve karnabaharın vakum soğutma yöntemi ile geleneksel soğutmaya göre çok hızlı bir şekilde soğutulduğu görülmüştür. Haşlanmış brokoli ve karnabahar vakum soğutma ile sırası ile 21 ve 12 dakika içerisinde 5 °C sıcaklığa soğurken, bu süre buzdolabında soğutmada brokoli ve karnabahar için 92 dakika ve 133 dakikayı bulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Vakumlu soğutma, pişmiş brokoli ve karnabahar, konvansiyonel soğutma, vakum odası, basınç, sıcaklık*

Vacuum Cooling Energy Analysis for Baked Broccoli and Cauliflower

ABSTRACT

Vacuum cooling stands out as a rapid cooling method which can be used for cooling of food products which are larger weight of porous structure due to the surface area. Using this cooling method; leafy vegetables such as mushrooms, lettuce, spinach, broccoli, bakery products such as bread and cookies, fish and meat cooked products can be cooled. Vacuum cooling provides rapid cooling and increases the shelf life of the product and makes a positive contribution to product quality. In this study, vacuum cooling technique was applied for cooling cooked broccoli and cauliflower. The results obtained from vacuum cooling and the results obtained from conventional cooling were compared. In this study, energy analysis of vacuum cooling for cooked broccoli and cauliflower was studied. This study shows that the cooked broccoli and cauliflower can be cooled very rapidly using the vacuum cooling method.

Keywords: *Vacuum cooling, cooked broccoli and cauliflower, conventional cooling, vacuum chamber, pressure, temperature*

I. GİRİŞ

Günümüzde gıdaların muhafazası için temelde fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere çok çeşitli soğutma yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar kurutma, koruyucu katkı maddeleri, soğutma ve konserve yapma vb. uygulamalardır. Bu yöntemlerin kullanılmasıyla gıdaların muhafazası sağlanabildiği gibi yeni gıda ürünleri de elde edilebilmektedir.

Gıdalar muhafaza edilirken bakteri üremesinin ve çoğalmasının engellenmesi amaçlanmaktadır. Soğutma ile ürünlerin raf ömürlerinin artırılması amaçlanır. Günümüzde kullanılan farklı soğutma teknikleri bulunmaktadır. Her soğutma yönteminin avantajı olduğu kadar dezavantajları da vardır. Geleneksel soğutma yöntemi günümüzde en yaygın kullanılan soğutma yöntemi olmakla birlikte, yeni soğutma yöntemlerinin geliştirilmesi için de çalışmalar yapılmaktadır. Vakum soğutma yöntemi de üzerinde çalışılan yöntemlerden birisi olarak ön plana çıkmaktadır.

Vakum soğutma, ürün içerisindeki serbest su olarak adlandırılan suyun buharlaştırılması ile ürünün soğumasını sağlayan bir soğutma tekniği olarak bilinmektedir. Vakum soğutma bu nedenle kütlesine göre yüzey alanı büyük ve içerisinde suyun kolayca buharlaşabileceği (serbest su oranı yüksek) ürünler için uygulanabilmektedir. Vakum soğutmanın en büyük avantajı ürün içerisindeki su buharlaşırken ürün soğuduğu için, ürünün çok hızlı bir şekilde soğutulmasını sağlamak olarak bilinmektedir. Vakum soğutma ürün içerisinde buharlaşma nedeni ile ürünün kalitesinin ve yapısının değişmediği gıda ürünleri için uygulanmaktadır.

Toplanma sonrasında vakum soğutma uygulanan sebzelerin daha uzun süre bozulmadığı ve saklanabildiği görülmüştür [1].

Soğutma çok hızlı bir şekilde gerçekleştiği için de ürün içerisinde mikrobiyal gelişmeler yavaşlamakta bu nedenle de ürünün raf ömrü artmaktadır. Geleneksel soğutma yöntemleriyle karşılaştırıldığında, vakum soğutma mantar soğutma süresini önemli ölçüde azaltabilir ve mikrobiyal büyüme oranını düşürebilir [2].

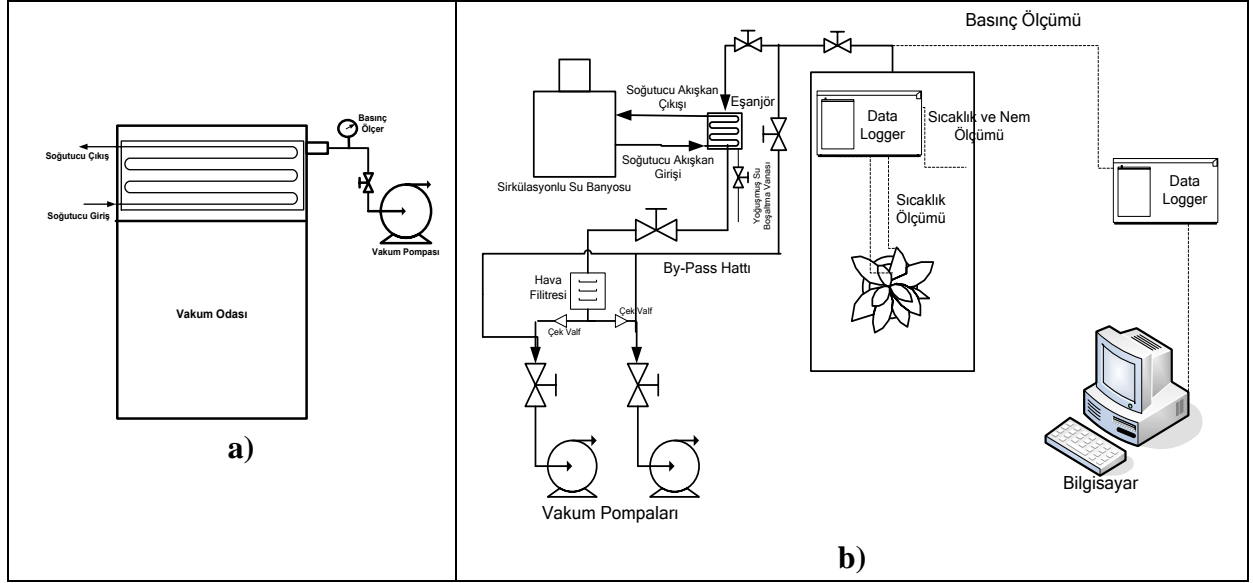
Vakum soğutucuların genel olarak 3 temel elemanı vardır (Şekil 1a). Bunalar;

- Vakum odası,
- Vakum pompası
- Yoğuşturucu

Vakum odası, yiyeceklerin soğutulması işlemi sırasında, yiyeceklerin konulduğu yerdir ve sızdırmaz olmalıdır. Vakum pompaları ile vakum oluşturulması amaçlanmaktadır. Yoğuşturucular ise, vakum odasından gelen hava içindeki nemin yoğuşturulmasında kullanılır ve kullanılması zorunlu değildir.

Deneylerin gerçekleştirilmesinde kullanılan vakum soğutma düzeneği (Şekil 1b), esas itibariyle vakumlu bir etüv (MEMMERT VO-200, Schwabach, Almanya) ile vakum pompalarından (ULVAC GVD-050A Yokohama City, Kanagawa, Japonya ve Edwards, Model RV8 New Jersey, ABD) oluşmaktadır. Vakum odası vakum ürünlerin içerisinde soğutulduğu ve vakumun oluşturulması için kullanılmıştır. Ürünler sızdırmazlığı iyi bir şekilde sağlanan bu odada vakuma tabi tutulmuştur. Bu amaçla kullanılan vakumlu etüv; 29 litre iç hacme sahip, dijital göstergeli, mikroprosesör kontrollü, paslanmaz çelik, basınç göstergesi dijital olarak ayarlanabilen ve iç kısmının gözlenebilmesi için ön panelde cam bir kısım bulunan bir etüvdür. Soğutucu olarak sirkülasyonlu su banyosu

(POLYSCIENCE 9506, Niles, Illinois, ABD) kullanılmıştır. Verilerin toplanması için Data Logger (TESTO 350-XL-450, Lenzkirch, Almanya) kullanılmıştır.



Şekil 1. Vakum soğutma sistemi ve projede kullanılan sistemin şematik gösterimi

Vakum soğutma ile tarla bitkileri soğutulduğu gibi, pişirilmiş ürünler de soğutulabilmektedir. Meyve ve sebzelerin ön soğutma işlemi için büyük soğutma kapasitesine sahip geniş odalara ihtiyaç duyulmaktadır. Meyve ve sebzelerin ön soğutması sulu soğutma, vakum soğutma, üfleli soğutma ve plakalı soğutma gibi farklı yöntemlerle gerçekleştirilir. Raf ömrünün artırılması amacı ile son zamanlarda sebzelerin vakum soğutma yöntemi ile soğutulması konusunda yapılan çalışmalarda belirgin bir artış olmuştur. Yapraksı sebzelerin ön soğutulmasında vakum soğutma tekniği kullanılabilir. Hsueh ve Cheng [3] yapraksı bir sebze olan lahananın vakum altında soğutulmasını incelemişler ve vakumun kademeli uygulaması yöntemini ortaya koymuşlardır.

He ve Diğ. [4], Rennie [5], Öztürk ve Öztürk [6], Tambunan ve Diğ. [7], Martinez ve Artes [8] yaptıkları çalışmalarda ön soğutma olarak vakum soğutmanın marulda uygulanmasını incelemişlerdir. Yapılan çalışmalarda sıcaklık değişimi ve kütle kaybı, marulun niteliklerindeki değişim üzerinde vakum oranının etkilerini ve soğutma karakteristikleri incelenmiştir. Vakum hızı ve ürün soğutma yükü arasındaki ilişki geliştirilerek deneysel olarak incelenmiştir.

Mantar da vakum soğutmanın araştırıldığı sebzeler arasında yer almaktadır. Vakum soğutma gözenekli ve nemli gıdaların hızlı soğutulmasında kullanılan bir yöntemdir. Vakum altında gıdadan uçurulan su için gerekli enerji gıdadan alınır ve bu olay kendinin gıdanın ısısında azalma şeklinde gösterir. Ağırlık kaybı vakum soğutmanın önemli bir görünse de bu dezavantaj gıdaya vakum işlemi öncesinde su ilavesiyle azaltılabilir. Marul, çilek, brokoli ve mantar gibi meyve ve sebzelerin hasat sonrasında bozulmalarını geciktirmek ve raf ömürlerini artırmak amacıyla başarılı bir şekilde kullanılmıştır ([9], [10]).

Brokoli, lahanaya benzer (Brassicaceae spp.) besleyici ve içeriğinde bulunan bazı fitokimyasallar nedeni ile sağlık açısından yararlı, çiğ tüketilebilen ve haşlanmış olarak da yenebilen bir sebzedir. Kanser hastalarının iyileşmesinde yararlı olduğu düşünüldüğünden önemi artmıştır [11]. Karnabahar ise; turpgillerden, çiçekleri tanecikli bir görünüme sahip, yaprakları lahana yaprağına benzer, sebze

olarak kullanımı olan bir bitkidir. Ülkemizde brokoli ve karnabahar Ege ve Marmara Bölgelerinde yaygın olarak üretilmekte taze olarak tüketilebildiği gibi konserve veya dondurulmuş olarak tüketilebilmektedir. Brokolinin dondurulmuş gıda sanayinde en çok kullanılan sebzeler arasında ilk sırada yer aldığı bildirilmektedir [12].

Gıda sektörü gelişen teknolojiyle beraber topluma tüketime hazır ürünler sunmak amacıyla yeni uygulamalar arayışına girmiştir. Gıda işleme teknikleri, gıda muhafazasında kullanılan en önemli yöntem olarak bilinmektedir. Bu yöntem kullanılarak gıda maddelerinin raf ömrü uzatılabilmektedir; renk, tekstür ve lezzet gibi kalite özelliklerini kullanabilmektedir. Gıdaları taze ve güvenli tutulabilmek gıda muhafazasının temel amacıdır, böylece gıdanın kalitesi ve besinsel özellikleri korunabilmektedir [13]. Sebzelerin daha uzun süre tazeliğini muhafaza etmesi amacıyla, raf ömrünü artıran uygulamalar ve teknolojiler ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Bu uygulamalardan biri de ürünlere ön soğutma olarak vakum soğutma uygulaması yapılmasıdır.

Vakum soğutma gıdaların soğutulmasında özellikle ön soğutma olarak son yıllarda uygulanan bir soğutma yöntemidir. Sebzelerin soğutulmasında kullanıldığı gibi, son yıllarda pişirilmiş sebzeler ve et ürünleri için de kullanımı yaygınlaşmaktadır. Vakum soğutma sisteminin temeli gıda içerisinde bulunan suyun buharlaştırılmasına dayanır ve daha çok yüzey alanı ağırlığına göre fazla olan ürünlere uygulanmaktadır [14]. Vakum soğutma hızlı soğutma tekniği olarak da bilinmektedir. Diğer yandan, bu yöntemin çok sayıda gıda ürünü için uygulanamaması, yaygınlaşmamasının da nedeni sayılabilir.

Alibaş ve Okursoy [15] yaptıkları çalışmada ıspanağın hava, vakum, su ve basınçlı suyla ön soğutulmasındaki kalite ve işletim parametrelerinin belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda kullanılan 4 farklı ön soğutma yöntemi içerisinde en kısa ve enerji tüketiminin ise en düşük olduğu soğutma yöntemi vakum soğutma olarak tespit edilmiştir.

Vakum soğutma konusundaki çalışmalar özellikle sebzelerin raf ömürlerinin artırılabilmesi konusunda yoğunlaşmıştır. Vsueh ve Cheng [3] yapraklı yapıya sahip olan lahananın vakumda altında soğutulabilmesine odaklanmış ve lahana gibi sebzelerde de vakumun kademeli uygulanabilmesinin yöntemi üzerinde çalışmıştır. Burada amaç, yapraklarda donmanın oluşmaması ve su kaybının minimize edilmesidir. Ayrıca çalışmada vakum odası basıncının 8 mbar'ın altına düşürülmemesi konusu da vurgulanmıştır.

He ve Diğ. [4], "iceberg" marulların soğutulabilmesi ve saklanmasında, vakumlu basıncının düşürülme oranının etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışma ile, atmosferik basınç değerinden 600 Pa basınç değerine, 15, 30 ve 60 dakika sürelerde inmişler, ve sonrasında soğutulmuş marullar 1°C sıcaklığında ve %85 bağıl nemdeki bir ortamda iki hafta gibi bir süre depolanmıştır. Basıncın hızlı veya yavaş düşürülmesinin etkisinin belirlenmesi amacı ile yürütülen bu deneyde, orta düzeyde (30 dak) basınç düşürme oranı ile soğutulan ürünler mikroskop altında incelenmiştir. Mikro, ultra yapıları, fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından en optimum sonuçların orta basınç düşürme oranında alınabildiği belirtilmiştir.

Meyve ve sebzelerin ön soğutma işlemi için büyük soğutma kapasitesine sahip geniş odalara ihtiyaç duyulmaktadır. Meyve ve sebzelerin ön soğutması sulu soğutma, vakum soğutma, üfleli soğutma ve plakalı soğutma gibi farklı yöntemlerle gerçekleştirilir. Sulu soğutma ya soğuk su püskürterek ya da soğuk su içine batırmak suretiyle gerçekleştirilir. Çapraz kontaminasyon ihtimali yüksek olan bu soğutma türü, ürün üzerine fizyolojik zararlar verebilmektedir. Kuşkonmaz ve brokoli gibi ürünler için

yarı-soğuma zamanı (ürün sıcaklığı ile ortam sıcaklığını yarısı) birkaç dakika iken mısır koçanı için yaklaşık yarım saat, lahana için bir saatten fazla olabilmektedir.

Yapraksı sebzelerin ön soğutulmasında vakum soğutma tekniği kullanılabilir. Bu teknik lahana gibi sebzelere uygulandığında dikkat edilmesi gerekir çünkü lahananın iç kısımlarının soğuması yetersiz olabilmektedir. Cheng ve Hsueh [3] yaptıkları çalışmada çok aşamalı vakum koruma işlemiyle lahananın yüzey ve merkez sıcaklığını azaltmayı denemişlerdir. Vakum ortamın atmosferik ortama geri dönüşü sırasında da, atmosferik havanın sıcaklığının yüksek olması nedeniyle, soğutulan ürünün sıcaklığında artışın meydana geldiğini gözlemişlerdir. Bunu engellemek için kondansatör yardımıyla dış havanın soğutulmasını sağlamışlar ve dış hava sıcaklığı ile kondansatör sıcaklığını sırasıyla 23 ve -37°C olarak rapor etmişlerdir. Çok aşamalı vakum soğutma işlemi ise, vakumu 13.3mbar'da 600 saniye, 10.7mbar'da 600 saniye, 8mbar'da 600 saniye tutmak suretiyle gerçekleştirmişlerdir. Bir diğer işlem olarak ise vakum basıncını 600'er saniye 10.7, 8.0 ve 5.3 mbar'a ayarlamışlardır. Kontrol olarak da 8mbar'lık vakumda 1800 saniyelik işlemi kullanmışlardır. Düşük basınçlı çok aşamalı vakum soğutma tavsiye edilmemiş olup, 5.3mbar'lık bir vakumun lahana yüzeyinde buzlanmaya neden olduğu rapor edilmiştir. Lahana ve ıspanakların vakum altında soğutulmasında 8mbar üzerinde çok aşamalı bir vakum soğutmayı önermişlerdir.

Zhang ve Sun [10] pişirilmiş brokoli ve havuç dilimlerini vakum, üfleme, soğuk odada ve plakalı soğutma yöntemlerinin kullanarak soğutmuşlardır. Vakum soğutmada havuçlar için 540 Pa, brokoli için 470Pa basınçlar kullanılmıştır. Üfleme soğutma ise yaklaşık 3°C 'de sıcaklıkta, 1.92 m/s hızda ve %90 bağıl nemde olan havanın 1°C 'ye ayarlanmış bir odada gerçekleştirilmiştir. Soğuk oda olarak ise $2.5\pm 2.6^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta bir buzdolabı, plakalı soğutucu olarak ise $-10\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'ye ayarlanmış plakalar kullanılmıştır. Bu üç soğutma yönteminin soğutma verimlilikleri ile sebzelerin soğutma sonrasındaki (tekstür, renk, toplam canlı sayısı, nem, karoten içeriği ve C vitamini gibi) kaliteleri karşılaştırılmıştır. Bahsi geçen dört soğutma yönteminden en etkili olanının vakum soğutma olduğu belirtilmiştir. Vakum soğutmada 65°C sıcaklıktaki brokolileri 4°C 'ye getirmek için gereken süre yaklaşık olarak 12 dakika iken bu süre üfleme, soğuk oda ve plakalı soğutmada sırasıyla 44, 212 ve 244 dakika olarak bulunmuştur. Havuç dilimlerinin sıcaklıklarını 70°C 'den 4°C 'ye getirmek için gereken süre vakum soğutmada 7.8 dakika olurken, üfleme, soğuk oda ve plakalı soğutmada sırasıyla 44, 193 ve 216 dakika bulunmuştur. Vakum soğutma sırasında ağırlık kaybının sebzelerin üzerine su püskürterek azaltılabileceği ve diğer üç soğutma yöntemiyle kıyaslandığında vakum soğutmanın sebzelerin kalitesi üzerine olumsuz bir etkisinin olmadığı ortaya konmuştur.

Chambroy ve Flanz. [16] yaptıkları çalışmada Cantaloup türü kavunlarının muhafazasında ön soğutma yöntemi olarak vakum soğutma kullanımını değerlendirmişlerdir. Ön soğutma olarak vakum uygulamasının genellikle etilen konsantrasyonunu düşürdüğü ancak nispeten olgun meyvelerin olgunlaşmasını yavaşlatmadığını tespit etmişler, kavun sıcaklığının, vakum ön soğutma ile yavaşça (30 dakika içinde 1-3 derece) düştüğünü belirtmişlerdir.

II. ENERJİ ANALİZİ

Gıda endüstrisi, özellikle de gıdaların soğutulması, büyük bir enerji tüketiminin olduğu sektörler içerisinde yer almaktadır. Yüksek enerji tüketiminin olması, gıda soğutma endüstrisini yeni soğutma sistemleri ve düşük enerji tüketimi ile soğutma yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Vakumlu soğutma yöntemi hızlı olması, daha kısa işleme süreleri, geliştirilmiş ürün raf ömrü,

güvenlik ve kalite gibi birçok avantajının yanısıra enerji tüketiminin düşük olması nedeni ile de ön plana çıkmaktadır [17].

Thompson ve Chen [18] yaptıkları çalışmada vakum soğutma, soğuk suya daldırma soğutma, su püskürterek vakum soğutma ve hava üfleli soğutma yöntemlerini enerji verimlilikleri açısından incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda vakum soğutmanın bu yöntemler içerisinde en enerji verimli yöntem olduğu ortaya konulmuştur.

Diğer sistemlerdeki enerji tüketimleri vakum soğutma ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Hava üfleli sistemlerde, enerji/elektrik enerji oranı 2.65 olurken, vakum soğutmada bu oran 0.52 olmaktadır. Diğer bir deyişle, vakum soğutma, hava üfleli soğutma yöntemi ile kıyaslanırsa, enerji tüketimi yaklaşık 5 kat daha azdır [14].

Üründen uzaklaştırılan ısının değeri, su buharının gizli ısısı kadardır. %90'dan daha fazla su içeren, marul, mantar, kıvrıcık gibi sebzelerde su içeriğindeki %1 oranında olan her azalma, yaklaşık olarak 5.5 ile 6.0 °C gibi sıcaklık değişimi oluşturmaktadır. Her ne kadar vakum soğutma kullanılarak ürünler dondurulabilse de, dondurulmama işlemi pek tercih edilmemektedir, çünkü hücrelerde buz kristalinin meydana gelmesi ürünün yapısının bozulmasına sebebiyet vermektedir [14].

A. BROKOLİ İÇİN ENERJİ ANALİZİ

TEORİK YAKLAŞIM

Bu bölümde termodinamik prensiplere dayanan vakum soğutma işleminin basit bir teorik analizi sunulmaktadır. Bu analiz, vakum soğutma işlemi sırasında gözlemlenen sıcaklık düşüşüne dayanan kütle kaybı ile sınırlıdır. Herhangi bir sebze için Ortalama Spesifik Isı (C_{ort}) aşağıdaki ifadeyle hesaplanabilir:

$$C_{ort}=3349a+837,36 \text{ (J/kgK)} \quad 1$$

Burada a gıda ürününün su içeriğidir. Brokolinin su içeriği yaklaşık %89 dir. Dolayısı ile

$$C_{brokoli}=3817,97 \text{ J/kgK dir} \quad 2$$

1 kg kütlesindeki 95 °C sıcaklıktaki brokolinin 5 °C indirmek için gerekli olan ısı:

$$Q = m_{brokoli} C_{brokoli} \Delta T_{brokoli} \quad 3$$

$$Q=1 \times 3140 \times 90 = 343617,3 \text{ J/kg} = 343,62 \text{ kJ/kg}$$

Bu bölümde konvansiyonel ve vakumlu soğutma sisteminin enerji analizi yapılacaktır. Hem vakum soğutması hem de geleneksel soğutma sistemi sıcaklığı için pişmiş brokolinin sıcaklığı yaklaşık 95 °C (pişirme sıcaklığı) 5 °C'ye (depolama sıcaklığı) düşürülür.

B. GELENEKSEL SOĞUTMA SİSTEMİNİN ENERJİ ANALİZİ

Geleneksel soğutma sistemi için, pişirilmiş brokoli izole ve soğutulmuş bir alana yerleştirildiği düşünülmektedir. Soğutulan alan 5 °C ve 95 °C de pişirilmiş brokoli buzdolabına yerleştirilir. Sıcak brokoliden çıkan ısının 95 °C'den 5 °C'ye soğuması için akış denklemi kullanılabilir:

$$Q_L = m_{hava} C_v \Delta T_{hava} + m_{brokoli} C_{brokoli} \Delta T_{brokoli} \quad 4$$

Buzdolabının sıcaklığı 5 ° C'de düşünülduğünde, denklemin sağ tarafındaki ilk terim ihmal edilebilir ve bu durumda buzdolabından ayrılmak için ısı miktarı gerekir.

$$Q_L = m_{brokoli} C_{brokoli} \Delta T_{brokoli} \quad 5$$

Denklemden (5), 95 kg'dan 5 ° C'ye kadar 1 kg'lık brokoli soğutmak için, brokoliden çıkan ısının çıkarılması;

$$Q_L = 343,62 \text{ kJ/kg}$$

Süreç tersinir kabul edilirse ve döngü Carnot buzdolabı olarak kabul edilirse, girdi çalışması

$$W = Q_H - Q_L \quad 6$$

Carnot döngüsü için, Q_H aşağıdaki denklemden hesaplanabilir;

$$Q_H = Q_L \frac{T_H}{T_L} = 343,62 \frac{298}{278} = 368,33 \text{ kJ/kg} \quad 7$$

Buzdolabının sıcaklığı 5 ° C ve ortam sıcaklığı 25 ° C olduğu için;

$$W = 368,33 - 343,62 = 24,71 \text{ kJ/kg}$$

C. VAKUM SOĞUTMA SİSTEMİNİN ENERJİ ANALİZİ

Daha önce ifade edildiği gibi, vakum soğutması için, soğutma alanının basıncı azaltılmalıdır. Vakum soğutması için, basınç, sabit basınçta atmosferik basınçtan vakum basıncına düşmüştür. Bu durumda, tersine çevrilebilir çalışma;

$$W_{rev} = V \cdot \Delta P \quad 8$$

Vakum odası hacmi 29 l (0.029 m³) olarak alınır ve atmosfer basıncı 101.3 kPa olarak kabul edilirse,

$$W_{rev} = 0,029 \cdot 101,3 = 2,93 \text{ kJ/kg}$$

Vakum soğutmanın, bu örnek için geleneksel soğutma sisteminden 7 kat daha az enerji tükettiği kolayca görülebilir. Ayrıca, geleneksel soğutma sistemlerinin enerji tüketiminin, ürünlerin ağırlığı ile doğrusal olarak arttığı da belirtilmelidir. Bununla birlikte, enerji tüketimi, ürünün miktarı ile vakum soğutması için değişmez.

III. HAŞLANMIŞ BROKOLİNİN SOĞUTULMASI

Brokoli, karnabahara benzeyen yeşil renkte, yuvarlakımsı bir sebzedir. Brokoli son yıllarda ülkemizde sıklıkla tüketilmeye başlayan bir sebzedir. Brokoli içeriği göz önüne alındığında insan sağlığına yararlı olduğu bilinmektedir. Sebze olarak Brokoli; A, C ve E vitaminleri açısından çok zengindir. İçerisinde bulunan flavonoidler bağışıklık sistemini güçlendirir. Brokoli antibiyotik özelliğine sahiptir. Brokolinin ülkemizde sık kullanılan bir sebze haline gelmesi, insanlarda sadece yetiştiği mevsimde

değil, tüm yıl boyu kullanılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda vakum altında, buzdolabında ve derin dondurucuda soğutulma parametreleri incelendi.

A. HAŞLANMIŞ BROKOLİNİN VAKUM ALTINDA SOĞUTULMASI

Brokoli, vakum soğutulma yöntemi ile 7 mbar basınç altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler gerçekleştirilirken iki pompa kullanılmıştır. Brokoli soğutulurken gerçekleştirilirken deneylerde merkez, yüzey ve ortam sıcaklıklar ölçülerek grafiklerde verilmiştir. Brokolide merkez sıcaklığı brokoli sebzesinin çapı belirlenmiş ve prob merkeze gelecek şekilde dik olarak batırılarak ölçülmüştür. Ayrıca basınç ve bağıl nem değişimleri de grafiklerde gösterilmiştir.

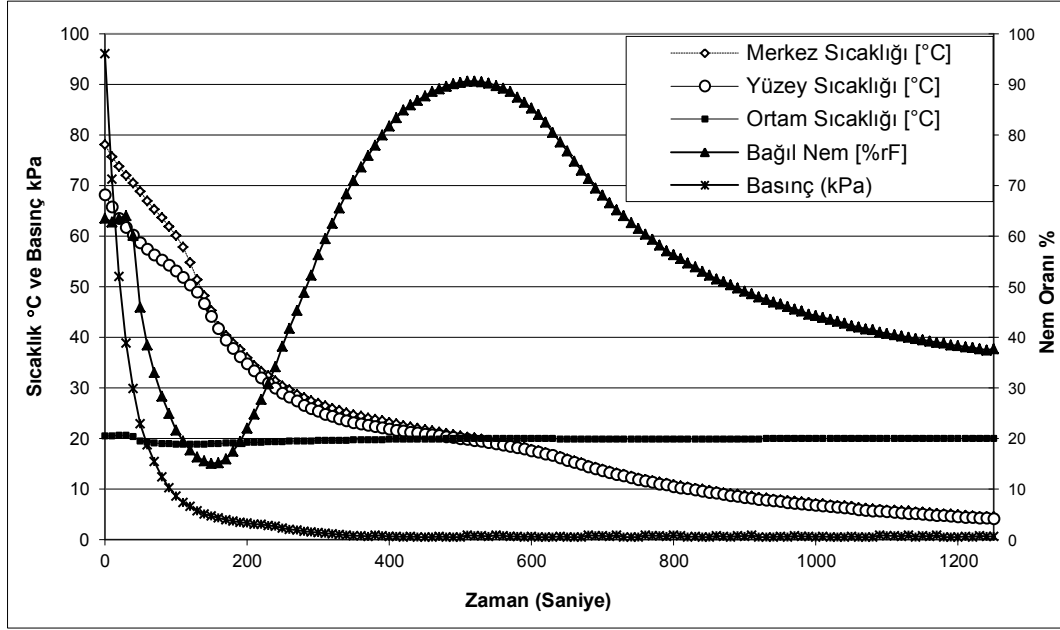
İlk deneyde ortam basıncı iki pompa çalıştırılarak 7 mbar'a getirilmiş, vakum pompası bu basınçta çalışır durumdayken deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.'de görüldüğü gibi, merkez ve yüzey sıcaklığı hızla düşmüştür. 250 saniye (yaklaşık 4 dakika) sonra merkez ve yüzey sıcaklıklarının her ikisi de eşit değere (5°C) gelmiştir. Bu değerden sonra her ikisi de birlikte düşmeye devam etmiş ve 1300 saniye civarında merkez ve yüzey sıcaklıkları sırası ile 6°C ve 5°C değerlerine gelmiştir. Basınç değeri ise diğer bütün deneylerde olduğu gibi 200 saniyede çok hızlı bir şekilde düşmüş sonrasında düşüş neredeyse sabit kalmıştır.

Şekil 3'de ise 7 mbar sabit basınç altında soğutulan haşlanmış brokoli örneklerinin vakum soğutma öncesi ve sonrasında termal kamera yardımıyla tespit edilmiş sıcaklık değişimini gösteren resimler verilmektedir.

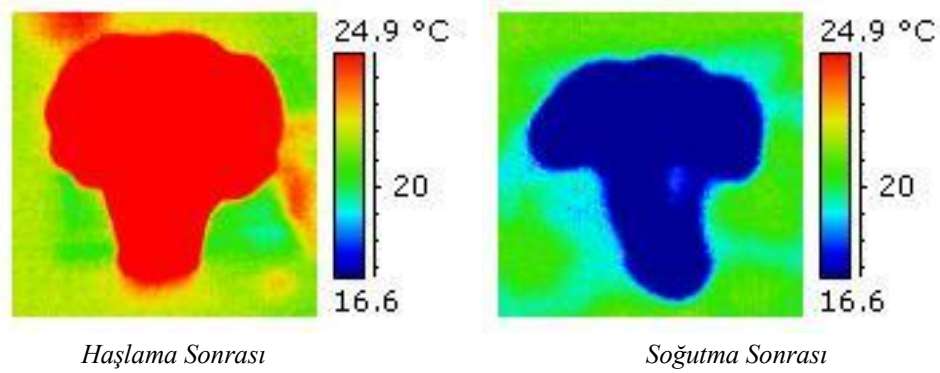
Tablo 1 de ise farklı basınçlarda için kütle kayıpları verilmiştir. Mümkün olduğunca benzer kütleli numunelerde çalışılmaya özen gösterilse de, numunenin doğallığını bozmamak için tek bir parça brokoli parçalanmadan çalışmalar yapılmıştır. Vakumlu soğutma sonrası ortalama %11-14 civarında kütle kaybı olmuştur. Tablo 1 den de görüldüğü gibi pişirme esnasında ortamdaki su brokoli de benzer yüzdelerde kütle artışına sebep olmuştur. Sonuç olarak pişirme esnasındaki kütle artışı, vakumlu soğutmadaki kütle kaybını dengelemektedir. Buda brokolinin yapısındaki ortalama nem oranını dengelemektedir.

B. HAŞLANMIŞ BROKOLİNİN BUZDOLABINDA SOĞUTULMASI

Brokolinin geleneksel olarak soğutulması denemeleri buzdolabında 5°C gerçekleştirilmiştir. Brokolinin 5°C'de geleneksel soğutmada önce ve sonra ağırlıkları ölçülerek, kütle değişimi hesaplanmıştır, buna göre kütle kaybı %10.44 olarak bulunmuştur. Bu değer vakum soğutmaya çok yakın bir değer olduğu görülebilir. Bunun sebebi buzdolabında soğutulma süresinin fazla uzun olmasıdır (yaklaşık 90 dakika). Buzdolabında 5°C'de soğutmada brokolinin sıcaklık değişimi Şekil 4'de verilmiştir. Brokolinin 5°C'ye soğutulmada geçen süre 5500 saniye (92 dak.) olmuştur. Vakum soğutma ile karşılaştırıldığında süre oldukça uzamıştır.



Şekil 2. 7 mbar sabit basınç altında iki pompanın çalışması durumu için, brokolinin yüzey, merkez ve ortam sıcaklığı, nem oranı ve basınç değişimi.



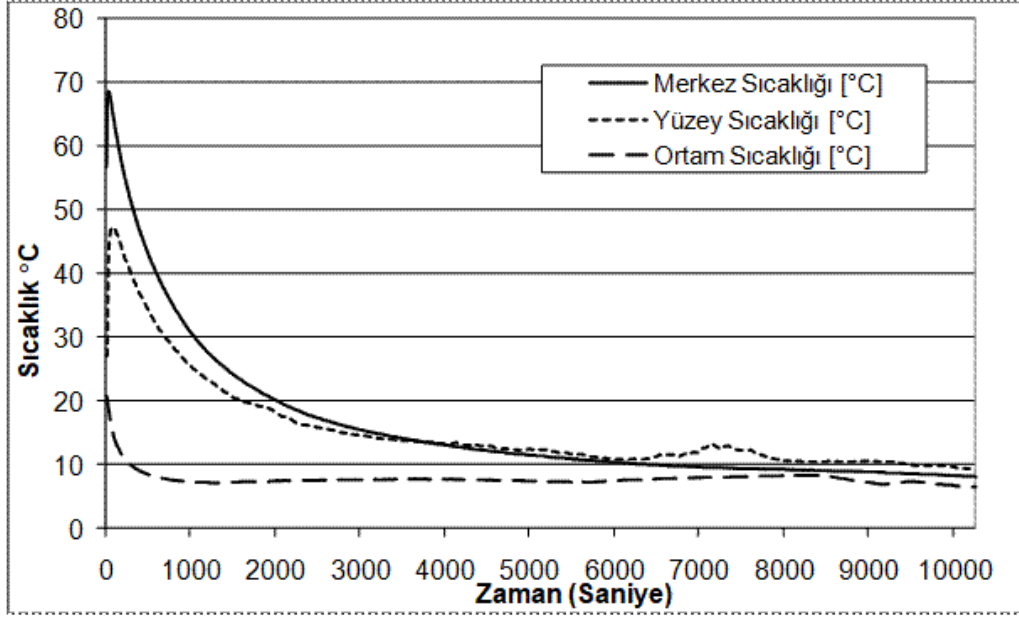
Şekil 3. 7 mbar sabit basınç altında haşlanmış brokoli örneklerinin vakum soğutma öncesi ve sonrasındaki sıcaklık değişim profili.

Tablo 1. Brokolinin vakum altında soğutulması

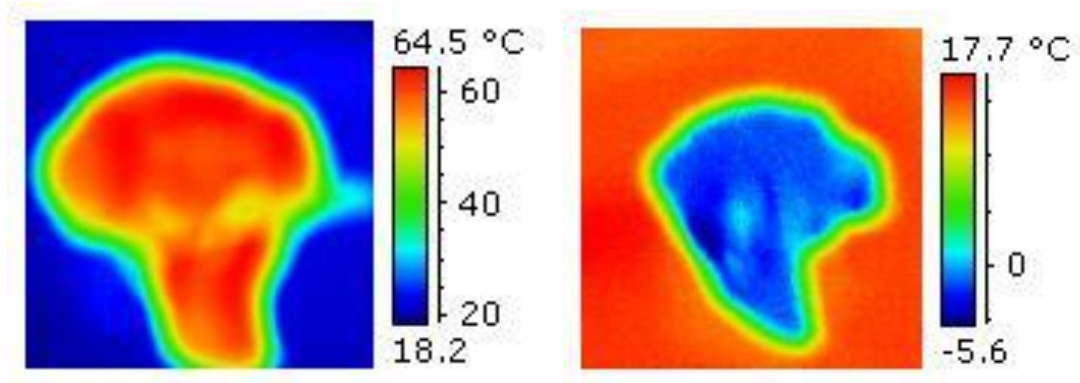
Vakum Basıncı	7 (kPa)
Piştirilmeden Önceki Kütle (g)	114,165
Piştirildikten Sonraki Kütle (g)	133,410
Soğutulduktan Sonraki Kütle (g)	117,003
Kütle Kaybı (g)	16,407
Kütle Kaybı Oranı (%)	12,30

Şekil 5’da buzdolabında 5°C sıcaklıkta soğutulan haşlanmış brokoli örneklerinin soğutma öncesi ve sonrasında termal kamera yardımıyla tespit edilmiş sıcaklık değişimini gösteren resimler verilmektedir.

Brokolinin geleneksel yöntemle soğutulmasına ilişkin veriler Tablo 2 verilmiştir. Brokolinin bu parametrelerdeki kütle kayıpları %10 civarında olmaktadır, yani vakumlu soğutmadaki kütle kaybından biraz yüksek bulunmuştur. Numune kütleleri arasındaki farklılıklar ve tekli analiz sonuçlarının verilmesi, bulunan sonuçlardaki rakamsal ifadeler arasında farklılıklar yarattı.



Şekil 4. Buzdolabında 5°C sıcaklık altında zaman bağlı olarak brokolinin yüzey ve merkez sıcaklığı ile ortam sıcaklığındaki değişim.



Şekil 5. Buzdolabında 5°C sıcaklıkta soğutulan haşlanmış brokoli örneklerinin sıcaklık değişim profili.

Tablo 2. Brokolinin buzdolabında soğutulması.

Sıcaklık	5 (°C)
Piştirilmeden Önceki Kütle (g)	103,610
Piştirildikten Sonraki Kütle (g)	114,500
Soğutulduktan Sonraki Kütle (g)	102,548
Kütle Kaybı (g)	11,952
Kütle Kaybı Oranı (%)	10,44

C. HAŞLANMIŞ KARNABAHAARIN SOĞUTULMASI

Karnabahar, turpgillerdendir ve anavatanı Doğu Akdeniz'dir. Koyu yeşil yapraklı, beyaz çiçekli ya da sarıdır. Kış sebze olarak da bilinirler. Lahana ile ortak özellikleri çoktur. Gerçekten, lahananın çiçek sapının etlenmesi ve kışılması sonunda lahanadan oluşmuştur. Yenilen kısımları, daha açmamış çiçekli kısımlardır. Ülkemizde; sonbaharda turfanda karnabahar, kış karnabaharı ve bahar karnabaharı olarak üç farklı türü vardır. Yararları: potasyum ve Fosfat içermesi ve özellikle göğüs kanserine iyi geldiğine inanılmaktadır, "Karnabahar çiçek olduğu için, bol fosfor ve vitaminleri, cinsiyet hormonu, bol E vitamini ve protein içerir. Bu maddeleri ile cinsel gücü artırır, buna bağlı olarak kalp rahatsızlıklarını da giderir. Sinirleri ve beyni iyi çalıştırır, onların yıpranmasını önler" diyorlar.

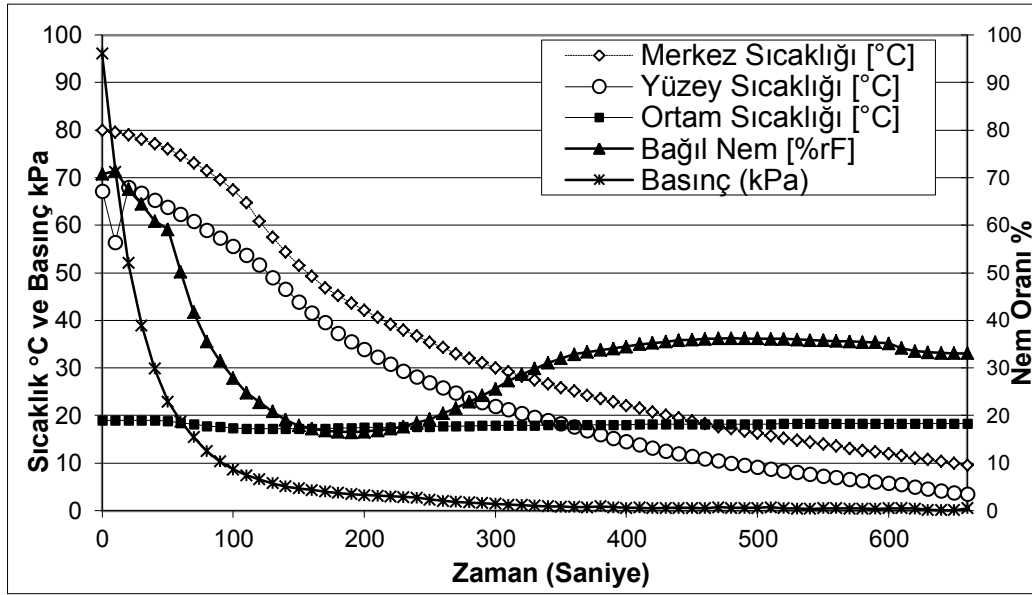
Karnabahar sebzelerinin vakum altında, buzdolabında ve derin dondurucuda soğutulma parametreleri incelendi.

D. HAŞLANMIŞ KARNABAHAARIN VAKUM ALTINDA SOĞUTULMASI

Haşlanmış Karnabaharın vakum altında soğutulmasına ilişkin deneyler vakum değeri 7 mbar basınçta, iki pompanın çalışır durumda gerçekleştirilmiştir. Sirkülasyonlu su banyosu sıcaklığı -20°C'ye getirilmiş, böylece eşanjörden hava geçerken soğurken nemini kaybetmiş ve nemi vakum pompasına gitmesinin önüne geçilmiştir.

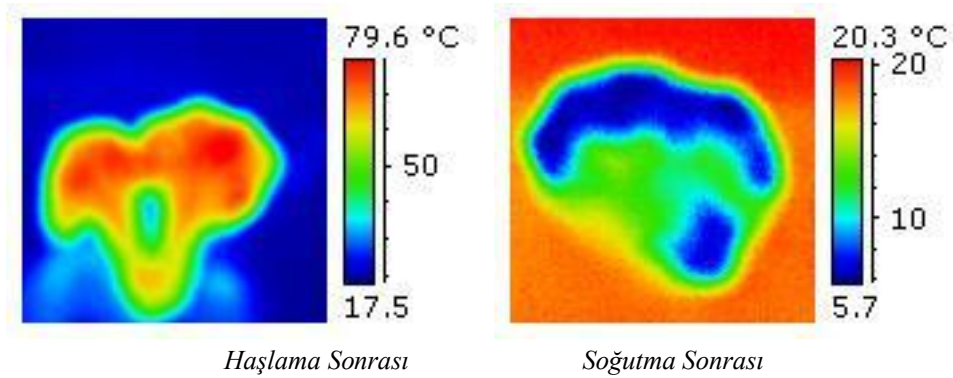
Haşlanmış kabakların vakum altında soğutulması esnasında özellikle yüzey sıcaklığının ölçülmesi esnasında datalogger probu iliştiirildiği yüzeyden çıkmış ve buna bağlı olarak yüzey sıcaklığının ölçülmesinde birtakım zorluklarla karşılaşmıştır. Bu nedenle de her bir basınç için çok sayıda deney yürütülmüş, bunlardan doğru sonuç verenlerin ortalaması kullanılarak sonuçlar raporda verilmiştir.

İlk deneyde ortam basıncı çift pompa çalıştırılarak 7 mbar'a getirilmiş ve vakum pompası bu basınçta çalışır durumdayken deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, merkez ve yüzey sıcaklığı hızla düşmüştür. Vakum altında soğutmanın 12'nci dakikası içinde karnabahar merkez ve yüzey sıcaklıkları sırasıyla 80°C ve 70°C sıcaklıktan 5°C ve 2°C sıcaklığa kadar düşmüştür.



Şekil 6. 7 mbar sabit basınç altında iki pompanın çalışması durumu için, karnabaharın yüzey, merkez ve ortam sıcaklığı, nem oranı ve basınç değişimi.

Şekil 7'de 7 mbar sabit basınç altında soğutulan haşlanmış Karnabahar numunesinin vakum soğutma öncesi ve sonrasında termal kamera yardımıyla tespit edilmiş sıcaklık değişimini gösteren resimler verilmektedir.



Şekil 7. 7 mbar sabit basınç altında haşlanmış Karnabahar örneklerinin vakum soğutma öncesi ve sonrasındaki sıcaklık değişim profili.

Karnabahar a ilişkin 7 mbar değerlerindeki soğutmalarda kütle kaybı Tablo 4.23'de verilmiştir. Yüzde kütle kayıpları arasında bir orantı gözükmemektedir. Örneğin 7 mbar vakumda 67,643 g numune, pişirilince 78,76 g olmuş ve soğutma sonucunda %12,15 kütle kaybı ile 69,187 ye ulaşmıştır. Fakat 10 mbar'lık çalışmada, yine benzer kütlede (74,685 g), pişirilmesi esnasında kütle artışı fazla olmuştur (92,90 g), fakat vakumlu soğutmada kütle kaybı %7,01 bulunmuştur. Bu sonuçlardaki değişim 15 mbar daki kütle kayıpları bile uyum sağlamamaktadır. Bunun sebebi genellikle deneylerin tekli sonuçlarının verilmesinden kaynaklanmaktadır, Üçlü veya dörtlü tekrar analizler yapılmış ve ortalamaları alınmış olsaydı, sonuçların güvenilirlikleri daha iyi olurdu ve daha uyumlu sonuçlar elde edilirdi.

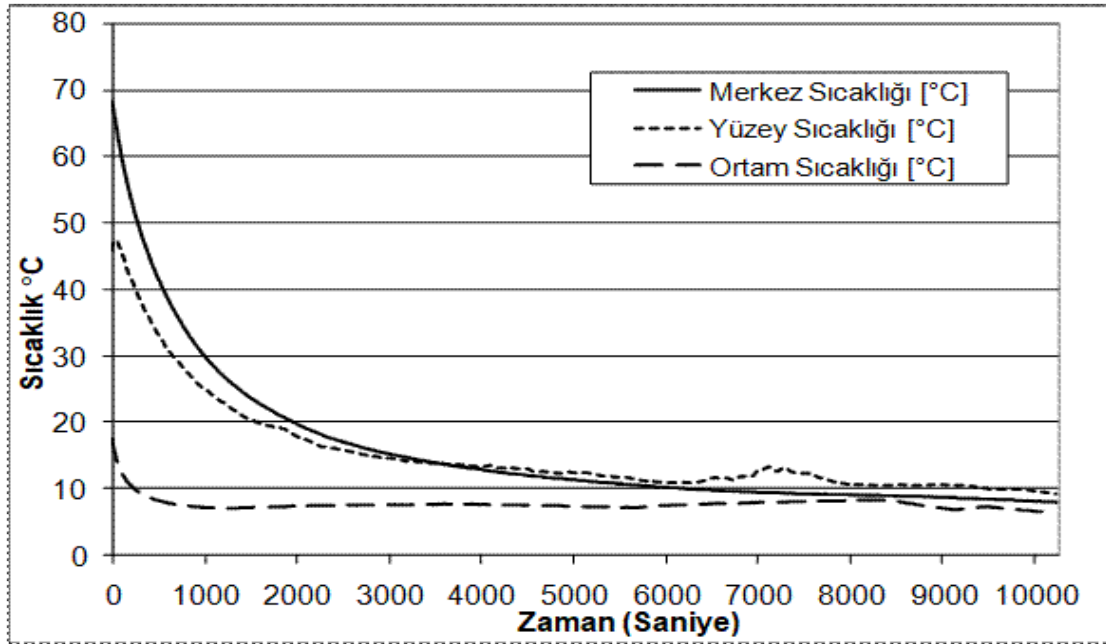
Tablo 3. Karnabaharın vakumda altında soğutulması

Vakum Basıncı	7 (kPa)
Piştirilmeden Önceki Kütle (g)	67,643
Piştirildikten Sonraki Kütle (g)	78,760
Soğutulduktan Sonraki Kütle (g)	69,187
Kütle Kaybı (g)	9,573
Kütle Kaybı Oranı (%)	12,15

E. HAŞLANMIŞ KARNABAHAARIN BUZDOLABINDA SOĞUTULMASI

Haşlanmış Karnabaharın klasik olarak soğutulması buzdolabında 5 °C sıcaklıkta yapılmıştır. Sıcaklıkta 5°C’de yapılan klasik soğutmada Karnabaharın sıcaklık değişimi Şekil 8’de verilmiştir. Karnabaharın 5°C’ye soğuması için geçen süre 8000 saniye (133 dakika) olmuştur. Vakum soğutmada bu süre vakum basıncına bağlı olmakla birlikte yaklaşık 10 dakika zaman almaktaydı.

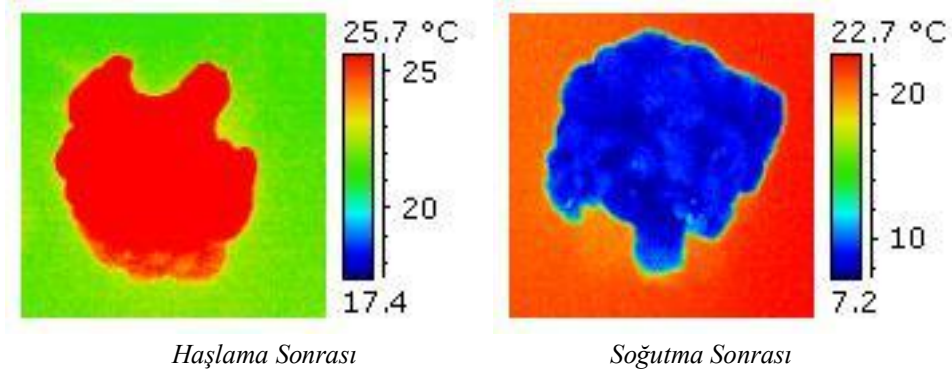
Şekil 9’da 5°C sabit sıcaklık altında buzdolabında soğutulan haşlanmış karnabahar numunesinin soğutma öncesi ve sonrasında termal kamera yardımıyla tespit edilmiş sıcaklık değişimini gösteren resimler verilmektedir.



Şekil 8. Buzdolabında 5°C sıcaklık altında zaman bağlı olarak karnabaharın yüzey ve merkez sıcaklığı ile ortam sıcaklığındaki değişim.

Karnabaharın geleneksel yöntemle buzdolabında soğutulmasında 5 farklı sıcaklık altında yürütülmüştür. Karnabaharın bu parametrelerdeki kütle kayıpları %8 civarında olmaktadır (Tablo 4), yani vakumlu soğutmadaki kütle kaybından biraz düşük bulunmuştur. Numune kütleleri arasındaki yakınlık ve tekli analiz sonuçlarına rağmen, karnabaharın piştirilme esnasında kütle artışını, yaklaşık olarak vakum esnasında vererek, soğutulduktan sonra yani yaklaşık olarak piştirilmeden önceki kütlelerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar bu tür sebzelerde piştirilme sonucunda soğumanın yapılmasının daha

uygun olacağını gösteriyor. Çünkü, deneyler pişirilmemiş karnabahar veya diğer bir sebzede yapılmış olsaydı, soğutma esnasında, sebzenin yüzeyinden nemi alarak sebzenin yüzey yapısını biraz etkileyecekti, belki bu sonuçlarda sebzenin tadı ve kıvamında negatif etkiler yaratacaktı.



Şekil 9. Buzdolabında 5°C sıcaklıkta soğutulan haşlanmış Karnabahar örneklerinin sıcaklık değişim profili

IV. SONUÇ

Vakum soğutma ve klasik soğutma deneyleri pişirilmiş karnabahar ve brokoli için yürütülmüştür. Vakum soğutma deneyleri 7 mbar, klasik soğutma için ise deneyler 5°C’de yürütülmüştür. Vakum soğutma ve klasik soğutma deneylerinde soğutulan ürünlerin merkez ve yüzey sıcaklıklarının zamana göre değişimleri incelenmiştir. Ayrıca vakum soğutmada ortam neminin ve ortam basıncının değişimi de incelenmiştir. İki metot için de ürünlerin soğutma öncesi ve sonrasında kütleleri ölçülerek soğutma sırasındaki kütle kayıpları ve kütle kayıp oranları tespit edilmiştir. Vakum soğutma ve klasik soğutma karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

Tablo 4. Karnabaharın buzdolabında soğutulması

Sıcaklık	5 (°C)
Piştirilmeden Önceki Kütle (g)	83,859
Piştirildikten Sonraki Kütle (g)	92,504
Soğutulduktan Sonraki Kütle (g)	83,654
Kütle Kaybı (g)	8,85
Kütle Kaybı Oranı (%)	9,57

- Yapılan tüm deneylerde vakum soğutmanın klasik soğutmaya göre daha hızlı bir soğutma tekniği olduğu görülmüştür. Bu da vakum soğutmanın gıda ürünlerinin hızlı bir şekilde soğutulmasında uygulanabilecek bir yöntem olduğunu göstermektedir.
- Vakum soğutmada ürünün yüzey ve merkez sıcaklıkları üniform olarak düşmektedir, klasik soğutmada ise ürünün yüzeyinde sıcaklık daha hızlı düşerken, merkezinde sıcaklık daha yavaş azalmaktadır.
- Hem brokoli hem de karnabaharda buzdolabında saklama sıcaklığında (5°C) soğuma süresi çok uzun zaman alırken vakum soğutmada bu süre oldukça kısa olmaktadır.

- Vakum soğutma sonrası ürünün termal kamera ile görüntüsü alındığında yüzey sıcaklığının vakum altında ölçülen sıcaklıktan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni vakum bitirildiğinde vakum ünitesinin kapağını açabilmek için ortama havanın girmesi ve bu sıcak havanın da özellikle ürünün yüzeylerinde sıcaklığı yükselmesidir.
- Vakum soğutma ve geleneksel soğutmada kütle kayıplarında farklılıklar meydana gelmektedir. Haşlanmış brokoli ve haşlanmış karnabaharın her ikisi için de vakum soğutmada kütle kaybı %12 civarında olurken, geleneksel soğutmada kütle kaybı oranı yaklaşık %10'lar mertebesinde gerçekleşmektedir.
- Haşlanmış brokoli ve haşlanmış karnabahar, haşlanmalarının hemen ardından soğutmaya tabi tutulduklarında, haşlanma sıcaklığından (90-95 °C) saklama sıcaklığına (5 °C) gelme sürelerinde büyük farklılıklar meydana gelmektedir. 7 mbar vakum basıncında haşlanmış brokoli vakum soğutucuda soğutulurken soğutma süresi 21 dakika zaman alırken, buzdolabında bu süre 92 dakikaya çıkmaktadır (4,4 kat fazla). Benzer olarak haşlanmış karnabaharda vakum soğutucusunda soğuma süresi 12 dakika olurken, buzdolabında bu süre 133 dakikayı bulmaktadır (11 kat fazla).

TEŞEKKÜR: Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 106M262 no lu Vakum Soğutma Sistemi Geliştirilmesi ve Gıda Sanayisinde Uygulanması adlı proje kapsamında sonuçlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazarlar TÜBİTAK'a projeye desteğinden dolayı teşekkür ederler.

V. KAYNAKLAR

- [1] L.Wang and D.W. Sun Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology. *Trends in Food Science & Technology*, vol. 12, pp. 174–184, 2001.
- [2] H.M. Ozturk, H.K. Ozturk, G. Koçar Microbial analysis of meatballs cooled with vacuum and conventional cooling, *Journal of Food Science & Technology*, vol. 54 no. 9, pp. 2825-2832, 2017.
- [3] C.F. Hsueh, H.P. Cheng, Multi-stage vacuum cooling process of cabbage, *Journal of Food Engineering*, vol. 79 no. 1, pp 37-46, 2007
- [4] S.Y. He, G.P. Feng, H.S. Yang, Y. Wub, Y.F. Li, Effects of pressure reduction rate on quality and ultrastructure of iceberg lettuce after vacuum cooling and storage, *Postharvest Biology and Technology*, vol. 33, pp. 263–273, 2004.
- [5] T.J. Rennie Effect of vacuum rate on the vacuum cooling of lettuce, Yüksek Lisans Tezi, McGill University Departement of Agricultural and Biosystems Engineering, Montreal, 1999.
- [6] H. M. Ozturk, H. K. Ozturk. Effect of pressure on the vacuum cooling of iceberg lettuce. *international journal of refrigeration*, vol. 32, no 3, pp. 402-410, 2009.
- [7] A.H. Tambunan, Y. Sagara, Y. Seo, Immage analysis for precise study on temperature distribution during vacuum cooling of lettuce, *Technology Innovation and Sustainable Agriculture, ICETS 2000*, Session 6, pp. 223-228, 2000.

- [8] J.A. Martinez, , F. Artés, Effect of packaging treatments and vacuum-cooling on quality of winter harvested iceberg lettuce, *Food Research International*, vol. 32, pp 621-627, 1999.
- [9] F. Tao, M. Zhang, Y. Hangqing, S. Jincai, Effects of different storage conditions on chemical and physical properties of white mushrooms after vacuum cooling. *Journal of Food Engineering*, 77:545–549, 2006.
- [10] Z. Zhang, D.W. Sun, Effect of cooling methods on the cooling efficiencies and qualities of cooked broccoli and carrot slices. *Journal of Food Engineering*, vol 77: pp 320–326, 2006.
- [11] G. Sarıkamış, Brokolinin (Brassica Oleracea L. Var. Italica) İnsan Sağlığına Yararları, *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, vol 4, no 2, pp 79-82, 2011.
- [12] M. H. Salman, Bazı brokkoli ve karnabahar çeşitlerinde verim depolama ve raf ömrü boyunca kalite değişimlerinin belirlenmesi, Doctoral Tezi, Ege Üniversitesi, 2007.
- [13] İ. Dinçer, Refrigeration systems and applications, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, İngiltere, pp 582, 2003.
- [14] K. Mcdonald, D.W. Sun, Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review. *Journal Of Food Engineering*, vol 45.2, pp 55-65, 2000.
- [15] A.İ. Okursoy, İ. Rasim, Ispanağın havayla, vakumla ve suyla ön soğutulmasındaki kalite ve işletim parametrelerinin belirlenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, c 5, s 2, 2009.
- [16] Y. Chambroy, C. Flanzly, Vacuum precooling, ethylene and storage of cantaloup melons. *Comptes Rendus des Seances de l'Academie d'Agriculture de France*, vol 66 (9), pp 813-822, 1980.
- [17] H. M. Ozturk, A. Hepbasli, Experimental performance assessment of a vacuum cooling system through exergy analysis method. *Journal of Cleaner Production*, vol 161, pp 781-791, 2017.
- [18] J.F. Thomson, Y.L. Chen, Comparative energy use of Vacuum, Hydro, and Forced Aircoolers for Fruits and Vegetables, *ASHRAE Transaction*, DA-88-17-3, 1994.