SOĞUTMA

Soğukta Depolamanın Temel İlkeleri

Depolanan gıda ürünlerinin kalitesinin korunmasında sıcaklık önemli bir rol oynar. Sıcaklığın düşürülmesi kalite bozulmasına neden olan tepkime hızlarını yavaşlatır. Genellikle sıcaklığı 10°C düşürmek tepkime hızını yarıya indirir.

Hasat edilmiş meyve ve sebzeler uygun koşullarda depolanınca, taze haldeki niteliklerini bir süre için önemli ölçüde korurlar. Uygun koşullar sıcaklık derecesi ve bağıl nemin ayarlanması ile sağlanır. Her meyve ve sebzenin en iyi şekilde depolanabildiği belli bir sıcaklık derecesi ve bağıl nem söz konusudur. Aynı meyve veya sebzenin en uygun depo istekleri, çeşide ve yetiştirildiği ekolojik koşullara bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin Florida greyfurtları en iyi 0°C'de depolanabilirken, Teksas Marsh greyfurtları en iyi 11°C'de depolanabilmektedir. Bu kadar geniş sınırlarda olmasa da bir çok meyve sebze çeşidinde aynı durum kendini göstermektedir.

Depolamadaki optimum koşullar ne kadar iyi sağlanırsa sağlansın, her meyve ve sebzenin ancak belli bir süre dayanma olanağı vardır. Bu süre; birkaç günden 5-6 aya kadar değişmektedir. Her ürüne özgü bu belli sürelerin sonunda, depolanan ürün, kalitesini süratle kaybeder ve sonunda tamamen bozulur. Bu nedenle soğukta depolamada, meyve ve sebzelerin dayanma süresi sınırlıdır.

Soğukta depolamada en önemli faktör, depo sıcaklık derecesidir. Genel bir ilke olarak, depolamadaki sıcaklık derecesi, depolanan meyve veya sebzenin donma noktasının 1-2°C üstünde bulunur. Soğukta depolamada ürün asla donmaz. Dondurarak muhafaza ile soğukta depolamanın en önemli farklılığı da budur. Dondurarak muhafazada, meyve ve sebzeler belirli işlem aşamalarından sonra dondurulmakta, -18°C veya daha düşük sıcaklıklarda donmuş halde depolanmaktadır. Böyle saklanan ürünün dayanma süresi teorik olarak sınırsızdır, fakat uygulamada sadece aylarca veya en çok birkaç yıl saklanır. Soğukta depolamadaysa meyve ve sebzelerin dokusu zedelenmemekte, ve ürün canlı kalarak yaşamsal faaliyetlerine devam etmektedir.

Soğukta Depolamada Fizyolojik İlkeler

Meyve ve sebzeler hasattan sonra da canlılıklarını sürdürürler. Her ne kadar, topraktan çeşitli besin maddelerinin alınışı sona erse de, dokuda çeşitli yeni maddelerin oluşması, mevcut maddelerin başka bileşiklere dönüşmesi gibi kimyasal ve biyokimyasal olaylar düzenli bir şekilde devam eder. Meyve ve sebzelerin bu davranışı, onların canlılığı demektir. Canlılığın en önemli belirtisi bunların oksijen alıp karbondioksit vermeleridir.

Meyve ve sebzelerdeki bütün bu yaşamsal faaliyetlere metabolizma denir. Metabolizma, ortam koşullarına bağlı olarak hızlı veya daha yavaş olarak devam eder. Bu sırada üründe depo edilmiş çeşitli maddeler harcanır. Nihayet bir süre sonra her canlıda olduğu gibi, doğal yaşlılık sonucu meyve ve sebzenin yapısı bozulur ve ölüm kendini gösterir. Artık kimyasal ve biyokimyasal olaylar kontrol dışında kalarak

düzensiz bir şekil alır. Bu sırada, canlı meyve veya sebzenin mikroorganizmalara karşı gösterdiği direnç de sona erdiğinden, çeşitli mikroorganizmaların hücumuna uğrayarak, ayrıca mikrobiyolojik bozulma başlar.

Soğukta depolamada ilke; meyve ve sebzelerin metabolizma faaliyetlerini durdurmadan en düşük düzeyde gerçekleşmesine olanak sağlayacak gerekli şartların sağlanmasıdır. Metabolizma olayları içinde en önemlileri ise solunum ve terlemedir.

Solunum (Respirasyon): Meyve ve sebzelerin canlılığının devamı için hücrede çeşitli tepkimelerin gerçekleşmesi zorunludur. Bu reaksiyonların gerçekleşmesi içinse enerjiye gereksinim vardır. İşte meyve ve sebzeler bu enerjiyi sağlamak üzere solunum yaparlar. Solunum sırasında oksijen alınıp karbondioksit verilir. Ancak meyve ve sebzelerin solunumunda gaz alınıp verilişi hücreler arası boşluklar yardımıyla, gazların difüzyonuyla gerçekleşir. Alınan oksijen özellikle ve öncelikle suda eriyen karbonhidratların yavaş bir şekilde oksidasyonu için harcanır ve bir taraftan ısı serbest kalırken, diğer taraftan CO_2 ve H_2O oluşur:

$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6H_2O + 6CO_2 +$ ısı

Bu şekilde serbest kalan ısının bir kısmı, hücrede gerçekleşen kimyasal tepkimelerde harcanırken büyük bir kısmı etrafa yayılır ve doğal olarak bizzat ürünü ısıtır. Ürünün ısınması, solunumu daha da hızlandırır. Sıkı bir şekilde istif edilen tarımsal ürünlerde "kızışma" denen bu olay sonucunda ürün tamamen bozularak elden çıkar.

Tablo 1. Bazı meyvelerin solunum ısıları

	Farklı derecelerde solunum ısısı miktarları (kcal/24h)					
	0°C	2°C	5°C	10°C	15°C	20°C
Elma (erken çeşitler)	220-380	290-430	320-650	840-1250	1100-1900	1210-2550
Elma (geç çeşitler)	110-220	220-280	280-430	420-640	570-1200	900-1480
Armut (erken çeşitler)	160- 300	270-540	450-950	600-1300	2100-3300	2400-5500
Armut (geç çeşitler)	160-220	220-460	360-860	480-1440	1700-2600	1950-4500
Erik	380-440	460-720	770-1350	1290-2600	1700-3850	2900-4850
Çilek	700-960	830-1310	910-1900	1850-3620	2700-5000	3600-6200
Kiraz	320-440	360-640	570-930	790-2050	1650-3400	3200-4550
Vişne	320-450	390-710	630-1120	880-2240	1840-3750	3550-5000
Şeftali	260-390	360-450	520-840	1330-1890	1800-2720	2900-3750
Kayısı	320-350	390-550	680-1150	1280·2100	1750-3200	2800-4100
Portakal	100-220	130-260	220-390	430-720	750-1140	1390-1420
Muz (yeşil)			450-1060	820-2020	1230-2700	1750-3200
Muz (olgun)			820-1210	1340-2420	1800-3410	1950-5000
Böğürtlen	960-1400	1200-2130	1750-2840	3180-5800	4300-8900	8000-12000
Ahududu	970-1900	1120-2380	1700-3400	3020-5800	4500-12000	7000-15000
Frenk üzümü (siyah)	420-680	670-1100	900-1670	1340-3750	3040-7200	4600-11500
Bektaşi üzümü	290-420	400-610	490-930	730-1820	1630-3900	2500-6600
Fındık-Ceviz	50	50	100	200	200	300
Kavun	280-400	360-480	450-550	850-950	1100-1450	1950-2100

Her meyve ve sebzenin solunum hızı farklıdır. Bu yüzden bazılarında yavaş bir solunum ve buna bağlı olarak az bir ısı yayılması görülürken, bazılarında hızlı bir

solunum ve aşırı ısı yayılması kendini gösterir. Örneğin; bezelye, fasulye ve çilek gibi ürünler hızlı solunum yaparak fazla ısı yayarlarken, soğan, patates ve üzümlerde solunum hızı yavaştır.

Solunum hızı üzerine etki eden en önemli faktör ortam sıcaklığıdır. Nitekim, ortam sıcaklığı arttıkça (T<37°C) kadar solunum hızı yükselir ve buna bağlı olarak ürünün yaydığı ısı artar. Buna karşın ortamın sıcaklığı azaldıkça solunum hızı da azalır. Meyve ve sebzelerin soğukta depolanmasında bu olgudan yararlanılmakta ve en önemli metabolizma olayı olan solunum hızı, depo sıcaklığının düşürülmesiyle sınırlandırılmakta ve kontrol altına alınmaktadır.

Tablo 1 de bazı meyvelerin, Tablo 2 'de ise bazı sebzelerin, farklı ortam sıcaklıklarında etrafa yaydıkları solunum ısıları verilmiştir. Soğuk depolamada, bu ısının devamlı olarak depodan uzaklaştırılması zorunlu olduğundan soğutma ekipmanlarının kapasitesinin belirlenmesinde bu değerlerden yararlanılmaktadır. Tablolardan da görüleceği gibi solunum ısısı, "1 ton ürünün 24 saatte serbest bıraktığı ısı miktarı" ölçüsüyle verilmektedir.

Tablo 2. Bazı sebzeleri solunum ısıları

	Farklı derecelerde solunum ısısı miktarları (kcal/24h)					
	0°C	2°C	5°C	10°C	15°C	20°C
Yeşil fasulye	1170-1450	1600-1700	2150 -2500	3350-4250	5450-8500	8150-11900
Bezelye (kapçıklı)	1800-2150	2400-2950	3200-3900	4100-5500	7500-9500	11800-13300
Karnıbahar	500-1300	720-1450	1100-1600	2550-2850	4000-5350	6300-8300
Havuç	200-580	450-700	580-800	650-900	1500-2000	1850-2800
Dolma Biber	500-680	650-900	1160-1320	1750· 1980	2130-2350	2500-2700
Domates (olgun)	280-360	330-400	400-550	650-850	1100-1800	1650-2100
Hıyar	390-420	400-500	500-700	1050-1250	1950-2500	3150· 3600
Kırmızı pancar	240-400	300-580	650-700	1050-1250	1450-2400	2050-4400
Marul	650-800	700-900	850-1050	1450-2100	2250-3900	5200-7000
Kereviz	300-500	400-600	650-950	1100-1750	2000-2350	2550-3000
Mantar	2350-2500	2550-2700	3050-3300	5000-5200	9650-10000	11400-13100
Kuşkonmaz	1200-1350	1400-1500	1600-1750	3000-3300	4250-5750	6000-7500
Ispanak	1250-1700	1600-2450	2650-4100	4300-6450	8750-10,800	13000-18500
Lahana	300-500	350-600	450-850	750-1100	1200-1650	2200-2500
Pırasa	730-1100	1200-2300	2650-3150	5650-5900	8650-9950	11200-12000
Yeşil soğan	1500-1650	2000-2120	3000-3150	4350-4520	5000-5150	6100-6500
Kuru soğan	240-400	260-440	320-520	470- 700	650-950	950-1200
Patates	220-540	220-500	250-400	340-450	400-750	500-900

Ortam sıcaklık derecesi düştükçe solunum hızı da yavaşlamakta, ürün donunca solunum tamamen durmaktadır. Buna göre solunum hızının, söz konusu ürünün donma noktasının hemen üstünde yani, donma noktasına yakın bir derecede en düşük düzeyde olduğu sonucu çıkmaktadır. Ancak, meyve ve sebzelerin soğukta depolanmalarında her üründe solunumun en az düzeyde geliştiği bu kritik dereceye kadar inilemez. Her şeyden önce. bu ürünlerin yaşamlarını sürdürmeleri için belli bir enerjiye gereksinimleri vardır. Fakat daha önemlisi. her ürün belli bir sıcaklık derecesinin altında "soğuk zararlanmasına" uğrar. Başka bir değişle, birçok meyve ve sebze belli derecelerdeki. soğuğa karşı duyarlı olduklarından solunumun minimum düzeyde gerçekleştiği, düşük sıcaklıklara kadar inmek olanaksızdır. Tüm meyve ve

sebzelerin donma noktalarının gerçekte birbirlerine çok yakın (0;-2°C'ler arası) olmasına karşın, her ürünün farklı derecelerde depolanma zorunluluğu her birinin soğuğa duyarlılığının değişik olmasından kaynaklanmaktadır.

Solunum hızı üzerinde sıcaklık derecesi dışında asetilen, etilen, ve bütilen gibi metabolizma ürünleri de etki eder ve solunum hızını arttırır. Bazı meyvelerin depoda süratle olgunlaştırılmasında bu olgudan yararlanılır.
Depo atmosferindeki oksijen ve karbondioksit oranları da solunum hızını etkileyen bir diğer faktördür. Depo atmosferindeki oksijen oranı azaltılıp, karbondioksit oranı artırılarak solunum hızı yavaşlatılabilir. Bu olgudan yararlanılarak, kontrollü atmosfer (CA) yöntemiyle depolama tekniği geliştirilmiştir.

Terleme (Transpirasyon): Meyve ve sebzelerin canlılığının en önemli belirtilerinden bir diğeri de terlemedir. Terlemeyle ürün depolama sırasında devamlı olarak su kaybeder. Meyve ve sebzeler ortalama olarak % 75-95 arasında su içerirler. Depolama sırasında bu suyun bir kısmı terleme ile uzaklaşır. Terleme sonucu su kaybı ile meyve ve sebzelerin yapısı görsel kalite kaybı ortaya çıkar ve ürün albenisini kaybeder. Genel bir ilke olarak, meyvelerin yaklaşık % 4-6, sebzelerin % 3-5 oranında su kaybetmeleri onların buruşup pörsümelerine ve ticari değerlerinin kaybolmasına neden olur.
Terleme hızı; ortamın sıcaklık derecesine, solunum hızına, meyve ve sebzenin çeşidine ve özellikle dış dokuların morfolojik yapısına bağlı olarak değişir. Bu yüzden, meyve ve sebzelerin soğukta depolanmasında, depoda belli bir bağıl nem oluşturularak, depo sıcaklık derecesi düşürülerek ve depo havasının hareketi belli sınırlarda tutularak terleme olayı kontrol altına alınır ve terleme sonucu oluşan kalite düşmesi önlenir. Buna ek olarak bazı ürünlerin plastik materyallerden yapılmış ambalajlara yerleştirilmesiyle, terleme sınırlandırılır.
Terlemeyle kaybedilen suyun tümü, meyve veya sebzenin doğal hücre suyu değildir. Bilindiği gibi solunum sonunda karbonhidratlardan su oluşur ve terlemeyle kaybedilen suyun yaklaşık % 10 kadarı, bu yolla oluşan sudan kaynaklanır.
Terleme sırasında su ile birlikte bazı uçucu metabolizma ürünleri de dokudan uzaklaşıp ayrılır. Eğer terleme, depo neminin gereğinden fazla yükseltilmesi yoluyla durdurulursa, bazıları zararlı olan bu metabolizma ürünleri, meyve ve sebzelerin dış doku ve kabuklarında birikerek, kabuk ve ette esmer leke veya bölgeler oluşur. Bu olguya "fizyolojik zararlanmalar" denir ve böylece ürünün kalitesi ve ticari değeri kaybolur. Bu yüzden, depo nemi belli bir düzeyde tutularak terleme uygun bir derecede sınırlandır ancak tamamen durdurulmaz.

Depolamada Meydana Gelen Değişmeler

Kimyasal Değişmeler: Hasat edilmiş bir ürün canlı olduğu için düzenli bazı kimyasal değişmelere uğrar. Ürünlerin soğukta depolanmasıyla bu değişmeler oldukça yavaşlatılabilirse de tamamen durdurulamaz. Genel bir ilke olarak bu kimyasal değişmeler, bitkilerin gelişen, büyüyen organlarında, depo organlarına göre daha fazla oluşur. Nitekim, örneğin yeşil fasulye, bezelye gibi ürünlerde fazla oranda kimyasal değişmeler belirirken, patates, soğan ve havuç gibi ürünlerde daha sınırlı olmaktadır. Başlıca kimyasal değişmelere örnek olarak solunumda şekerler ve bir

oranda asitlerin harcanması, büyük moleküllü karbonhidratların örneğin nişastanın kendini oluşturan şekerlere parçalanması, proteinlerin kısmi hidrolizasyonu, glikozitlerin kendini oluşturan unsurlara parçalanması, pektik maddelerin parçalanarak dokunun yumuşaması, renk maddelerinde kayıpların olması: özellikle klorofilin parçalanıp yeşil renkli ürünlerin yeşil-sarı bir renge dönüşmesi verilebilir. Bu değişmeler belli ölçülere ulaşınca, lezzet, renk ve aroma bozularak meyve ve sebzelerde tazeliğini kaybetme olgusu veya başka bir deyişle "bayatlama" görülür. Depolamadaki bu kimyasal değişmeler, atmosferinde düşük oranda oksijen ve/veya yüksek oranda karbondioksit içeren depolarda çok düşük sınırlarda kalmaktadır. işte kontrollü atmosferde depolama yönteminin üstünlüklerinden biri de bundan kaynaklanmaktadır.

Depo Zararlanmaları: Her meyve ve sebze belli bir derecedeki soğuğa dayanabilir, bu derecenin altında donma olmasa dahi soğuğun neden olduğu bazı zararlar görülür. Meyve ve sebzelerin "soğuğa duyarlığı" olarak nitelenebilecek bu durum; ürünün tür, çeşit ve yetişme koşullarına bağladır. Birçok meyve ve sebze +2 ile +3°C lerde herhangi bir zararlanmaya uğramazken, örneğin karpuz, kavun ve domatesler +5°C'nin altında canlılıklarını yitirirler. Domatesler 3 gün süreyle +2°C'de tutulduktan sonra, ılık bir yere alınsa bile artık bir daha kızarmazlar. Bu, soğuğun domateslerde yaptığı bir zaralanmanın sonucudur. Bunun gibi bazı patates çeşitleri +4,5°C'den aşağıda depolanınca, yumru içlerinin rengi bozulur, esmerleşir ve patateslerde şeker miktarı artar ve patatesler tatlanır, böylece kalitelerini yitirirler.
Meyve ve sebzelerin soğuk depoda zararlanması, onların metabolizma faaliyetlerinin uzun bir süre engellenmesinin bir sonucudur. Soğuk zararlanması sonucunda, meyve eti veya kabuklar yer yer ölür. Ölmüş hücrelerin içindeki maddeler okside olur ve böylece bu bölgeler esmerleşir ve üründen lekeler oluşur. Bu arızalı yerlerde daha sonra, mikrobiyolojik enfeksiyon başlayarak ikinci bir bozulma yani, çürüme başlar.

Depo zararlanması sadece soğuktan kaynaklanmaz. Depo neminin gereğinden yüksek olması ve soğutma cihazlarından sızan soğutucu gazlar da zararlanmalara neden olur. Örneğin soğutucuda amonyak kullanılıyorsa, depoya bir amonyak sızıntısı sonrasında depolanan ürünün yüzeyinde önce kahve renk veya yeşilimsi siyah bir renk değişmesi belirir. Daha sonra ise renk, daha fazla değişir ve ürün nihayet yumuşar ve tamamen bozulur.

Meyve ve Sebzelerin Soğuk Etkisiyle Canlılığını Yitirmesi:

Meyve ve sebzeler sıfır derecenin hemen altında, genellikle -1°C ile -3°C arasında, donmaya başlar. Çeşitli ürünlerin hücre sularının donma başlangıç dereceleri, Tablo 3 de verilmiştir.

Saf suyun 0°C'de donmasına karşın, meyve ve sebzelerin 0°C'nin altında donmasının nedeni, bunlardaki suyun içerisinde çeşitli maddelerin erimiş halde bulunmasından kaynaklanmaktadır. Meyve ve sebzeler donunca hücreler ölür. Donma sonucu ölümün nedeni, hücrenin önemli ölçüde su kaybetmesidir. Hücre suyu donunca, saf su buz kristalleri haline dönüşürken, hücre suyundaki erimiş maddeler konsantre bir çözelti oluşturur ve bu yoğun çözelti hücre proteinlerinin denatürasyonuna neden olarak hücre ölümüne yol açar. Daha sonra don çözülse bile

artık hücre canlı değildir. Ancak her donma olayı mutlaka hücrenin ölümüyle sonuçlanmaz. Kısa süreli bir donmada birçok meyve ve sebzenin ölmediği görülmüştür. Daha yüksek bir derecede uzun süren bir don, daha düşük derecede kısa süreli bir dona göre daha sakıncalı olup, bu durumda hücreler kesinlikle ölmektedir. Bunun gibi, oluşmuş hafif bir donun çok süratli çözülmesi, donun yavaş yavaş çözülmesine göre daha büyük don zararlanmalarına neden olmaktadır.

Tablo 3. Bazı meyve sebze hücre sularının donma noktaları

Meyveler	Donma derecesi °C	Sebzeler	Donma derecesi °C
Ahududu	-0.8 -1.2	Bezelye	-1.1 -1.3
Armut	-1.4 -2.8	Biber	-0.6 -0.8
Böğürtlen	-1.2 -1.8	Domates	-0.6 -1.0
Çilek	-0.8 -1.7	Fasulye	-0.6 -0.9
Elma	-1.3 -2.0	Havuç	-1.0 -1.5
Erik	- 1.9 -3.0	Ispanak	-0.8 -1.1
Frenk Üzümü	-0.9 -1.2	Karnabahar	-1.1 -1.3
Hıyar	-0.4 -0.5	Kereviz	-0.5 -1.1
Kayısı	-2.0 -2.2	Kuşkonmaz	-0.5 -0.8
Kiraz ve Vişne	-1.9 -2.8	Lahana	-0.6 -1.0
Limon	-1.8 -2.2	Mantar	-0.5 -1.1
Portakal	-2.2 -2.5	Marul, kıvırcık	-0.4 -0.6
Şeftali	-1.1 -1.5	Patates	·1.4 -1.7
Üzüm	- 1.8 -2.0	Soğan	-1.2 -2.7

Meyve ve sebzelerin soğukta depolanmaları sırasında, onların hafif de olsa donmalarına kesinlikle olanak verilmemelidir.

Soğuk depoda, koşullar ne kadar uygun olsa da, ürünün solunumu sonucunda başta şekerler olmak üzere bazı maddeler harcanır. Bu maddelerin harcanışı belli bir düzeye eriştikten sonra solunum durur ve ölüm belirir. Solunum sırasında hücrelerde düzenli bir şekilde gelişen kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlardaki düzen kaybolur ve bunun sonucu, çeşitli maddeler oluşur ve aroma bozulur, doku yumuşayıp gevşer. Bunun peşinden de mikrobiyolojik bozulma başlar

Soğutma işlemi mekanik soğutma sistemi kullanılarak yapılır. Soğutma sistemleri, ısının soğutmanın yapıldığı ortamdan kolayca uzaklaştırılabileceği bir bölgeye aktarımını sağlar. Soğutma işlemi soğutucu gaz kullanılarak yapılır. Soğutucu gazlar su gibi sıvı halden gaz hale geçerler ancak kaynama noktaları çok daha düşüktür. Örneğin gıda işletmelerinde yaygın olarak kullanılan amonyağın kaynama noktası -33°C'dir. Suda olduğu gibi soğutucu gazlarında sıvı halden gaz hale geçmesi için gizli ısı gereklidir ve soğutucu maddenin kaynama noktası basıncın değiştirilmesiyle değişir. Örneğin: Amonyağın kaynama noktasının 0°C'ye çıkarılması için basıncın 430.43 kPa'e yükseltilmesi gerekir. Soğutucu maddeler pahalı olduğu için tekrar kullanılması gerekir. Bu nedenle soğutucu sistemin soğutucu maddenin gaz halde

toplayacak ve sıvı hale dönüştürecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu mekanik sıkıştırma sistemleri ile gerçekleştirilir.

Soğutucu Maddenin Seçimi

Gaz sıkıştırma sistemlerinde kullanılan birçok soğutucu gaz ticari olarak bulunmaktadır. Soğutucu gazın performans özelliklerine bağlı olarak soğutma sistemine uygun soğutucu madde seçilir.

Soğutucu madde seçiminde önemli faktörler:

Buharlaşma gizli ısısı: Yüksek buharlaşma gizli ısısı tercih edilir. Belli kapasitedeki bir sistem için yüksek buharlaşma gizli ısısı sistemde birim zamanda dolaşan daha az soğutucu madde demektir.

Yoğunlaşma basıncı: Yüksek yoğunlaşma basıncı, yoğuşturucu ve borularda dayanıklı madde kullanımı gerektirir.

Donma sıcaklığı: Soğutucu maddenin donma noktası buharlaştırıcı sıcaklığından düşük olmalı.

Kritik sıcaklık: Soğutucu madde tatmin edici ölçüde yüksek kritik sıcaklığa sahip olmalı. Kritik noktanın üstündeki sıcaklıklarda soğutucu madde buharı sıvı hale getirilemez.

Toksik olma: Hava iklimlendirme sistemleri de dahil olmak üzere soğutucu madde toksik özellik göstermemeli.

Tutuşma (Alevlenme): Soğutucu gaz yanıcı özellikte olmamalı.

Aşındırıcı olma: Soğutucu madde soğutma sisteminde kullanılan maddelere karşı aşındırıcı özellikte olmamalı.

Kimyasal kararlılık: Soğutucu madde kimyasal olarak kararlı olmamalı.

Sızıntı Tespiti: Sızma olduğunda kolayca tespit edilebilir olmalı.

Maliyet: Endüstriyel uygulamalarda maliyeti düşük soğutucu maddeler tercih edilir.

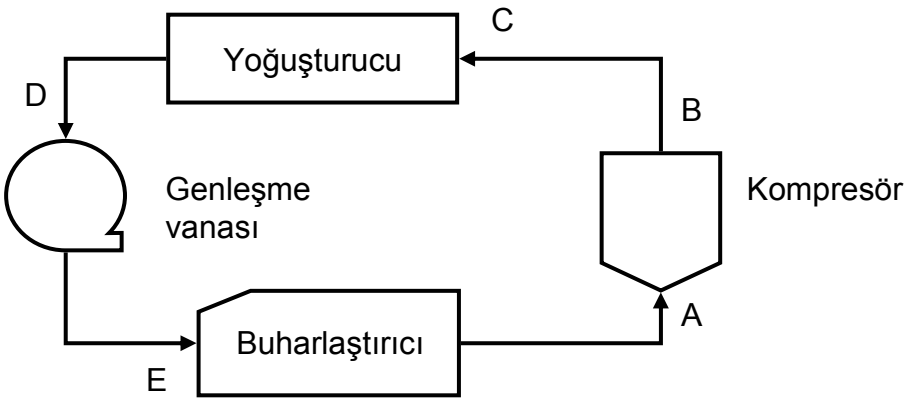
Çevresel Etki: Soğutucu madde sızıntı sonucu soğutma sistemlerinden çevreye karıştığında çevreye zararlı olmamalı

Kloroflorokarbonlar (CFC) kimyasal olarak çok kararlı olduğu için atmosferin alt tabakalarında bozulmadan uzun süre kalırlar ve atmosferin üst tabakalarına göç ederler. Atmosferin üst tabakalarında Güneşin ultraviyole ışınlarının etkisiyle CFC molekülü parçalanır ve ozonla tepkimeye girer. Ozon tabakasında incelmeye neden olur. CFC'lere alternatif olarak hidroflorokarbonlar (HFC) ve hiroklorokaflorokarbonlar (HCFC) kullanılmaktadır. Hidrojen içeren florokarbonlar zayıf hidrojen bağına sahiptir ve kimyasal bağ parçalanmasına daha duyarlıdır.

Kimyasal Özellik	Freon 12 dikloro diflorometan CCl_2F_2	Freon 22 monokloro diflorometan $CHClF_2$	Metil klorit CH_3Cl	Amonyak NH_3
Molekül Ağırlığı	120.9	86.5	50.5	17
Kaynama Noktası, °C (101.3 kPa basınçta)	-29.8	-40.8	-23.8	-33.3
Buharlaştırıcı Basıncı, kPa (-15°C'de)	182.7	296.4	145.5	236.5
Yoğuşma basıncı, kPa (30°C)	744.6	1203	652.9	1166.5
Donma Noktası °C (101.3 kPa basınçta)	-157.8	-160	-97.8	-77.8
Kritik sıcaklık, ^oC	112.2	96.1	142.8	132.8
Kritik basınç, kPa	4115.7	4936.1	6680.3	11423.4
Kompresörden atılma sıcaklığı, °C	37.8	55	77.8	98.9
Sıkışma Oranı, 30°C/15°C	4.07	5.06	4.48	4.94
Buharlaşma gizli ısısı, kJ/kg (- 15°C'de)	161.7	217.7	420.3	1314.2
Kararlılık (toksik bozulma ürünleri	Evet	Evet	Evet	Hayır
Alev Alma	Hayır	Hayır	Evet	Evet
Koku	Eterik	Eterik	Eterik	Keskin
Buharlaştırıcı Sıcaklık Aralığı, ^oC	-73 to 10	-87to10	-62 to 10	-68 to -7

Soğutucu Sistemin Bileşenleri

Soğutucu bir sistemin temel bileşenleri yoğuşturucu, kompresör, genleşme vanası ve buharlaştırıcıdır. Soğutucu gaz soğutucu sistemin bileşenleri içinden geçerken sıvı halden gaz hale daha sonra tekrar sıvı hale geçer. D noktasında genleşme vanasına girmeden önce soğutucu madde doygun sıvı haldedir. Yoğuşma sıcaklığında veya yoğuşma sıcaklığının altında. Genleşme vanası düşük basınç bölgesini yüksek basınç bölgesinden ayırır. Genleşme vanasını geçtikten sonra basınç ve sıcaklık düşüşü gerçekleşir. Basınç düşmesiyle soğutucu maddenin bir kısmı gaz haline geçer. Genleşme vanasını terk eden bu sıvı gaz karışımına flaş gaz denir.



Sıvı-gaz karışımı E noktasında buharlaştırıcı halkalarına girer. Buharlaştırıcı halkalarının çevrelediği ortamdan aldığı ısıyla karışım tamamen gaz haline dönüşür. Çevreden aldığı ısıyla gaz aşırı ısınmış hale de geçebilir. Doygun buhar A

noktasından kompresöre girer. Kompresörde soğutucu madde yüksek basınca sıkıştırılır. Basınç soğutucu maddenin kritik basıncından düşük, çevrenin etkisiyle yoğuşmasına izin verecek kadar yüksek olmalıdır. Soğutucu maddenin basıncı arttıkça sıcaklığı artar. B noktasında soğutucu madde aşırı ısınmış haldedir. Aşırı ısınmış gaz C noktasında yoğuşturucuya girer. Hava veya su soğutmalı yoğuşturu kullanarak soğutucu maddenin ısısı çevreleyen ortama salınır. Soğutucu madde yoğuşarak tekrar sıvı hale geçer.

Buharlaştırıcı: Buharlaştırıcıda sıvı soğutucu madde buharlaşarak gaz halde geçer. Hal değişimi için gerekli gizli ısı ortamdan alınır. Kullanımlarına göre buharlaştırıcılar iki sınıfa ayrılır.

- Doğrudan Genleşen Buharlaştırıcılar: Soğutucu madde buharlaştırıcı halkaları içinde buharlaştırılır ve soğutulan cisim veya sıvı halkalarla doğrudan temas eder.
- Dolaylı Genleşen Buharlaştırıcılar: Buharlaştırıcı halkalarında buharlaşan soğutucu madde tarafından soğutulan su veya tuzlu su gibi taşıyıcı ortam kullanılır. Doğrudan genleşen buharlaştırıcılar fazladan ekipman kullanımı gerektirir. Sistem içimde farklı noktalarda soğutma gerektiğinde faydalıdır. Donma noktasının altındaki sıcaklıklarda tuzlu su, veya glikol (etilen glikol, propilglikol) kullanılır.

Buharlaştırıcılar yapılarına göre 3 sınıfa ayrılabilir:•

- Borulu buharlaştırıcılar: Yapı olarak en basitidir. Buz çözdürülme ve temizlik kolaydır.
- Kanatlı tüp buharlaştırıcılar: Yüzey alanını arttırmak için kanat kullanılır.
- Plakalı buharlaştırıcılar: Ürünlerin dolaylı temasını sağlar.

Buharlaştırıcılar ayrıca doğrudan genleşen ve yüzen tip olmak üzerede sınıflandırılabilir.

- Doğrudan Genleşen Buharlaştırıcı: Buharlaştırıcı içinde soğutucu madde tekrar dolaştırılmaz. Sıvı soğutucu devamlı buharlaştırıcı borusunda gaz hale dönüştürülür.
- Yüzen Tip Buharlaştırıcı: Soğutucu buharlaştırıcı içinde tekrar kullanılır.

Kompresör: Soğutucu madde düşük basınç ve sıcaklıkta gaz halde kompresöre girer. ,Kompresör soğutucu maddenin basınç ve sıcaklığını yükseltir. Kompresörün bu etkisi nedeniyle ısı yoğuşturucuda soğutucu madde tarafından salınır. Sıkıştırma etkisi ile soğutucu maddenin sıcaklığı ortam sıcaklığından yeterince fazla olur.

Kompresör: Yaygın olan üç tip kompresör bulunur:

- Pistonlu: En yaygın olanı.
- Santrifüj: Yüksek hızda dönen pervane içerir.
- Döner: Elektrik veya yanma motorlu olarak çalışır.

Kompresör kapasitesi kompresör performansını etkileyen önemli bir etkendir. Kompresör kapasitesini etkileyen faktörler:

- Piston yer değişimi

- Pistonla silindir arasındaki boşluk mesafesi
- Emme-basma vanalarının büyüklüğü

Kompresör kapasitesini etkileyen diğer faktörler çalışma koşullarına bağlıdır.

- Dakikadaki devir sayısı
- Soğutucu madde tipi
- Emme ve basma basınçları

Yoğuşturucu:Soğutma sisteminde yoğuşturucunun fonksiyonu ısının soğutucu maddeden başka bir ortama (hava, su) aktarımını sağlamaktır. Isıyı atarak soğutucu madde gaz halden sıvı hale geçer. Genel olarak 3 tip yoğuşturucu kullanılır:

- Su soğutmalı
- Hava soğutmalı
- Buharlaştırıcı(hava ve su birlikte kullanılır)

Çift borulu yoğuşturucuda su iç dairesel borudan akarken soğutucu madde dış dairesel borudan akar. Yüksek ısı transferi verimi için ters akış kullanılır. Çift borulu yoğuşturucu yaygın olarak kullanılmakta ancak bakımı zordur.

Gövde borulu yoğuşturucuda su boru içinde pompalanırken soğutucu madde gövde içinde akar. Borulara kanatların eklenmesi ısı aktarımını arttırır. Düşük maliyetli ve bakımı kolaydır.

Hava soğutmalı yoğuşturucular genellikle 2'ye ayrılır:

- Tüp ve kanat tipi: geniş ısı aktarım alanı, az yer kaplar
- Levha tipi: geniş yer kaplar, ucuz, bakımı kolay

Yüksek ısı taşınım katsayısı elde etmek için hava soğutmalı yoğuşturucular da fan kullanılabilir.

Genleşme Vanası:Temel olarak sıvı soğutucu maddenin buharlaştırıcıya akışını kontrol eden bir ölçüm aletidir.Vana elle veya soğutma sistemindeki bir yerde basınç veya sıcaklığa bağlı olarak kontrol edilebilir.Soğutma sistemlerinde kullanılan genleşme vanası5 çeşittir.

1. Elle kontrol edilen vana
2. Otomatik alçak taraf yüzen vana
3. Otomatik yüksek taraf yüzen vana
4. Otomatik genleşme vanası
5. Isıya duyarlı genleşme vanası

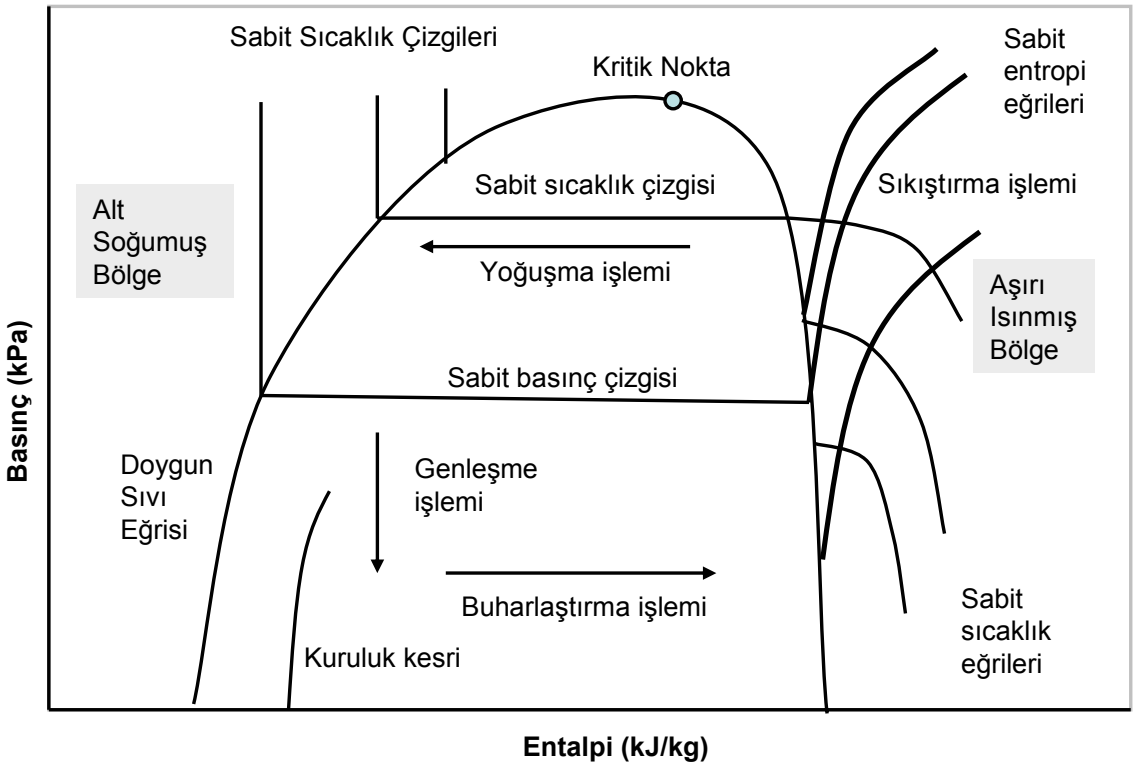
Basınç-Entalpi Çizelgeleri

Soğutucu gazın basınç ve entalpisi soğutma sisteminin çeşitli bileşenlerinden geçerken değişir. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda (kondensör) soğutucu gazın

entalpisi değişirken basıncı sabit kalır. Kompresörde soğutucu gaz sıkıştırılırken iş kompresör tarafından yapılır, soğutucu gazın entalpisiyle birlikte basıncı da artar. Genleşme vanasında entalpi sabit kalır. Yüksek basınçtaki sıvı soğutucu kontrollü bir hızda soğutucu sistemdeki düşük basınç bölgesine geçer.

Soğutucu gazların termodinamik özelliklerini gösteren çizelge veya diyagramlar literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çizelgeler özellikle soğutma sistemleri tasarımının kavramsal aşamaları sırasında çok faydalıdır. Çizelgelere bakarak tasarlanan işlemin standartlara uyup uymadığı kolayca anlaşılabilir. En çok kullanılan çizelgeler, x ekseninde entalpiye karşılık y ekseninde basıncı gösterenlerdir. Bir diğer gösterim şekli ise x ekseninde entropiye karşılık y ekseninde sıcaklığı gösteren çizelgelerdir. Buharlaşma, sıkıştırma, yoğunlaşma ve genleşmeden oluşan bütün soğutma çevrimi basınç-entalpi çizelgelerinde gösterilebilir.

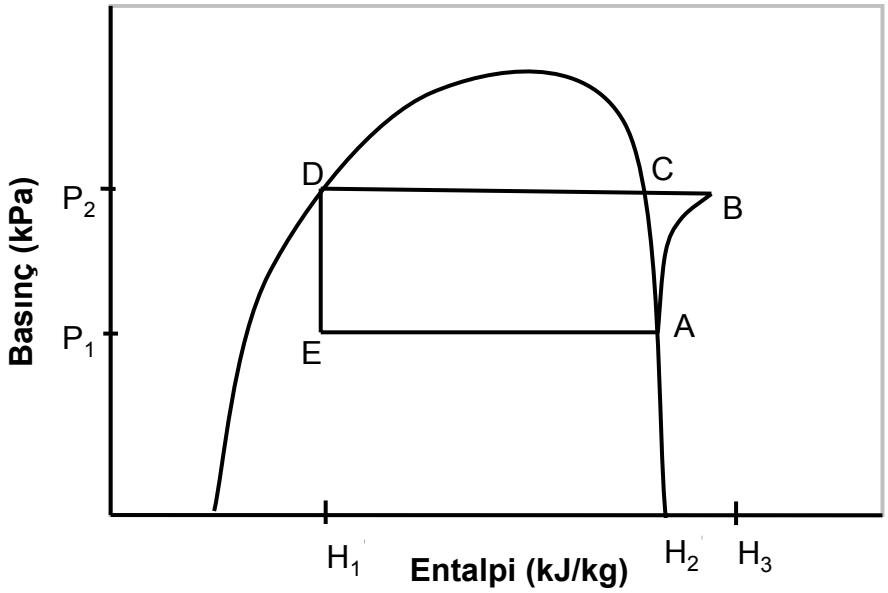
Basınç-entalpi çizelgelerinde basınç (kPa) dikey eksende logaritmik ölçekte gösterilirken yatay eksende entalpi (kJ/kg) gösterilir.



Doygun sıvı ve doygun buhar eğrilerine bağlı olarak basınç-entalpi çizelgeleri farklı bölgelere ayrılabilir. Çizelgede gösterilen çan şeklindeki eğrinin altında kalan bölge iki faz içerir ve soğutucu gaz sıvı ve gaz karışımı halindedir. Çizelgede uzanan yatay çizgiler sabit basınç çizgileridir. Sıcaklık çizgileri alt soğumuş bölgede dikey, çan şeklindeki bölgede yatay, aşırı ısınmış bölgede alta doğru eğik şekildedir. Doygun sıvı eğrisinin sol tarafında kalan alt soğumuş bölgede denk gelen basınçta soğutucu gaz sıcaklığı yoğuşma sıcaklığının altındadır. Kuru doygun buhar eğrisinin sağ tarafında kalan alanda soğutucu gaz denk gelen basınçta yoğuşma sıcaklığının üstünde aşırı

ısınmış sıcaklıktadır. Çan şekilli eğrinin altında kalan bölgede kuruluk kesri eğrileri, soğutucu gazın sıvı ve gaz içeriğinin belirlenmesinde faydalıdır.

Basit bir buhar-sıkıştırmalı soğutma sistemi düşünelim. Burada soğutucu gaz genleşme vanasından doygun sıvı olarak girerken doygun buhar olarak terk eder.

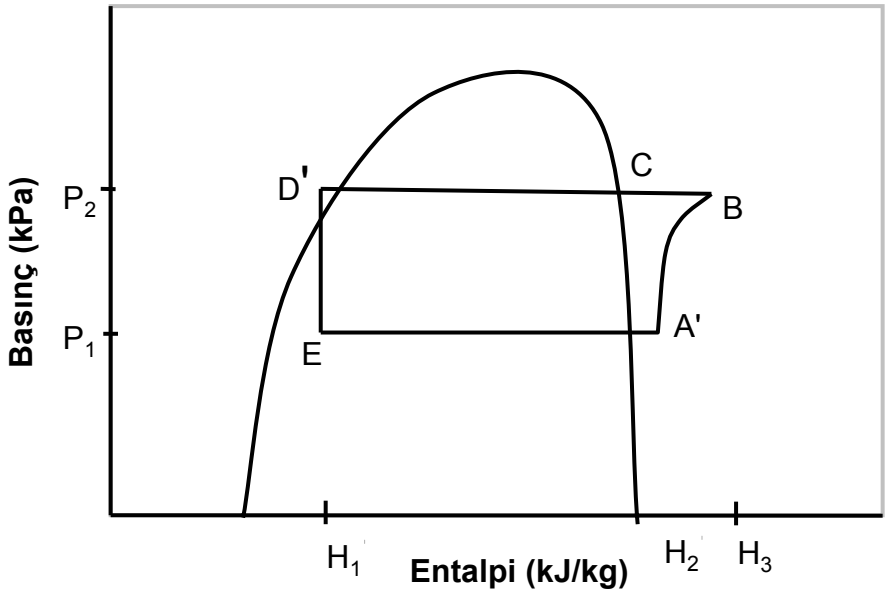


Kompresöre giren kuru doygun soğutucu gazın konumu A noktasında gösterilmiştir. Bu noktada soğutucu gaz P_1 basıncında ve entalpisi H_2'dir. Sıkıştırma (kompresyon) sırasında sabit entropide (izoentropik) soğutucu gazın basıncı P_2'ye yükselir. B noktası aşırı ısınmış buhar bölgesidir. Sıkıştırma sırasında soğutucu gazın entalpisi H_2'den H_3'e yükselir. Yoğuşturucuda önce soğutucu gazın önce aşırı ısısı uzaklaştırılır ve B noktasından C noktasına gelinir, daha sonra ise yoğuşma gizli ısısı uzaklaştırılırarak C noktasından D noktasına gelinir. Doygun sıvı D noktasında genleşme vanasına girer. Soğutucu gaz genleşme vanasından geçtiğinde entalpisi H_1'de sabit kalırken basıncı P_1'e düşer. E noktasında soğutucu gaz sıvı-buhar karışımı halindedir. Soğutucu gazın sıvı-buhar karışımı buharlaştırıcıdaki ısıyı kullanarak tamamen buhar hale geçer. Buharlaştırıcı kısmı E noktasından A noktasına olan yatay çizgi ile gösterilir. Soğutucu gazın basıncı P_1'de sabit kalırken entalpisi H_2'ye yükselir. Ancak gerçek uygulamada yukarıda bahsedilen çevrimden sapmalar görülür.

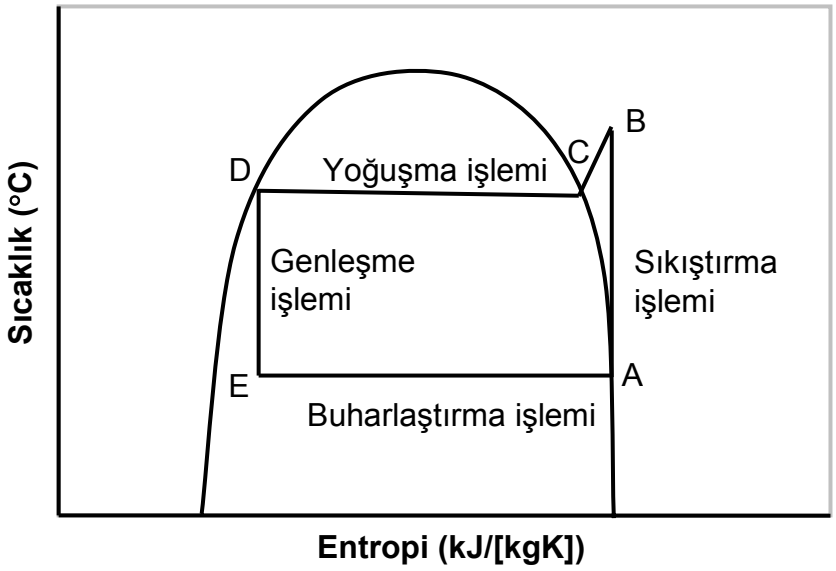
Soğutucu gazın sıvı halde kompresöre girmesini önlemek için soğutucu gaz çıkış noktasına gelmeden önce buharlaştırıcı sarmallarında tamamen doygun buhar haline dönüştürülür. Soğutucu gaz buhara dönüştüğünde eğer hala buharlaştırıcı sarmalları içindeyse sıcaklık farkı nedeniyle çevreden fazladan ısı alır. Böylece soğutucu gaz kompresöre girerken aşırı ısınır. Buharlaştırıcıda basıncı A' noktasında basıncı P_1'de sabit kalır.

İdeal çevrimden bir başka sapma alt soğumuş bölgede görülür. Soğutucu gaz yoğuşturucu ve genleşme vanası arasındaki bölgede alt soğumuş halde olabilir. Alt soğumuş soğutucu gazın basıncı yoğuşturucuda olduğu gibi P_2 basıncında sabit kalır. Alt soğumaya neden olan bir başka sebep soğutucu gazın ısısını kaybederek

tamamen doygun sıvıya dönüşmesine rağmen hala yoğuşturucu sarmallarında kalmasıdır. Basınç-entalpi çizelgesinde alt soğumuş soğutucu gaz D' ile gösterilmiştir.



Daha önce belirtildiği gibi sıcaklık-entropi çizelgeleri de soğutma çevrimini göstermek için kullanılabilir. Şekilde sıcaklık-entropi koordinatlarında soğutma çevrimi çizilmiştir. A'dan B'ye (sıkıştırma) ve D'den E 'ye (genleşme) olan işlemler sabit entropide (izoentropik) gerçekleşir ve dikey çizgilerle gösterilmiştir. C'den D'ye ve E'den A'ya olan işlemler sabit sıcaklıkta (İzotermal) gerçekleşen işlemlerdir ve yatay çizgilerle gösterilmiştir. Kompresörü terk eden aşırı ısınmış buharın sıcaklığı B ile gösterilmiştir.



Basınç-Entalpi Tabloları

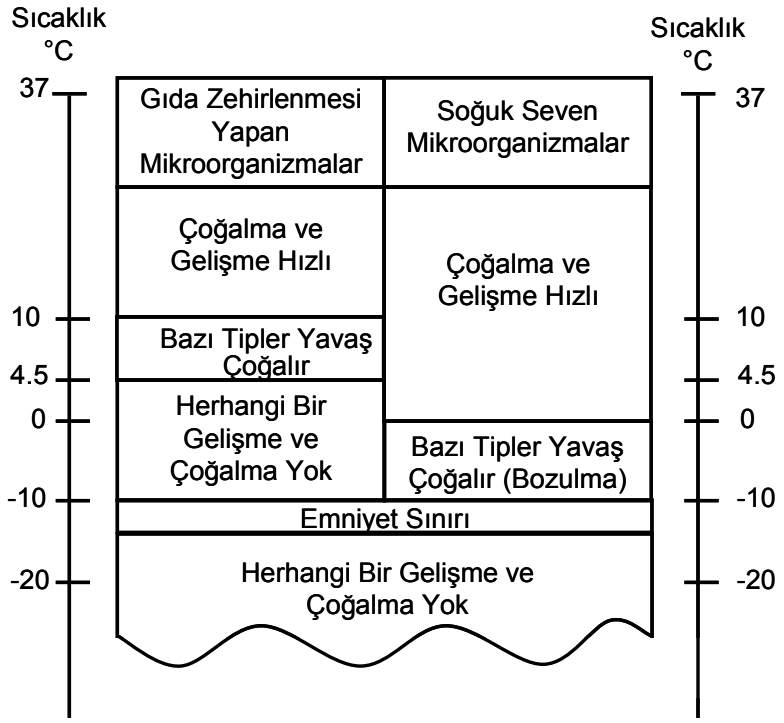
Soğutucu gazın entalpi ve diğer termodinamik özellikleri her bir soğutucu gaz için hazırlanan tablolardan çok daha doğru olarak elde edilebilir. Tabloları kullanmadan önce bir soğutma çevrimi için basınç-entalpi diyagramını çizmek faydalıdır. Örneğin soğutucu gazın amonyak olduğu bir soğutma çevriminde buharlaştırıcı sıcaklığının -20°C ve yoğuşturucu sıcaklığının 30°C olduğunu varsayalım. A noktası doygun buhar durumunu gösterdiğine göre tablodan amonyak için -20°C'deki doygun gaz entalpisi okunur. Buna göre H_2 1437.23 kJ/kg'dir. D noktasında soğutucu gaz yoğuşturucu sıcaklığında doygun sıvı halindedir. Tablodan 30°C'deki amonyağın doygun sıvı halindeki entalpisi (H_1) 341.76 kJ/kg'dir. Her ne kadar farklı durumlar için aşırı ısınmış soğutucu gazların entalpi değerleri için tablolar var ise de birden fazla interpolasyon yapmak gerektiği için bunları kullanmak oldukça zordur. Bu yüzden H_3'ü bulmak için aşırı ısınmış bölgede genişletilmiş çizelgeleri kullanmak daha uygundur. Çizelgeden elde edilen H_3 değeri 1710 kj/kg'dir.

GIDALARIN DONDURULMASI

Su ve Buzun Bazı Fiziksel Özellikleri

Gıdaların hızla bozulmasının en önemli nedenlerinden biri yüksek su içeriğidir. Mikroorganizmalar, gıdaların çoğunda yeterli miktarda "kullanılabilir nitelikte" suyu kolaylıkla bulabilmektedirler. Mikroorganizmalar donmuş sudan yararlanamazlar. Gıdaların dondurulması su aktivitesini azaltır ve kullanılabilir su miktarını düşürür. Bu açıdan bakılınca dondurma ile adeta bir kurutma etkisi sağlanmaktadır. -1°C'deki etin su aktivitesi 0.990 iken, donma sonunda -30°C'ye soğutulması halinde bu değer 0.746'ya düşmektedir.

Soğuğun ikinci ve temel etkisi, belli bir sıcaklığın altında mikrobiyolojik ve biyokimyasal tepkimeleri sınırlamasına dayanır. Gerek gıda zehirlenmesine neden olan mikroorganizmaların, gerekse psikrofilik (soğuk seven) mikroorganizmaların faaliyetleri -10°C nin altında durmaktadır. Dolayısıyla dondurarak muhafazada mikrobiyolojik bozulmanın tam olarak önlenmesi açısından uygulanabilecek en yüksek sıcaklık -10ºC'dir. Bazı mikroorganizmaların -18°C'nin altında dahi çok yavaş bir faaliyet gösterebilmeleri, dondurarak muhafazada benimsenen bu temel ilkenin değişmesine bir neden oluşturamaz. Çünkü, bulaşması dahi küçük bir olasılık olan bu tip mikroorganizmaların dondurulmuş ürünlerde -18°C ile -20°C'lerde belli bir bozulmaya neden olmaları hemen hemen imkansızdır.

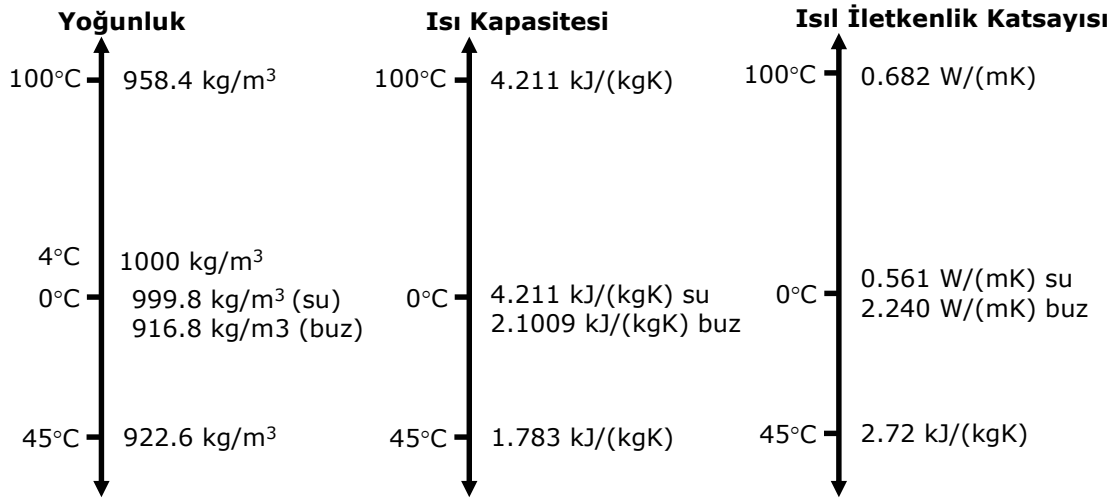


Şekil 1. Mikroorganizma gelişme ve çoğalmasının sıcaklıkla ilişkisi

Gıdaların dondurulmalarında, gıdada bulunan su sıvı fazdan, katı faza dönüşür. Yani donan sadece sudur ve bütün olay bu faz değişimi çevresinde gelişir. Su ve buzun

fiziksel nitelikleri çok farklı olduğundan, donma sonucunda gıdanın fizik özellikleri de değişmektedir.

Yoğunluk: Suyun 4°C'de yoğunluğu 1000 kg/m^3'tür. Suyun sıcaklığı yükseldikçe bu değer azalır. 100°C'de suyun yoğunluğu 9.584 kg/m^3, 0°C'deki suyun yoğunluğu 999.8 kg/m^3 olduğu halde, faz değiştirip donunca yoğunluğu düşer. 0°C'deki buzun yoğunluğu 916.8 kg/m^3'tür. 0°C'deki suyun, 0°C'deki buza dönüşmesiyle hacmi yaklaşık olarak % 8.3 oranında artmaktadır. Bu durum suya özgü bir davranıştır. Buzun sıcaklığı 0°C'nin altına doğru düşerken, diğer maddelerde olduğu gibi hacmi azalır ve buna bağlı olarak yoğunluğu bir miktar yükselir. Örneğin suyun -45°C'deki yoğunluğu 922.6 kg/m^3 düzeyindedir.
Isı Kapasitesi: Suyun 0°C'de ısı kapasitesi 4.2176 kJ/(kg·K) ve buna karşın 100°C ise 4.211 kJ/(kg·K)'dır. Görüldüğü gibi suyun ısı kapasitesi 0-100°C arasında hemen hemen hiç değişmemekte, sabit kalmaktadır. Ancak su donup katı faza dönüşünce ısı kapasitesi yarıya düşmektedir. 0°C'deki buzun ısı kapasitesi 2.1009 kJ/(kg·K) düzeyindedir. Buzun sıcaklığı düştükçe ısı kapasitesi düşer, örneğin -45°C'de 1.783 kJ/(kg·K) düzeyine inmektedir.
Isıl iletkenlik katsayısı: Suyun 0°C'de ısıl iletkenlik katsayısı 0.5610 W/(m·K)'dir. Sıcaklık yükseldikçe ısıl iletkenlik katsayısı da yükselir. 100°C ısı kapasitesi 0.682 düzeyine çıkmaktadır. Ancak su katı faza dönüşünce, ısıl iletkenlik sayısı birdenbire yükselir. Buzun 0°C 'de ısıl iletkenlik katsayısı 2.240 W/(m·K) düzeyinedir. Buna göre buz, ısıyı suya kıyasla 4 kat daha iyi iletmektedir. Buzun sıcaklığı düştükçe ısıl iletkenliği daha da artar (-45°C 'de bu değer 2.72 W/(m·K) düzeyinedir).



Şekil 2. Suyun fiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişimi

Isıl yayınım katsayısı: Bir maddenin ısıl yayınım katsayısı onun ısıl iletkenlik katsayısının, özgül ısısı ve yoğunluğuna oranıdır.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$$

Isı yayılımı'nın birimi ise

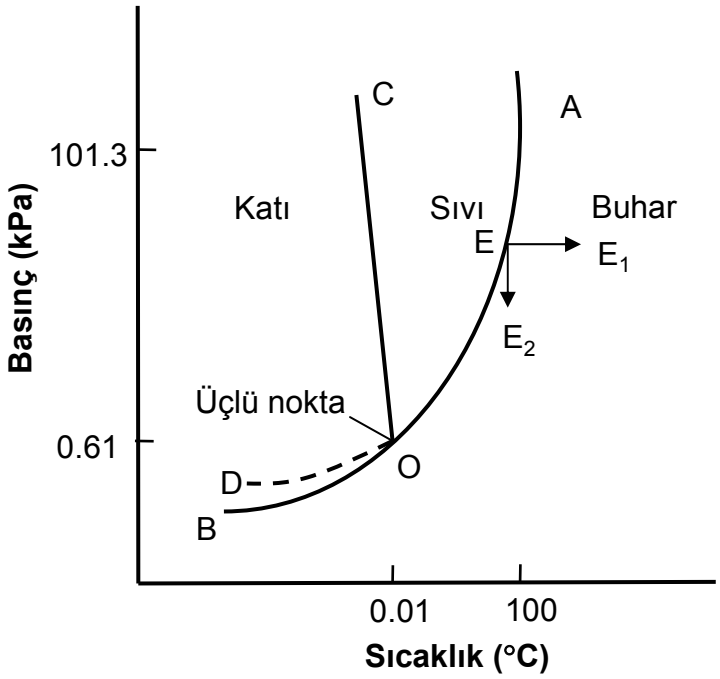
$$\alpha \equiv \frac{m^2}{s}$$

Isıl yayılım; ısıl iletkenlik, ısı kapasitesi ve yoğunluk değerleri yerine yazılarak hesaplanabilir. Isıl yayınım katsayısı yükseldikçe, ısı yayınımı yani; sıcaklığın zamana göre değişimi artar. Metallerin ısıl yayınım katsayıları, sıvı ve gazların ısıl yayınım katsayılarına göre çok yüksektir. Bu nedenle metaller hızla ısınır ve hızla soğurlar. Suyun 0°C'de ısıl yayınım katsayısı 1.31 x10-7 m^2/s, buzunki ise 11.70x10-7 m^2/s'dir. Bu değerlere göre buz, suya nazaran yaklaşık 9 kat fazla bir ısıl yayınım katsayısına sahiptir. Bu, buzun suya göre neden hızla ısınıp-soğuyabildiğinin nedenidir. Gıdaların donma ve çözülme hızlarında farklılığın nedeni de buzun ve suyun ısıl yayınım katsayılarının değişik olmasına bağlıdır.

Entalpi değişimi: Su, basınca bağlı olmaksızın 0°C'de donar. Suyun "donma gizli ısısı" 333.2 kJ/kg'dir. Buna göre 0°C'deki su, 0°C'de buz haline dönerken 333.2 kJ/kg ısı serbest kalır. Böylece, 0°C'deki suyun entalpisi 0°C 'deki buza göre 333.2 kJ/kg daha yüksek olduğu görülmektedir. Buz erirken aynı enerjiyi, yani "erime gizli ısısını" kazanması gerekmektedir.

Suyun faz grafiği: Suyun, sıvı, buhar ve katı (buz) gibi 3 fazının sıcaklık ve basınç ilişkisi bir grafiğe işlenirse; suyun "faz grafiği" elde edilir. Suyun üç fazı arasındaki ilişki ve denge koşulları, sadece donma açısından değil birçok gıda işleme yöntemlerinin daha açık kavranmasını sağlayan önemli veriler taşır. Bu bakımdan suyun faz grafiğinin daha yakından incelenmesi yararlıdır.

Şekil'de gösterilen grafikteki, OA eğrisi "kaynama eğrisi", OC eğrisi "erime eğrisi", OB eğrisi ise "sublimasyon eğrisidir" dir. OD eğrisi suyun aşırı soğumasını simgeler. Her eğri, birbirine komşu iki fazın denge koşullarını gösterir. Örneğin OA eğrisi buhar ve sıvı fazı ayırdığından, bu eğri boyunca her iki faz denge halindedir. Örneğin bu eğri üzerindeki E noktasında sıvı ve buhar fazları belli bir denge halinde bulunur. E noktasındaki basınç-sıcaklık koşullarında su, hem sıvı ve hem de buhar fazında bulunur. Bu koşullar sabit kaldığı sürece ne kadar su buhar haline dönüşürse aynı miktarda buhar da faza dönüşür ve denge değişmez. Buna karşın E noktasının simgelediği basınç düşürülür ve örneğin E_1 noktasına erişilirse (sıcaklık sabit) veya E noktasının simgelediği sıcaklık yükseltilir; örneğin E_2 noktasına erişilirse (basınç sabit) ortamdaki suyun tümü buhar haline dönüşür. Aynı şekilde E noktasındaki basınç yükseltilir veya sıcaklık düşürülürse ortamdaki buharın tümü sıvı faza dönüşür. Benzer irdeleme her üç eğri boyunca yapılabilir.



Şekil 3. Suyun faz diyagramı

Erime (veya donma) eğrisi denen OC eğrisi incelenirse, basınç ne olursa olsun suyun nerdeyse daima 0°C'de donduğu görülür. Bununla birlikte donma eğrisinin hafif sola doğru yatık oluşu, basıncın yükselmesiyle suyun donma derecesinin 0°C'nin biraz altına düştüğünü göstermektedir.

OD eğrisi, aşırı soğumuş suyun buhar basıncını göstermektedir. Bu eğriden anlaşıldığı gibi, aşırı soğutulmuş suyun buhar basıncı, aynı derecedeki buzun buhar basıncından daha yüksektir.

Diğer taraftan sublimasyon eğrisi (OB), buz fazı ile buhar fazının denge koşullarını simgeler. Bu eğri belli koşullar altında, buzun sıvı faza geçmeden de doğrudan buhar fazına geçebileceğini göstermektedir. Bu olguya yani katı fazdan doğrudan gaz fazına geçme olayına "sublimasyon" denir. Gıdaları "dondurarak kurutma" (freeze drying) yönteminin ilkesi bu olaya dayanır. Faz grafiğinde görüldüğü gibi, sublimasyonun gerçekleştiği en yüksek basınç ve en yüksek sıcaklık sıra ile; 0.61 kPa ve 0.01°C'dir. Faz grafiğindeki her eğri "O" noktasında birleşmektedir. Suyun her üç fazının denge halinde bulunduğu bu noktaya "Üçlü nokta" denir. Üçlü noktadaki koşullar, basınç 0.61 kPa ve 0.01°C'dir.

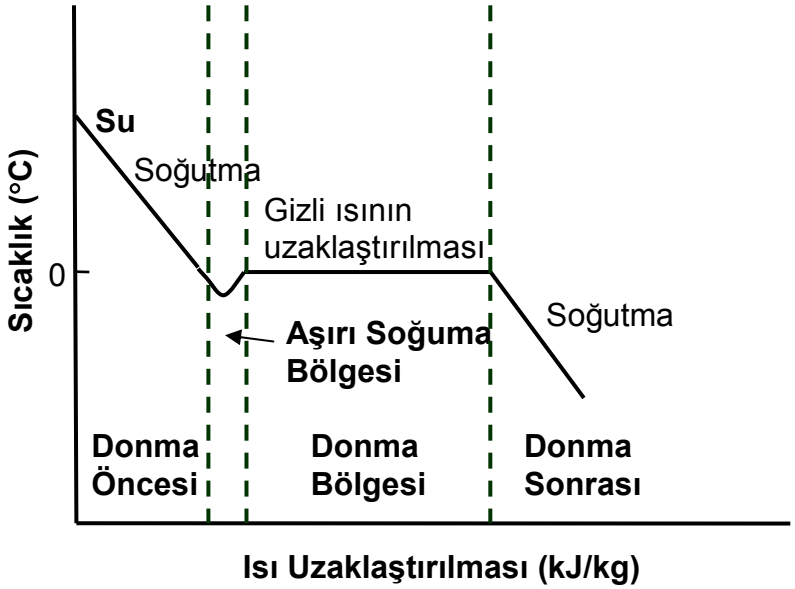
DONMA OLAYI

Sıvı bir maddeden enerji uzaklaştırılması sonucunda, sıvı fazın katı faza dönüşmesi olayına donma denir. Enerjinin uzaklaştırılmasıyla, sıvı fazdaki moleküllerin serbest hareketleri gittikçe yavaşlar ve moleküller kümeleşerek kendilerine özgü düzenli bir yapıya dönüşme eğilimine girerler. Bu, faz değiştirmenin başlangıcına ait ilk işaretlerdir. Saf bir maddenin faz değiştirmesi sadece kendine özgü bir sıcaklıkta gerçekleşebilmektedir. Su için bu sıcaklık, 0°C'dir.

Donma üç aşamada gerçekleşir

1. Donma öncesi soğuma: Gıdanın bulunduğu sıcaklıktan, donma başlangıç derecesine kadar yani suyun kristalleşmeye başladığı ana kadar geçen
2. Donma aşaması: Donma başlangıç sıcaklığından son ötektik sıcaklığa ulaşılana kadar geçen süre
3. Son sıcaklık: Donmanın sona erdiği sıcaklıktan 'dengeleme sıcaklığına' kadar soğuma

Ancak bir sıvının kendi donma sıcaklığına erişmesi faz değişiminin başlamasını sağlamaz. Faz değişiminin başlaması için ortamda "çekirdek" denen bir yapının bulunması gerekir. Eğer ortamda çekirdek bulunmuyorsa, sıvı önce kendine özgü ve donma noktası denen, kritik sıcaklığın altına kadar zorunlu olarak soğur. Donma başlamadan, donma noktası altına doğru soğumaya "aşırı soğuma" denir. Faz değişiminin gerçekleşmesi için, aşırı soğuma dışında ikinci bir koşul daha vardır. Buna göre ortamda ayrıca moleküllerin katı faza dönüşmesine öncülük edebilecek bir yapının bulunması gerekir. Bu, ya sıvının kendi moleküllerinin düzenli bir şekilde kendiliğinden kümeleşerek oluşturduğu kristal yapıdan kaynaklanan küçük bir katı parçacık (çekirdek) olabilir, ya da o sıvının kristal yapısı niteliklerine benzer yabancı bir materyal olabilir. Donan sıvının bizzat kendisinin oluşturduğu çekirdeklenmeye "homojen çekirdeklenme" denir. Homojen çekirdeklenme ancak yabancı bir madde içermeyen sıvılarda, o sıvının donma derecesinin altında soğumasıyla gerçekleşir. Diğer taraftan ortamdaki yabancı bir parçacığın önayak olduğu, yani katalize ettiği çekirdeklenmeye ise "heterojen çekirdeklenme" denir.



Şekil 4. Suyun donma diyagramı

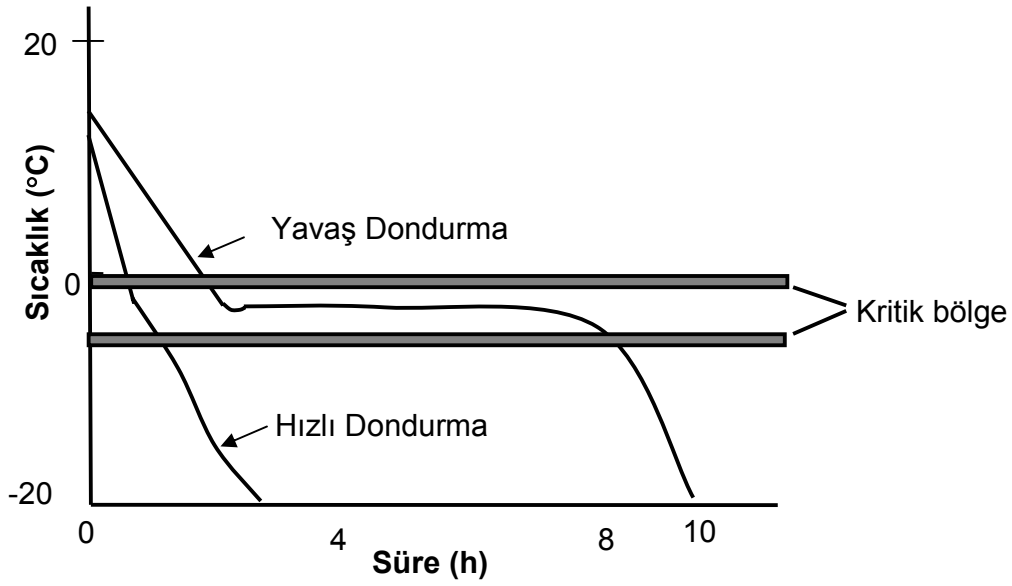
Homojen çekirdeklenmede oluşan kristal çekirdeği, eğer kritik bir boyuttan daha büyükse, sıvıdaki diğer moleküller bununla kendiliğinden birleşerek çekirdeklerin irileşmesini yani kristallerin büyümesini sağlarlar. Kritik çekirdek boyutu sistem sıcaklığının bir fonksiyonudur. Yüksek ısı aktarım hızı ile ortamdan ısının

uzaklaştırılması çok sayıda çekirdeğin oluşumasına neden olur. Bu yüzden hızlı dondurma çok fazla sayıda küçük buz kristali oluşturur.

Tablo 1. Seçilmiş bazı gıdaların su içeriği ve donma noktaları

Gıda	**Su içeriği (%)**	**Donma noktası (°C)**
Sebzeler	78-92	-0.8 ile -2.8 arası
Meyveler	87-95	-0.9 ile -2.7 arası
Et	55-70	-1.7 ile -2.2 arası
Balık	65-81	-0.6 ile -2.0 arası
Süt	87	-0.5
Yumurta	74	-0.5

Suyun, sıvı fazdan katı faza geçmesiyle gerçekleşen donma olayı sonucunda serbest kalan enerji (donma gizli ısısı), donmakta olan kitlenin ısınmasına neden olur. Ancak serbest kalan bu enerji soğutucu ortam tarafından uzaklaştırıldığı sürece donan kitlenin sıcaklığı tüm materyal donana kadar donma noktasında, yani 0°C'de, sabit kalır. Yukarıda değinildiği gibi donma sırasında sıvı ve katı karışımından oluşan bu sistemden enerji çekildikçe, sıvı fazdaki moleküller kristal yüzeyleriyle kendiliğinden birleşerek kristalizasyon olayı sabit sıcaklıkta devam eder. Bu olay suda, uzun iğne şeklindeki kristallerin, sıvının içerisine doğru uzayarak gelişmesi şeklinde gerçekleşir. Donma sırasında oluşan kristallerin boyutu donma hızına bağlıdır. Sıvıdan ısının çok hızlı uzaklaştırılması halinde, sıcaklık donma noktasının oldukça altına düşerken, aynı anda kendiliğinden birçok çekirdek oluşabilmektedir. Fakat oluşan bu çekirdeklerin her biri, ancak küçük boyutlu bir kristal oluşturacak kadar büyüyebilmektedir.



Şekil 5. Kritik bölge boyunca gıdadaki sıcaklık değişimi

Buz kristallerinin büyümesi donma işlemi boyunca özellikle kritik bölgenin geçilmesi sırasındaki ısı aktarım hızına bağlıdır. Bu yüzden kritik bölgenin geçilmesi sırasında geçen süre gıdada oluşan buz kristallerinin sayısını ve büyüklüğünü belirler.

Diğer taraftan hızlı dondurma ile oluşmuş küçük buz kristalleri ancak düşük sıcaklıklarda kararlı kalabilir. Eğer ortam sıcaklığı yükselirse, küçük kristaller kaybolurken biraz daha büyük olanlar daha da büyürler. Bu olay, sistemin ulaştığı yeni sıcaklıkta tüm kristallerin kararlı kalabileceği bir boyuta ulaşana kadar devam eder. Bir kısım kristallerin, küçük kristaller aleyhine bu şekilde büyümesine rekristalizasyon denir ve bu tür rekristalizasyon "Ostwald olgunlaşması" olarak anılır. Sıvı gıdaların dondurularak konsantrasyonunda Ostwald olgunlaşması olayından yararlanılmaktadır.

DONDURMA YÖNTEMLERİ

Bir gıdanın dondurulması, gıdadaki ısı enerjisinin bir soğutucuya (soğutma ortamı, frizant) aktarılarak uzaklaştırılması yoluyla sağlanır. Soğutucu; gaz, sıvı veya katı halde bulunabilir.

Soğutucu gaz olarak, genellikle bir soğutma ekipmanının buharlaştırıcısı yardımıyla soğutulan soğuk hava kullanılır. Bu tip soğutma yöntemine "soğuk hava ile dondurma" denir.

Sıvı soğutucu olarak yine bir soğutma ekipmanında soğutulmuş şeker şurubu, salamura veya gliserol çözeltisinden yararlanılır. Gıda maddeleri bu sıvılara daldırılarak dondurulduğundan bu yönteme "daldırılarak dondurma" denir. Dondurmada sıvılaştırılmış azot kullanıldığında, bu sıvılaştırılmış gazın bir soğutma ekipmanında soğutulmasına gereksinim bulunmamakta, kendi fiziksel nitelikleri ile soğutucu görevi yapabilmektedir. Bu yüzden sıvılaştırılmış gazlara daldırılarak yapılan dondurmayı, "daldırılarak dondurma" yönteminden ayırmak için, buna "kriyojenik dondurma" yöntemi denir. Kriyojenik dondurmada, daldırmadan çok püskürtme (sprey) şeklinde uygulama daha yaygındır.

Katı soğutucu olarak genellikle, içten soğutulan metal plakalar kullanılmakta ve gıda maddesi bu plakalar üzerinde dondurulmaktadır. Bu yöntemde gıda maddesi, soğutucu ortamla doğrudan temas etmemekte, arada plaka bulunmaktadır. Bu nedenle bu yönteme "dolaylı temasla dondurma" denir. Dolaylı temasla dondurmada hemen daima plakalı düzenler kullanıldığından buna "plakalı dondurma" yöntemi de denmektedir.

Dondurucular genel olarak ikiye ayrılır

- Mekanik dondurucular
- Kriyojenik dondurucular

Dondururma hızlarına göre de dondurucular 4 farklı sınıfa ayrılabilir

- Yavaş dondurucular (0.2 cm/h)
- Hızlı dondurucular (0.5-3 cm/h)
- Çok hızlı dondurucular (5-10 cm/h)

- Aşırı hızlı dondurucular (10-100 cm/h)

Hangi yöntemle gıdanın dondurulacağı gıdanın donmadan önce ve donduktan sonraki özelliklerine bağlıdır.

Soğuk Hava ile Dondurma

En yaygın uygulanan, değişik cihazlardan yararlanılan ve birçok modifikasyonu olan en eski yöntem soğuk hava ile dondurmadır. **Durgun havada dondurma** ve **hava akımında dondurma** olarak başlıca iki farklı uygulaması vardır.

Birçok olumlu yönü nedeniyle dondurma teknolojisinde en yaygın olarak kullanılan dondurma metodu soğuk hava ile dondurma yöntemidir. Ancak soğuk hava dondurma metodunun bazı olumsuz tarafları da vardır. Bu yöntemin olumsuz yönlerinden biri, ambalajsız ürünlerde nem kaybıdır. Soğuk hava ile dondurmada, ürünün üzerinden, hatta parçacık ve danecik halinde olanların arasından, yüksek hızda soğuk hava geçirilmektedir. Ancak ne kadar soğuk olursa olsun havanın, mutlaka bir kurutma potansiyeli vardır. Çünkü ürünün kuruması, kendini çevreleyen havanın nem içeriğine bağlıdır ve sıcaklık ikinci derecede ve dolaylı etki eden bir faktördür. Eğer ıslak bir maddenin su buharı basıncı, kendini çevreleyen havanın su buharı basıncından yüksekse yani havanın nemi düşükse, sıcaklık ne olursa olsun daima bir buharlaşma ve bu bağlı olarak su kaybı gerçekleşir. Ambalajsız ürünlerin hem dondurulması sırasında ve hem de depolanması süresince, soğuk havanın nem düzeyine bağlı olarak ürün, az veya çok su kaybeder. Ürünün daha sıcak olduğu donma başlangıcında su kaybı çok daha fazladır. Dondurulan ürünün su kaybetmesi iki önemli soruna neden olur. Bunlardan biri kaybedilen su miktarına göre üründe kalite düşmesine neden olan fizik değişmelerin belirmesi, digeri ise buharlaştırıcı borularının karlanmasıdır.

Durgun havada dondurma:

Metodun isminden de anlaşıldığı gibi, dondurmada kullanılan soğuk hava, hareketsizdir. Böyle bir dondurucunun esası, iyi izole edilmiş bir soğuk odadır. Soğutma ekipmanının buharlaştırcısı, tavanda, duvarda veya odanın ortasında yukardan aşağıya doğru uzanan borular demeti şeklinde bulunabildiği gibi dikine raflar şeklinde de olabilir. Dondurulacak ürünler bu raflar arasında istif edilir. Bu tip dondurucular, kullanılan ekipman açısından basit ve ucuzdur. Durgun hava dondurma odalarında genellikle hava hareket sağlayan hiçbir düzen yoktur. Hava, sadece doğal taşınım sonucu harek eder. Bazı durgun hava dondurucularında bir fan yardımıyla, sınırlı bir hava ,hareketi sağlansa da düşük hava hızı nedeniyle böyle bir düzenlemeyi "hava akımında dondurma" yöntemiyle karıştırmamak gerekir. Çünkü hava akımında dondurmada hava, zorlamalı bir sirkülasyonla yüksek bir hızla dolaştırılarak, yüksek bir donma hızı sağlanabilmektedir.

Durgun havada dondurma yönteminde soğuk odanın sıcaklığı -20°C ile -30°C arasında bulunur. Hareketsiz veya çok yavaş hareketli bir hava ile dondurulan materyalin yüzeyi arasında sağlanan ısı transfer katsayısı çok düşük olduğundan, dondurulmak üzere depoya konan gıda maddesinin donması çok uzun sürmektedir

bu yüzden ekonomik bir yöntem değildir ve gıdada kalite kaybına yol açar. Donma süresi dondurulan materyalin büyüklüğüne, ambalajın niteliğine, dondurulan birimler arasındaki boşluğa ve bunun gibi değişik faktörlere bağlı olarak birkaç saatten bir haftaya kadar değişebilir.

Hava akımında dondurma:

Bu tip dondurucuların genel ilkesi soğuk havan dondurulan gıda maddesi ile buharlaştırıcı arasında hızla dolaşmasıdır. Güçlü fan yardımıyla hareket ettirilen hava, soğutma spiralleri (evaporatör) üzerinden geçerken soğur ve sonra dondurulan ürün üzerinden 1.5 - 10 m/s hızla geçer. Isı aktarım katsayısı hava hızına bağlı olarak arttığından, gıda maddesinin ani dondurulması sağlanır.

Soğuk Depo: Et karkasını dondurmak, diğer yöntemlerle dondurulan gıdaları depolamak ve dondurma retiminde sertleştirme odası olarak kullanılırlar. Tekdüze bir sıcaklık dağılımı sağlamak amacıyla hava genellikle için fan yardımıyla dağıtılır. Ancak bu yöntemde ısı aktarım katsayısı düşüktür.

Soğuk odalarla ilgili en büyük sorun havadan gelen nem veya ambalajlanmamış gıdadan gerçekleşen su kaybı sonucu duvarda, tabanda ve buharlaştırıcı borularında oluşan karlanmadır. Karlanma verimi düşürür, daha fazla enerji kullanımına yol açar ve çalışanlar için kayganlaşan zemin nedeniyle tehlikeli bir çalışma ortamı oluşturur. Belli aralıklarla buharlaştırıcı borularındaki karın temizlenmesi (defrost) gerekir.

Hava dolaşımlı dondurma (air blast freezing): Gıdanın üzerinden sıcaklığı -30°C ile -40°C arasında değişen ve 1.5 - 6m/s hızdaki hava geçirilmektedir. Yüksek hava hızı etkisiyle gıdayı çevreleyen sınır tabakasının kalınlığı düşer ve ısı aktarım katsayısı yükselir. Kesikli sistemlerde gıda tepsilere yerleştirilerek oda veya dolaplara konur. Sürekli sistemlerde dondurulacak ürün ya bir bantla, veya üst üste yerleştirilmiş tepsilerle doldurulmuş vagonlarla taşınarak yalıtımılı bir tünel içinden geçirilir. Bant veya vagonların tüneldeki hızı, donma süresine göre ayarlanır.

Dondurulan ürün ile soğuk havanın tünel içindeki hareketleri paralel veya zıt olabilir. Aynı sistem kurutma işleminde sıcak hava kullanılarak uygulanır. Zıt akımlı tünellerde dondurulacak ürün, tünelin bir tarafından, soğuk hava ise diğer ucundan verilir. Buna göre sıcaklığı en düşük hava, tünel çıkışında donmuş ve sıcaklığı çok düşmüş ürünle karşılaşır ve sonra tünel girişine doğru yoluna devam eder. Böylece bu sistemde donma, aşamalı olarak gerçekleşir ve donma süresince herhangi bir noktada ürünün sıcaklığının yükselmesi söz konusu değildir. Ancak bu tip uygulamada soğuk hava, tünelin karşı ucuna yani, ürün giriş ucuna ulaşana kadar ısınır ve sıcaklığı yükselir. Kısmen ısınmış bu hava, tekrar buharlaştırıcıya dönerek yeniden soğutulur. Ancak bu durumda buharlaştırıcı sıcaklığı ile havanın sıcaklığı arasındaki fark (ΔT) çok büyümüş olacağından, buharlaştırıcılarda hızlı ve devamlı bir karlanma belirir. İşte, özellikle uzun tünellerde sıkça karşılaşılan bu sakınca nedeniyle, tünellerde hava hareketi ürün hareketine çapraz olarak düzenlenir, yani; hava tünelin yanlarından verilir. Böylece, havanın hareke çok kısa mesafede gerçekleştiğinden, fazla ısınmaz ve (ΔT) değerinin büyüme sakıncası ortadan kalkar.

Bazı tünellerde soğuk hava, bant boyunca hem alttan ve hem üstten verilir. Bu uygulamada havanın tüneldeki dağılımı kusursuzdur. Ancak genellikle soğuk hava, bandın altından yukarı doğru üflenir. Bu üfleme ile bant üzerindeki madde, hava hızı

ve parçacık iriliğine bağlı olarak hafif bir titreşim kazandığından donma hızı yükselir. Fakat bu sınırlı vibrasyon, dondurulan parçacıkların birbirine yapışmaksızın bir kitle haline dönüşmeden donmalarını sağlamaz.

Hava dolaşımlı dondurucular göreceli olarak ekonomik, az yer kaplayan, yatırım maliyeti düşük ve farklı büyüklükteki ve şekildeki gıdaların (ambalajlanmış haldeki kanatlı etleri, kırmızı et, dondurma, hazır yemekler) dondurulması için uygun dondurucular dır. Ancak büyük hacimlerdeki havanın tekrar tekrar sistemden geçirilmesi, ambalajlanmamış veya bireysel hızlı dondurulmuş (Individually Quick Freezing-IQF) ürünlerde %5 kadar su kaybına, don yanığına (freezer burn) ve oksidatif değişmelere neden olmaktadır. Ürünün kaybettiği su, buhar olarak havaya karışır. Nem düzeyi artmış hava, buharlaştırıcı borularına ulaşınca, nemin bir kısmı bu borular üzerinde yoğunlaşıp kar halinde toplanır. Ambalajsız olarak dondurulan ve depolanan ürünlerin su kaybetmesinin en önemli olumsuz sonuçlarından birisi budur. Karlanma sonucu buharlaştırıcının soğutma gücü azalır ve sık sık karın çözülmesi (defrost) için, evaporatörün devre dışı bırakılması gerekir.

Donmanın gerçekleşmesinden sonra yüzeyden süblimasyon yoluyla oluşan su kaybı, ürün yüzeyinde don yanığı denen lekelerin belirmesine neden olur. Don yanığı, dondurulmuş ürünün görünüşüne ait kalite kriterlerine önemli düzeyde olumsuz etkide bulunduğu gibi besin değerinin düşmesine de neden olmaktadır. Don yanığı, donmuş üründen buzun süblimasyonla uzaklaşması yoluyla oluştuğundan geride oksijenin derinlere doğru sızabileceği gözenekli bir yapı kalır ve böylece gıda madde oksidatif değişmelere daha elverişli bir hale gelir. Geriye dönüşü olmayan (irreversible) bir değişim olan don yanığı, dondurulmuş ürün üzerinde önce parlak, sonra oksidasyon sonucu esmerleşmiş benekler halinde görülür.

Ürünün su kaybı ileri düzeyde olmasa bile, çilek gibi bazı parlak görünü ürünlerde mat bir görüntüye neden olması da önemli bir olumsuzluktur. Ürünün su kaybı ayrıca bir ağırlık azalmasına neden olduğundan (özellikle fiyatı yüksek et gibi ürünlerde) işletmenin para kaybetmesine yol açar.

Ürünün su kaybını sınırlamak, don yanığını önlemek veya en düşük düzeyde tutmak amacıyla, çeşitli önlemler alınabilir. Bunların en kesin ve önemlisi, şüphesiz dondurulacak materyalin dondurmadan önce ambalajlanmasıdır. Ancak bu önlem IQF gibi bir yöntemde olanaksız olduğu gibi, diğer yöntemlerde ambalajın ısı transferini engellemesi yüzünden donma süresinin çok uzamasına neden olmaktadır.

Su kaybını önlemede diğer bir yöntem, dondurulan ürünün henüz sıcak olduğu ve bu sebeple fazla su kaybettiği donma başlangıcında, nem oranı çok yüksek olan yaklaşık -4°C, -5°C'lerdeki soğuk hava ile soğutulmasıdır. Böylece bu ön soğutma ile su kaybı açısından kritik bir nitelik taşıyan bölge, sorunsuz olarak aşıldığından; ikinci aşamada daha soğuk hava ile karşılaşan ürün süratle donar ve donma kısa sürede gerçekleştiğinden nem kaybı azalır. Hava akımlı dondurucularda bazen, "ön soğutma" ve "dondurma" gibi iki bölme bulunmaktadır.

Ürünün su kaybını önlemede kullanılan bir diğer yöntem ise, ön soğutma ile ürünün ıslatılmasının beraberce uygulanmasıdır. Bu işlemde dondurulacak ambalajsız ürün, önce ıslatılır ve sonra ön soğutma bölgesinde hafifçe dondurulur. Bu sırada yüzeyde, ince bir buz tabakası (glaze) oluşur. İnce buz tabakası ile kaplanmış parçacıklar,

dondurma sırasında bir miktar nemi süblimasyonla sadece bu tabakadan kaybeder. Ürünü su kaybından koruyan bu işlem, balıkların dondurulmasında uygulanmaktadır.

Dondurulan ürünün su kaybını azaltan önlemlerin çoğu, aynı zamanda buharlaştırıcı borularının karlanmasını da sınırlamaktadır. Bununla birlikte karlanmayı azaltan diğer bazı önlemler de vardır. Bunlardan en etkini, buharlaştırıcı sıcaklığının, sistemdeki soğuk hava sıcaklığından sadece birkaç derece düşük olmasıdır. Yani buharlaştırıcı ve soğuk hava sıcaklıkları arasındaki fark (ΔT) en çok 5-10°C olmalıdır. Bu ise, buharlaştırıcı yüzey alanının yeterli büyüklükte seçilmesiyle sağlanabilmektedir. Ancak bunun sağlanması aynı zamanda soğuk havanın kısa bir mesafede hareket ederek, buharlaştırıcıya fazla ısınmadan dönmesini de zorunlu kılmaktadır. Uzun tünellerde, soğuk havanın tünelin bir ucundan verilerek diğer ucuna ulaştıktan sonra buharlaştırıcıya dönmesi ΔT'nin büyümesine ve buharlaştırıcının aşırı karlanmasına neden olduğundan bu tünellerde soğuk hava çapraz olarak verilmelidir.

Bantlı (Spiral) Dondurucular: Gıda spiral katlı olarak düzenlenmiş ağ yapılı,esnek ve kesintisiz bir bant ile soğutulmuş odadan geçirilir. Soğuk hava veya sıvı azot damlacıkları zıt yönlü akışla bantlı dondurucuya verilerek gıdanın buharlaşma sonucu nem kaybı en aza indirilir. Spiral dondurucular göreceli olarak az yer kaplar ve yüksek ürün işleme kapasitesine sahiptir. Otomayik yükleme ve boşaltma, düşük bakım maliyeti ve farklı şekil ve özellikte bir çok gıdanın (pizza, turta, dondurma, balık, parçalanmış tavuk) dondurulmasına uygun bir yöntem olması diger avantajlarıdır.

Akışkan Yatak Dondurucu (Fluidized Bed Freezer): Günümüzde, birçok ürünün bir blok haline gelmeden tek tek parçalar halinde dondurulması istenmektedir. Bu nedenle, bantlı donduruculardan, bandın altından verilen çok yüksek hızlı havanın, bant üzerindeki parçacıkları adeta havada yüzer halde tutmasına dayanan akışkan yatak dondurucu (fluidized bed freezer) denen farklı bir sistem geliştirilmiştir. -25°C ile 35°C sıcaklıktaki soğuk hava yüksek hızda (2-6m/s) 2-13 cm kalınlıkta yerleştirilmiş gıdanın dondurulmasında kullanılır. Akışkan yatak donduruculardа, hava içinde yükselen ve geri düşen adeta kaynamaya benzer bir hareket yapan parçacıkların her biri, tüm yüzeylerinden soğuk hava ile tam olarak temas sağlayarak süratle donarlar.

Akışkan yatak donduruculardа ısı aktarım katsayısı yüksektir ve diğer hava dolaşımlı dondurma sistemlerinin hiçbirinde ulaşılamayan hızlı bir dondurma gerçekleşebilmektedir. Donma işleminin hızlı gerçekleşmesi sayesinde ürünün nem kaybı düzeyi düşüktür ve dolayısıyla buharlaştırıcı borularında daha az karlanmayan neden olur. Topaklanma eğilimindeki meyve veya diğer gıdaların ince bir buz tabakası ile kaplanması (glaze) topaklanmanın önlenmesinde etkilidir. Yöntemde sadece hızlı bir donma sağlanmakla kalmayıp, ayrıca her parça ayrı ayrı donduğundan; ürünün bir blok haline dönüşmesi önlenmiş olur. Bu şekilde her parçacığın ayrı ayrı donmasına bireysel hızlı dondurma (Individually Quick Freezing-IQF) denir. Akışkan yatak dondurma sisteminde bir ürünün dondurulabilmesi için, ürünün belli bir hava akımında akışkanlık kazanabilecek kadar küçük taneler veya parçalar halinde bulunması gerekir. Başka bir ifadeyle bir parçacıkların akışkanlık kazanabilmesi, parçacık iriliği ile hava hızına bağlıdır.

Akışkan yatak dondurma yöntemi belli şekil ve büyüklükteki gıdalar için uygundur. Bamya ve bezelye gibi sebzelerle, çilekgillere, kiraz, vişne ve tanelenmiş çekirdeksiz

üzüm gibi bütün haldeki meyvelerle, dilimlenmiş şeftali, armut, elma, yarıya bölünmüş kayısılara ve kuşbaşı şeklinde doğranmış etlere ve karidese başarı ile uygulanmaktadır. Ayrıca doğranmış her türlü sebze, örneğin doğranmış yeşil fasulye, küp şeklinde kesilmiş havuç ve patateslerle, halka şeklinde doğranmış soğan ve havuçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

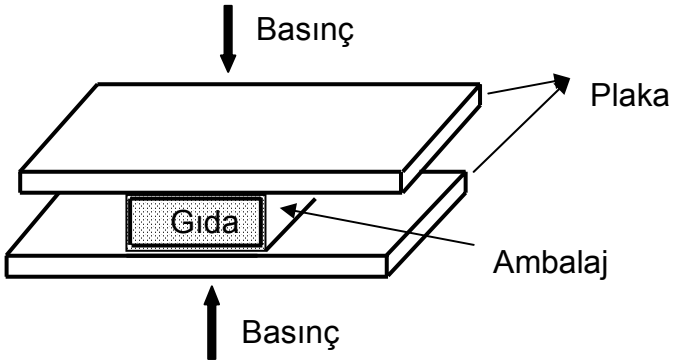
Bu yöntemde donma süresi çok kısa olup, bu süre, parça iriliğine göre 3-15 dakika arasında değişmektedir. Örneğin bezelyeler 3-6, doğranmış fasulyeler 5-12, küp şeklinde doğranmış havuçlar 5-6, bütün haldeki körpe ince havuçlar (baby carrot) 9-10 ve çilekler 9-13 dakikada dondurulabilmektedirler. Bu değerler, akışkan yatak donduruculardа 5-10 cm/h'lık bir donma hızına erişilebildiğini göstermektedir. Halbuki, diğer soğuk hava akımında dondurma sistemlerinde donma hızı, 1-3 cm/h dolaylarında kalmaktadır.

Soğuk Yüzey Donduruculаr

Plakalı Donduruculаr: Bu metodun ilkesi, içten soğutulan iki plaka arasına yerleştirilmiş ambalajlı ürünlerin, plaka ile teması sonucu dondurulmasıdır. Dondurulan ürün ile soğumayı gerçekleştiren soğutucu ortam arasında plaka bulunduğundan bu yönteme **dolaylı temas yöntemiyle dondurma** da denir. Evlerde buz dolaplarının buzluk bölmesinde bazı gıdaların dondurulması, tek taraftan etki eden bir plakalı dondurma yöntemi olarak düşünülebilir.

Gıdaların plakalı donduruculаr dondurulmasında ürünün geometrik şekli sınırlayıcı bir faktördür. Dondurulacak ürün ince veya dikdörtgen prizması şeklinde olmalıdır. Ambalajlı ve fakat şekilsiz bir kitle bu sistemde dondurulamaz. Ambalajli ürünün düzgün bir yüzeyle plakaya tam olarak temas etmesi, donma süresi açısından çok önemlidir.

Plakalar dört köşe, içi boş yatay veya dikey olarak düzenlenmiş raflardan ibaret olup, içinden -40°C'deki soğutucu akışkan pompalanır. Plakalı donduruculаr kesikli, yarı sürekli ve sürekli olarak tasarımı yapılabilir. En yaygın plakalı donduruculаr, çoklu plakalı dondurucu tipinde olanlardır. Bunlarda, iyi izole edilmiş bir kabin içinde, raf şeklinde bir çok plaka üst üste yer almaktadır. Düz ve göreceli olarak ince gıdalar plakalar arasına tek tek sıra olarak dizilir raf dizisi hidrolik bir düzenle hafif bir basınçla (0.05-0.1 bar) yavaş bir şekilde sıkıştırılır. Plakalı donduruculаrın etkinliği, plaka ile gıda arasındaki temas derecesine bağlı olduğundan, bu sıkıştırmanın büyük önemi vardır. Yine aynı nedenle, ambalajların, içinde boşluk kalmaması gerekir. Et ve balık gibi ambalaj içinde bütün bir kitle oluşturan ürünlerin, aralarında boşluk kalan parçacık halindeki sebze ve meyvelere göre daha çabuk donmasının nedeni de budur. Ancak plakaların sıkıştırılması sırasında fazla basınç uygulanmasını ve ambalajların patlamasını önlemek için plakalar arasına iki taraflı boydan boya standart kalınlıkta mesafe ayarlayıcı engeller yerleştirilir. Bu engelleyicilerin kalınlığı, ambalajlanmış ürün kalınlığından sadece çok az kısa olduğundan, sıkıştırma ancak bu kalınlığa kadar gerçekleşir.



Şekil 6. Plakalı donduru

Sürekli temas bant donduruculardа sıvı gıda, biri altta diğeri üste yer alan paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş sonsuz iki bant arasına sandviç gibi alınarak dondurulmaktadır. Alttaki bant oluklu olup, sıvı gıda buraya yayılırken üstteki bant düzdür. Bantların birlikte hareketiyle, aralarındaki sıvı gıda hem ileriye doğru taşınır ve hem de bu sırada bantların soğuk yüzeyi etkisiyle donarlar. Bantlar birbirinden ayrılırken, sıvı gıda şekillendirmeye izin verecek yapıda donmuştur ve bu aşamada bir şekil verme işleminden geçirilerek (örneğin palet haline getirilerek) sistemi terkeder. Bu tip dondurucular, meyve ve sebze pulpları çorbalar ve çeşitli soslar gibi sıvı-yarı sıvı ürünlerin dondurulmasında kullanılmaktadırlar.

Ekonomik olması, az yer kaplaması, göreceli olarak işletme maliyetinin düşük olması, üründen çok az su kaybı olması ve buna bağlı olarak buharlaştırıcı borularında daha az karlanma olması ve yüksek ısı aktarım hızı elde edilmesi plakalı donduruculаrın olumlu yönleridir. avantajlarıdır. Yüksek yatırım maliyeti ve sınırlı ürün şekli (dikdörtgen veya oldukça ince) başlıca olumsuz yönleridir.

Kazıyıcı Yüzey Dondurucular: Sıvı ve yarı sıvı gıdaların (dondurma gibi) dondurulmasında kullanılır. Bu amaçla kullanılan soğutulmuş yüzey, silindir şeklinde olup, dıştan yalıtılmıştır. Kurutma veya sterilizasyon işleminde kullanılan ekipmanla tasarımı aynıdır, ancak amonyak, salamura çözeltisi veya diğer soğutucu akışkanlarla soğutulur. Soğutucuya verilen sıvı veya yarı sıvı haldeki ürün, silindirin iç yüzeyine çok ince bir film oluşturacak şekilde yayılır. Mil üzerindeki kazıyıcı kanatlar donan gıdayı yüzeyden kazıyarak bu işlemin sürekli olmasını sağlar. Donma çok hızlıdır ve gıdadaki suyun %50'si birkaç saniye içinde donar. Dondurucuya sıvı veya püre halinde verilen ürün burayı terk ederken, sıvı-kar karışımı halindedir. Böyle bir sistemde daha ileri düzeyde bir dondurma sistemi tıkayacağı için doğru değildir. Sıvı-kar karışımı halindeki bu kitle, ambalajlandıktan sonra ikinci aşama olarak soğuk hava donduruculаrında istenen dereceye kadar dondurularak depolanır. Endüstride dondurma (ice cream) üretimi bu yöntemle gerçekleştirilmektedir.

Soğuk Sıvı Dondurucular

Daldırılarak Dondurma: Bu yöntemde dondurulacak ürün, ambalajlanmış veya ambalajlanmamış olarak düşük derecelere kadar soğutulmuş uygun bir sıvıya (frizant) daldırılmakta veya bu sıvı, ürün üzerine püskürtülmektedir. Ürünün ambalajlı olması durumunda soğutucu ile soğutulan arasında bir engel (ambalaj materyali)

bulunduğundan, bu tip daldırarak dondurma uygulaması bazılarınca dolaylı temas yöntemi olarak kabul edilmektedir.

Gıdaların daldırılarak dondurulmalarında, gıda maddesi ile soğutucu sıvı arasında kusursuz bir ısı iletimi sağlanmakta ve böylece hızlı bir donma gerçekleşmektedir. Dondurmada yüksek ısı aktarım hızına ulaşılması, daha az masraflı ve güvenli bir uygulama olması, dondurulan gıdanın nem kaybetmemesi ve soğuk havada dondurmada olduğu gibi bir defrost sorunu bulunmaması bu yöntemin olumlu yönleridir. Buna ek olarak belirgin bir şekli olmayan birçok ürünün bu yolla başarı ile dondurulması olanaklıdır. Ayrıca parçacık halindeki ürünler bu yöntemle bireysel olarak dondurulabilmektedirler. Örneğin, soğuk şeker şurubuna daldırılarak dondurulan meyveler, ince bir şurup filmiyle kaplanarak tek tek donduklarından bunlar depolamada, renk ve aromalarını daha iyi korumaktadırlar. Ayrıca soğuk hava akımında dondurmada olduğu gibi, hava ile sürekli bir temas sözkonusu olmadığından oksidatif değişmelere uğramamakta ve özellikle oksidasyona duyarlı ürünlerde iyi sonuç alınmaktadır.

Tablo2. Daldırarak dondurmada kullanılan bazı sıvıların donma noktaları

Çözünmüş madde	Konsantrasyon (%)	Donma Noktası (°C)
NaCl	5.7	-3.3
	11.5	-7.8
	17.2	-13.5
	23.0	-21.6
$CaCl_2$	7.4	-3.7
	14.7	-10.0
	22.1	-22.3
	29.5	-51.1
Gliserin	16.8	-3.6
	33.5	-11.7
	50.2	-23.3
	67.0	-51 .4
Etanol	19.1	-10.0
	38.1	-27.8
	57.2	-42.8
	76.3	-70.0

Sıvı dondurucu denen bazı maddelerin sudaki çözeltilerine, gıdanın daldırılmasıyla yapılan dondurmada, eğer gıda sızdırmaz bir ambalaj içinde değilse, dondurucu sıvının gıdaya bulaşması önemli bir olumsuzluktur. Diğer bir olumsuzluk ise dondurucu sıvının belli aralıklarla değiştirilme zorunluluğudur.

Daldırılarak dondurmada kullanılabilecek dondurucu sıvıların sayısı sınırlıdır. Bunun nedeni ise, kullanılacak dondurucu sıvılarda aranan bazı özelliklerden kaynaklanmaktadır. Her şeyden önce bu amaçla kullanılacak sıvının düşük sıcaklıklarda dahi donmaması gerekmektedir. Gıda ile doğrudan temas eden yani; ambalajlanmamış ürünlerde kullanılan dondurucu sıvıların ayrıca; toksik etkili olmaması, yabancı renk ve koku oluşturmaması, uygulama sırasında bileşiminin

değişmemesi ve saniter nitelikte kalması gerekmektedir. Ambalajsız gıdaların daldırılarak dondurulmalarında kullanılan dondurucu sıvılarda aranan en önemli özellik, dondurucu sıvıların duyusal özellikleri ile, dondurulan gıdanın duyusal özelliklerinin uyuşmasıdır. Örneğin meyveler şeker şurubu ile, balıklar ise salamura ile dondurulabilir ve kuşkusuz aksi olanaklı değildir. Dondurma işlemi boyunca, özellikle ambalajlanmamış gıda kullanıldığında, dondurucu sıvıların kirlenme ve buharlaşmasının önlenmesi ve konsantrasyonunun sabit tutulması adeta olanaksızdır.

Daldırılarak dondurmada kullanılan dondurucu sıvıların yani, donma noktası düşük sıvılardan en yaygınları, salamura (tuz çözeltisi), şeker şurubu ve gliserol çözeltileridir. Düşük bir donma derecesine ulaşabilmek için bu çözeltilerin yeterli bir konsantrasyonda olması gerekir. Örneğin salamura ile en çok -21°C'ye kadar inmek olanaklıdır. Aynı şekilde sakkaroz şurubuyla da en çok -21°C'ye inilebilmektedir. Meyvelerin dondurulmasında kullanılabilen gliserol'un sudaki % 67'lik çözeltisi ile, -47°C 'ye kadar inilebilmektedir. Diğer taraftan propilen'in sudaki % 60'lık çözeltisiyle, -51°C'ye kadar inilebilmekteyse de, propilen çözeltisinin sadece ambalajlanmış gıdalarda kullanılabileceği gözden uzak tutulmamalıdır.

Kriyojenik Sıvılarla Dondurma: Kriyojenik dondurmada, herhangi bir soğutma sistemine gerek bulunmamakta soğuma ve donma doğrudan bir kriyojenden yararlanılarak sağlanmaktadır. Termodinamik nitelikleri nedeniyle soğutma potansiyeline sahip bileşiklere "kriyojen" veya "kriyojenik materyal" denir. Diğer bir tanımlama ile kriyojen; soğutulan materyalden ısı absorbe ederek (gizli ısı) faz değiştiren bir soğutucu akışkandır.

Bir çok kriyojenik sıvı bulunmaktadır ancak günümüzde gıdaların dondurulmasında sadece sıvı azot (LN_2) ve sıvı karbondioksit (LCO_2) kullanılmaktadır. Daha önceki dönemlerde bu amaçla kullanılmış olan kloroflorokarbonlar ozon tabakasına olumsuz etkileri nedeniyle artık kullanılmamaktadır. Gıdaların dondurulmasında halen bilinen birçok kriyojenden yararlanmayı sınırlayan en önemli etken; çoğunun kaynama derecesinin çok düşük olmasıdır. Düşük kaynama derecesi, termodinamik açıdan bir avantaj olmakla birlikte donma sırasında gıdanın çatlaması, parçalanması gibi mekaniki olarak zedelenmesine yol açması bakımından önemli bir olumsuzluk olarak görülmektedir. Bu nedenle kriyojenlerde aranan en önemli özellikler arasında, -50°C, -60°C gibi bir kaynama sıcaklığına ve olabildiğince yüksek bir buharlaşma gizli ısısına sahip olmaları önem kazanmaktadır. Bu açıdan bakılınca katı CO_2'in (kuru buz), LN_2'ye göre daha uygun özelliklerde olduğu görülmektedir. Ancak kuru buzun, dondurulacak materyalle yeterli teması sağlamaması bu önemli niteliği etkisiz kalmaktadır.

Gıdaların dondurulmasında kullanılacak kriyojenlerde aranan diğer özellikle arasında; renksiz, kokusuz ve inert nitelikte olması, toksik olmaması ve gıda ile temasında herhangi bir sakınca belirmemesi gibi hususlar ön plana çıkmaktadır.

Tablo 3. Bazı kriyojenik sıvıların özellikleri

Kriyojen	1 atm basınçta kaynama noktası (°C)	Buharlaşma gizli ısısı (kcal/kg)
Helyum	-268.8	108.8
Azot	-195.8	47.3
Karbonmonoksit	-190.6	53,5
Argon	-184.4	37.0
Metan	-161.1	136.0
Etan	-88.9	109.0
Azot oksit	-88.9	90.0
Propan	-42.2	100.6
Karbondioksit	-57.6*	75.0
Karbondioksit (katı)	-79,0**	135.4

Kriyojenik dondurmanın birçok olumlu yönleri vardır. Herşeyden önce çok yüksek bir donma hızına ve buna bağlı olarak yüksek bir kaliteye ulaşılabilmektedir. Ancak, eğer dondurulmuş ürün uzun süre depolanırsa, bu önemli üstünlük zamanla kaybolmaktadır. Kriyojenik dondurma sistemlerinin sabit yatırımı düşüktür, sistemin işletilmesi kolaydır. Bunlar az yer işgal eden kompakt, mekaniksel açıdan basit, bakım masrafları az olan sistemlerdir. Kriyojenik dondurucuların bu olumlu yönlerine karşın kullanılan kriyojenlerin pahalı olması ve bu kriyojenlerin temin edildikten sonra depolanması için gereken sistemlerin masraflı olması gibi olumsuzlukları vardır. Bu nedenle kriyojenik dondurma, bu masrafları karşılayabilecek ürünlere uygulanmaktadır.

Dondurulan gıdaya kriyojenik sıvının uygulanma yöntemi, kriyojen türüne göre biraz farklılık gösterse de daldırma, püskürtme (sprey) ve soğuk gazla karşılaştırma olmak üzere başlıca üç şekilde uygulanmaktadır. LN_2'ye daldırılarak dondurma yöntemi çok sınırlı uygulanmakla birlikte, son yıllarda özellikle karideslerin dondurulması amacıyla mekaniki dondurucularla kombine edilerek yeni bazı sistemler geliştirilmiştir. Daldırma uygulamasının sakıncaları nedeniyle LN_2, yaygın olarak bir bantta taşınan dondurulacak materyal üzerine sprey halinde uygulanmaktadır. LN_2'nin sprey olarak uygulanmasında bant tipi bir dondurucudan yararlanılır. LN_2, dondurulacak gıdaya bandın çıkış ucuna yakın bir yere sprey olarak uygulanır. Damlacıkların, gıdanın ısısını absorbe ederek buhar fazına dönüşmesi ile oluşan soğuk azot gazı, tüneldeki fanlar yardımı tünelin besleme ucuna doğru üflenir ve tüneli -18°C ile -20°C civarında terk eder. Dondurma işlemi dışında, gıda alanındaki bazı işlemlerde de gerek LN_2'den ve gerekse LCO_2'den yararlanılmaktadır. Örneğin hızlı bir şekilde doğranabilmesi için doğramadan önce etlerin sertleştirilmesi veya dondurmaların yüzeyini sıcak çikolata ile kaplayabilmek için yüzeyin önceden çok düşük derecelere kadar soğutulması, bu kriyojenlerden yararlanılmasına ilişkin tipik örneklerdir. Aynı şekilde, gıdaların yüksek hızlı değirmenlerde öğütülmesinde, sürtünme ile ısınma sonucu oluşacak bazı olumsuzlukların önlenmesinde de her iki kriyojenden yararlanılmaktadır. Örneğin baharat gibi ısıya duyarlı maddelerin öğütülmesinde, öğütme öncesinde LN_2 veya katı CO_2 (kuru buz) ile karıştırılan materyal yeterince soğumakta ve öğütme sırasında ısınmaya bağlı olarak uçucu bileşiklerin kaybı önlenebilmektedir. Bu tip öğütmeye "kriyojenik öğütme" denir.

Diğer taraftan taze meyve ve sebzelerin üretim yörelerinden tüketim yörelerine taşınmasında, taşıt aracındaki meyve ve sebzelerin istiflendiği kapalı ve sızdırmaz nitelikteki hücreye LN_2 veya LCO_2 enjekte edilerek hem soğumaları sağlanabilmekte ve hem de atmosfer bileşimi kontrol edilebilmekte ve böylece bu ürünlerin bozulmadan ve kalitesini kaybetmeden yerine ulaşması mümkün olmaktadır.

Dondurulmuş Olarak Kurutma

Liyofilizasyon ismi ile de anılan dondurulmuş halde kurutma (freeze-drying) yöntemi diğer kurutma yöntemlerinden tamamen farklı ilkelere dayanır. Bu yöntemle kurutulacak ürün; önce dondurularak gıdadaki su bulunduğu yerde buz halinde bağlanır, daha sonra bu buz uygun koşullar altında süblimasyon yöntemi ile uzaklaştırılır. Yöntem dilimizde çoğu kez "dondurularak kurutma" olarak yer alıyor olsa da, "dondurulmuş halde kurutma" daha doğru bir adlandırmadır. Çünkü kuruma olgusu donmanın bir sonucu değildir. Üründeki su tüm kuruma boyunca katı fazda yani buz olarak kalmaktadır. Dondurarak kurutma işlemini "dondurma" ve "kurutma" olmak üzere iki aşamada gerçekleşir.

Ürünün ilk aşama olarak dondurulması, herhangi geleneksel bir dondurma düzeninde gerçekleştirilebilir. Uygulanan dondurma hızı, kurutulmuş ürünün rekonstitüsyon özellikleri üzerine son derece etkilidir. Ne kadar hızlı dondurma uygulanırsa, o kadar küçük ve fazla sayıda buz kristalleri oluştuğundan kurumuş üründe o kadar fazla gözenek oluşur. Böyle bir ürünün rehidrasyon hızı yüksek ve rehidrasyon tamdır. Ancak, oluşan gözenekler çok küçük olduğu için, kuruma hızı daha yavaştır. Bununla birlikte, ön hazırlıklardan sonra kurutulacak ürünler, genellikle 0.5-3.0 cm/h bir hızla dondurulurlar. Dondurulmuş ürün çoğunlukla -20 °C, -30 °C'ye kadar soğutulur.

Dondurulmuş ve -30 °C dolaylarına kadar soğutulmuş gıda, dondurarak kurutma cihazında vakum altında tutularak kurutulur. Dondurarak kurutma cihazı, "buharlaştırma hücresi (veya vakum hücresi)" ve "yoğuşturucu (yoğuşturucu)" olmak üzere başlıca iki ana bölümden oluşur. Her iki ünite mekaniki bir pompa veya buhar ejektörü ile sağlanan vakum altında tutulur. Kurutma sırasında üründen süblimasyonla alınan ısı, bir ısıtma düzeniyle devamlı olarak ürüne verilir. Vakumlu kurutucularla dondurarak kurutucular arasında gerek yapı, gerekse çalışma şekli açısından çok büyük benzerlik vardır. Dondurarak kurutmada kurutulan materyale ısı, iletimle veya radyasyonla ulaştırılır.

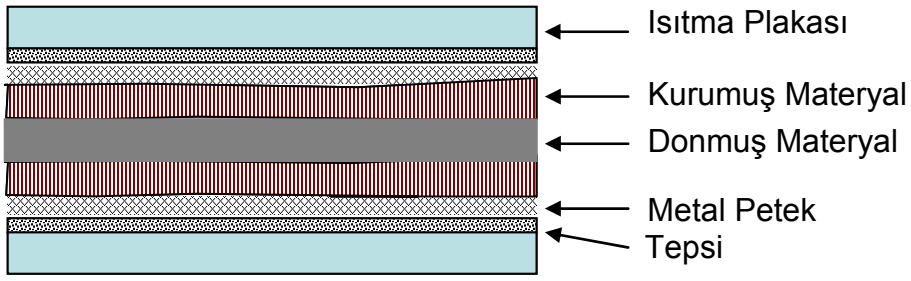
Katı, sıvı ve gaz halinde bulunabilen bir maddenin, katı fazdan doğrudan gaz fazına geçmesi olayına "süblimasyon" denir. Süblime olabilen her maddenin süblimasyon koşulları farklıdır. Örneğin kuru buz (katı karbondioksit) normal basınçta, oda sıcaklığında süblimasyona uğrarken, buzun süblimasyonunun minimum koşullarında; sıcaklık 0 °C, basınç ise 4.579 mm Hg (610 Pa)'dır. Yani buz ancak 0 °C veya altında, basınç 4.579 mmHg veya altında olunca süblime olabilmektedir. Başka bir deyişle buzun süblimasyonu, su buharı basıncının onu çevreleyen ortamın su buharı basıncından daha yüksek olmasıyla olanaklıdır.

Buzun buhar basıncı, sıcaklığına bağlıdır. Örneğin 0 °C deki buzun buhar basıncı 4.579 mm Hg düzeyinde olduğu halde, -15 °C'deki buzun buhar basıncı 1.241 mm Hg'dir. Dondurarak kurutmada vakum hücresine yerleştirilmiş kurutulacak materyalin sıcaklığı ne kadar düşükse, süblimasyonla kurumanın gerçekleşmesi için o kadar fazla vakum uygulanması gerekmektedir. Süblimasyon olayı sadece su buharı basıncıyla açıklanabilir. Ortam buhar basıncının buzun buhar basıncından daha düşük olması sağlanırsa, atmosferik basınç altında süblimasyonun gerçekleşir. Çok soğuk kış günlerinde, hava çok kuru olduğu zaman (havanın su buharı basıncı düşük) kurutulmak üzere asılmış giysilerin önce donması ve sonra don haldeyken kısa

sürede kuruması bu duruma örnek olarak verilebilir. Bu olay, buzun atmosferik basınçta süblimasyonundan başka birşey değildir. Bu ilkelere uygun olarak "atmosferik dondurarak kurutma" yöntemi geliştirilmiştir. Ancak halen dondurarak kurutmanın yaygın uygulamasında vakum kullanılmaktadır ve vakum hücresinde 0.1-2.0 mm Hg düzeyinde vakum uygulanmaktadır.

Diğer taraftan suyun faz değişiminde daima belli miktarda ısı absorbe edilir veya serbest bırakılır. 0 °C'deki suyun 0 °C'deki buz haline dönüşmesinde 335 kJ/kg düzeyinde "donma gizli ısısı" serbest kalır. 0 °C'deki su, 0 °C'deki buhar haline dönüşürken 2500 kJ/kg buharlaşma gizli ısısı absorbe eder. 0 °C'deki buz, 0 °C'deki buhar haline dönüşürken 2835 kJ/kg (335 + 2500 = 2835 kJ/kg) ısı absorbe eder. Donma ve buharlaşma gizli ısılarının toplamı olan bu ısıya "süblimasyon gizli ısısı" denir. Buzun süblimasyon gizli ısısı sıcaklığa bağlı olarak yükselmektedir.

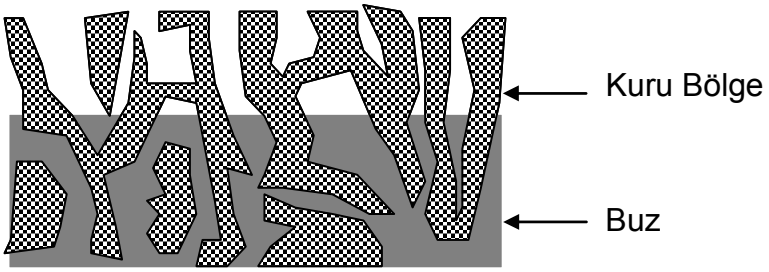
Buzun süblimasyonu için gerekli ısı eğer buzdan alınırsa, buzun sıcaklığı gittikçe düşer. Bu olay buharlaşma sonucu soğuma olgusundan başka birşey değildir. Bu nedenle dondurarak kurutmada, üründeki buz süblime oldukça, ürün sıcaklığı gittikçe düşer. Hatta bir süre sonra, ürün o kadar soğur ki, kuruma durur. Bunu önlemek için kurutulan ürüne süblimasyon gizli ısısına eşdeğer miktarda ısı sevk edilir. Bu amaçla buharlaştırma hücresi herhangi bir ısıtma düzeniyle donatılmıştır. Isıtma buzun erimesine neden olmayacak düzeyde yapılır ve vakum yeterli düzeyde düşük tutulursa, buzun süblimasyonu maksimum düzeyde gerçekleşir. Dondurarak kurutmada en önemli sorunlardan birisi materyale ısı sevk edilmesidir. Kurutulan maddenin sıcaklığı daima yoğuşturucunun sıcaklığından daha yüksek tutulmak zorundadır. Ancak bu koşulla kurutulan üründen yoğuşturucuya doğru bir buhar akışı sağlanabilir. Şu halde dondurarak kurutmada kurutulan ürünün devamlı ısıtılması gerekmektedir. Dondurularak kurutulan bir materyalin kuruma sırasında plakalı ısıtıcılarla ısıtılışı sırasında, plakalar sıcak bir sıvı dolaşımıyla içerden ısıtılır. Plakalı ısıtmada olduğu gibi iletimle ısıtmada, süblime olan buharın çıkışını kapatmamak için, ısıtılan gıda doğrudan plaka üzerine yapışacak şekilde yerleştirilmez. Gıda ile plaka arasında daima ısıyı ileten fakat buharın hareketini engellemeyen, metalden yapılmış bir petek bulunur.



Şekil 1. Dondurarak kurutmada gıdanın iletimle ısıtılması

Süblimasyon önce yüzeyde oluşur. Bu şekilde yüzeyin kuruması ile buz tabakası gittikçe içerlere doğru geriler. Daha açık bir deyimle, gıda dıştan içeri doğru kurur. Merkezde en son kalan buz da süblimasyona uğrayınca ürün tümüyle kurumuş olur

ve nem düzeyi % 5'in altına iner. Kurumanın bu şekilde gelişmesi nedeniyle dondurarak kurutmada derinlerde kalmış buz tabakasına ısının ulaştırılmasının oldukça zor olduğu görülmektedir. Isının, kurumuş bu yalıtkan tabakayı aşması oldukça zordur. Bu nedenle dondurarak kurutma yönteminde de bir süre sonra kuruma hızı düşmektedir. Daha iyi bir ısı iletimi için, iletimle ısıtmadan çok, derinliklere sızma niteliği olan kızılötesi ve mikrodalga gibi, radyasyon kaynaklarından yararlanılmaktadır. Bazı dondurarak kurutma cihazlarında soğutucu tablalar çivili olarak yapılmıştır. Böylece kurutulan maddenin derinlerine kadar ulaşan bu çivilerle daha iyi bir ısı transferi sağlanarak kuruma hızlandırılmaktadır. Bu nedenle bu tip dondurarak kurutmaya, "hızlandırılmış dondurarak kurutma" denir.



Şekil 2. Dondurarak kurutmada gözenekli yapı oluşumu

Dondurularak kurutulan ürünler de önemli bir ısı etkisinde kalır. Kuruyan maddenin buz fazı çok düşük derecelerde bulunduğu sırada, yüzeyinin 60°-70 °C'lere kadar ısınır.

Kurutma başlangıcında ürünün yüzey sıcaklığı -30 °C olup, plaka sıcaklığı 120 °C'ye ayarlanmıştır. Dış kısımdaki buz süblime oldukça ve yerini kuru bir tabakaya bıraktıkça, ürünün yüzey sıcaklığı hızla yükselerek plaka sıcaklığına erişme eğilimi kazanmaktadır. İşte bu nedenle, kuruma ilerlerken plaka sıcaklığı düşürülerek yüzeyin yanması önlenmektedir.

Dondurarak kurutma, materyaldeki buzun tümünün süblime olmasıyla sona erer. Kurumuş ürünün nem düzeyi genellikle % 2-4 civarında bulununca depolamada herhangi bir sorun oluşmaz. Kuruma süresi, kurutulan maddenin fiziksel yapısı, parça iriliği ve ısı iletiminde uygulanan yönteme göre değişmektedir.

Dondurarak kurutucuların kesikli ve sürekli çalışan tipleri vardır. Sürekli çalışan tiplerinde en önemli sorun yoğuşturucuya ulaşan buharın devamlı olarak uzaklaştırılmasıdır. Yukarıda da değinildiği gibi dondurarak kurutma cihazlarının en önemli kısımlarından biri olan ve vakum üreten düzenle, (pompa veya buhar ejektörü), buharlaşma hücresi (vakum hücresi) arasında yer alan yoğuşturucu (kondensatör) kısmıdır. Yoğuşturucunun görevi, buharlaştırıcı hücresinden gelen düşük sıcaklıktaki su buharını buz halinde bağlayarak tutmaktır. Bu nedenle dondurarak kurutucuların yoğuşturucuları, dondurma sağlayabilen "soğuk" yoğuşturuculardır. Yoğuşturucunun sıcaklığı, kendisine ulaşan ve buzun süblimasyonundan kaynaklanan su buharının sıcaklığından daha düşük olmalıdır. Sürekli çalışan dondurarak kurutuculardaki yoğuşturucular, döner tipli yoğuşturuculardır. Soğuk yoğuşturucunun yüzeyinde oluşan buz, dönme sırasında

kazınıp uzaklaştırılabilmekte ve böylece yoğuşturucunun temizlenme zorunluluğu doğmadan, kesiksiz bir çalışma olanağı ortaya çıkmaktadır

Tablo 1. Farklı sıcaklıklarda buzun buhar basıncı, mmHg

Sıcaklık (°C)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
-29	0.317	0.311	0.304	0.298	0.2
-28	0.351	0.344	0.337	0.330	0.3
-27	0.389	0.381	0.374	0.366	03
-26	0.430	0.422	0.414	0.405	0.3
-25	0.476	0.467	0.457	0.448	0.4
-24	0.526	0.515	0.505	0.495	0.4
-23	0.580	0.569	0.558	0.547	0.5
-22	0.640	0.627	0.615	0.603	0.5
-21	0.705	0.691	0.678	0.665	0.6
-20	0.776	0.761	0.747	0.733	0.7
-19	0.854	0.838	0.822	0.806	0.7
-18	0.939	0.921	0.904	0.887	0.8
-17	1.031	1.012	0.993	0.975	0.9
-16	1.132	1 .111	1.091	1.070	1.0
-15	1.241	1.219	1.196	1.175	1.1
-14	1.361	1.336	1.312	1.288	1.2
-13	1 .490	1 .464	1 .437	1.411	1.3
-12	1.632	1.602	1.574	1.546	1.5
-11	1.785	1.753	1.722	1.691	1.6
-10	1.950	1.916	1.883	1.849	1.8
-9	2.131	2.093	2.057	2.021	1.9
-8	2.326	2.285	2.246	2.207	2.1
-7	2.537	2.493	2.450	2.408	2.3
-6	2.765	2.718	2.672	2.626	2.5
-5	3.013	2.962	2.912	2.862	2.8
-4	3.280	3.225	3.171	3.117	3.0
-3	3.568	3.509	3.451	3.393	3.3
-2	3.880	3.816	3.753	3.691	3.6
-1	4.217	4.147	4.079	4.012	3.9
0	4.579	4.504	4.431	4.359	4.2

Dondurarak kurutma, diğer yöntemlere göre yüksek yatırım gerektirir ve işletme masrafları daha yüksektir. Dondurarak kurutmada buharlaştırılan birim miktardaki su için yapılan harcamalar geleneksel yöntemlerde yapılan masrafların 2-5 mislidir. Diğer taraftan kurutulan gıdanın kalitesini koruyacak şekilde kuruyabilmesi için, küçük parçalar halinde ince bir tarzda kıyılıp doğranmış olması gerekmektedir. Isının dıştaki kuru tabaka üzerinden içteki buz fazına ulaştırılmasındaki güçlük, iri parçaların bu yöntemle kurutulmasını engellemektedir. Diğer taraftan kurumuş ürün, sünger gibi son derece gözenekli bir yapıda olduğundan hızla nem ve oksijen bağlama

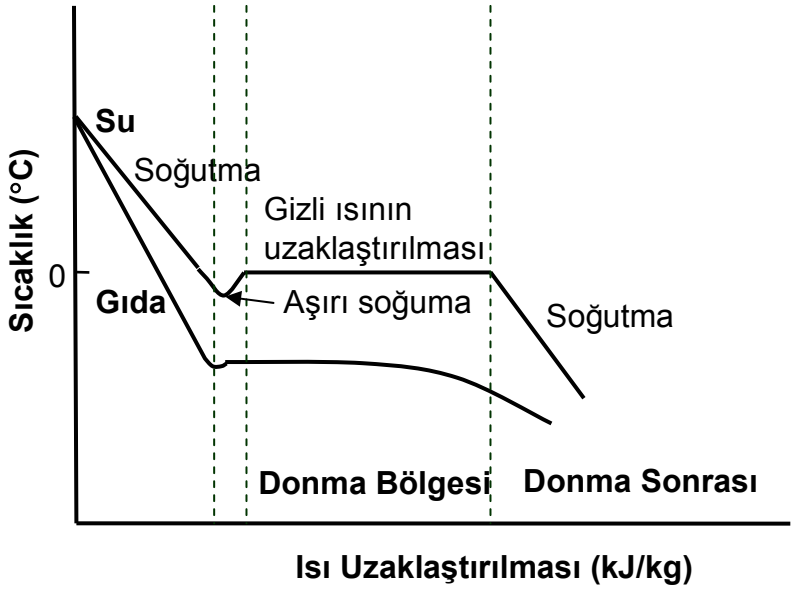
özelliğindedir. Bu şekilde kurutulmuş ürünlerin oksidasyon tepkimelerine açıktır. Bu nedenle kurutma sonunda vakumun kırılması, vakum hücresine azot gazı verilerek gerçekleştirilir. Bu yolla, kurumuş maddenin çok büyük bir alan oluşturan gözenekleri tarafından oksijenin değil, azot gazının bağlanması sağlanır. Ayrıca ambalajlama da, azot gazı altında yapılarak ambalajdaki hava yerine azot yerleştirilir. Azot gazı, inert bir materyal olduğundan, duyarlı gıdaların ambalajlanmasında yaygın olarak kullanılır ve bu yolla birçok oksidatif tepkimeler önlenir.

Dondurarak kurutmanın değinilen bu olumsuzluklarına karşın birçok olumlu yönü vardır. Her şeyden önce dondurularak kurutulmuş ürünlerin kalitesine hiç bir kurutma yöntemiyle erişilememektedir. Bu nedenle pahalı bir yöntem olmasına rağmen, değerli ve ısıya duyarlı birçok ürünün kurutulmasında ticari boyutlarda uygulanmaktadır. Kahve ekstraktı, meyve suları gibi sıvı materyallerle, kuşburnu, piliç eti, karides, mantar ve çilek gibi parça halindeki katı gıdalar en fazla dondurarak kurutulan ürünlerdir. Örneğin çilekler renk, aroma ve şekil açısından dondurarak kurutmada verdikleri kaliteyi diğer hiçbir yöntemde verememektedirler. Diğer taraftan dondurarak kurutulmuş ürünlerin aroma ve besleme değeri çok yüksektir. Hücre içindeki maddeler diğer yöntemlerdeki gibi hücre dışına ve materyalin yüzeyine çıkıp dağılmamıştır. Çünkü bu yöntemde su, bulunduğu noktada buz olarak bağlandığından kuruma sırasında dokuda herhangi bir sıvı hareketi yoktur. Aynı şekilde kuruma ile ürünün şeklinde ve boyutlarında bir değişme belirmez. Yani bir buruşma olmaz ve ürün, hemen hemen orijinal irilik ve şeklini korumuş olur. Ayrıca kurumuş ürünün rehidrasyon yeteneği çok yüksektir. Hemen hemen tazesine yakın düzeye ulaşacak kadar rehidre olurlar. Bu durum kurutulmuş materyalin gözenekli yapıda olmasından kaynaklanmaktadır. Gözenekli yapının bu olumlu sonuçlarına karşın, kurumuş materyale aşırı bir kırılganlık kazandırması, kitle yoğunluğunun düşüklüğü, ambalajlama, depolama ve taşımada ekonomik açıdan bazı olumsuzluklara neden olmaktadır.

DONMA SÜRESİ VE DONMA HIZI

Dondurma işleminin tasarımında en önemli hesaplamalardan biri donma hızının hesaplanmasıdır. Dondurulan bir gıdada ayırt edilebilir 3 farklı bölge söz konusudur: ön soğutma, donma, donma sonrası. Ön soğutma aşaması, gıdanın bulunduğu sıcaklıktan donma başlangıç derecesine kadar yani suyun kristalleşmeye başladığı ana kadar geçen süredir. Bu süreye donma öncesi soğuma denir. Çekirdek oluşumu başlayıncaya kadar 0°C'nin biraz altında suyun aşırı soğuması gözlenir ve sonra su sıcaklığı tekrar 0°C'ye yükselir. Bu süreci "donma aşaması" izler. Su donma sıcaklığına kadar soğutulur. Donma aşamasında, serbest kalan donma gizli ısısı uzaklaştırılırken faz değişimi tamamlanıp bütün su buz haline dönüşünceye kadar sıcaklık sabit kalır.

Bir gıdanın dondurulması ile suyun donması sırasında elde edilen eğriler birbirine benzer olsa da önemli farklılıklar vardır. Gıda, ön soğutma bölgesinde su gibi hızla soğur. Çekirdek ve buz kristallerinin oluşumu suya göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Kısa süreli bir aşırı soğumadan sonra düşen sıcaklıkla donma gizli ısısı uzaklaştırılır. Sıcaklık profilinde saf suya göre gözlenen bu farklılık, gıdanın donması sırasında konsantrasyonunun artması nedeniyledir. Gıdadaki su buz haline dönerken kalan su çözünen maddeler nedeniyle daha konsantre hale gelir ve donma sıcaklığı düşer.



Şekil 1. Su ve gıdanın donma çizelgeleri

Gıdaların dondurulması sırasında hedeflenen son sıcaklığa ulaşıldığında, donmuş gıda hala donmamış halde su içerebilir. Örneğin -18°C'de dondurulmuş gıda, %10 oranında donmamış su içerebilir.

Donma sonundaki soğuma aşamasında gıda, donmanın sona erdiği sıcaklıktan hedeflenen "son sıcaklığa" veya "dengeleme sıcaklığına" erişinceye kadar soğutulur. Son sıcaklık gıdanın ısıl merkezi dahil her noktasının depolanma sıcaklığına eriştiği sıcaklıktır. Dengeleme sıcaklığı ise, çevre ile bir ısı alışverişi gerçekleşmeksizin yani;

adiyabatik şartlarda materyalde ulaşılması hedeflenen dereceyi sağlayan sıcaklıktır. Örneğin kriyojenik dondurma uygulamasında materyal dış katman sıcaklığı -60°C ye ulaşmış ancak ısıl merkez sıcaklığı henüz -5°C ise, bu durumda dondurma işlemine son verildikten sonra, gıdanın tümü -20°C'ye erişebilir. Burada -60°C dengelenme derecesi iken, -20°C dengelenmiş sıcaklıktır. Donma süresi, en iyi ürün kalitesinin elde edilebilmesi için kullanılan dondurucu sisteminin seçilmesinde en önemli faktördür. Sistem kapasitesinin belirlenmesi istenilen donma hızı gereksinimine göre yapılır.

Genellikle meyveler ve sebzeler -18°C'de dondurulur. Dondurma ve benzeri yağ oranı yüksek gıdalarsa -25°C gibi daha düşük sıcaklıklarda dondurulur.

Donma süresi farklı açılardan değişik şekillerde tanımlanabilmektedir. Genellikle iki tanım yaygın olarak kullanılmaktadır.

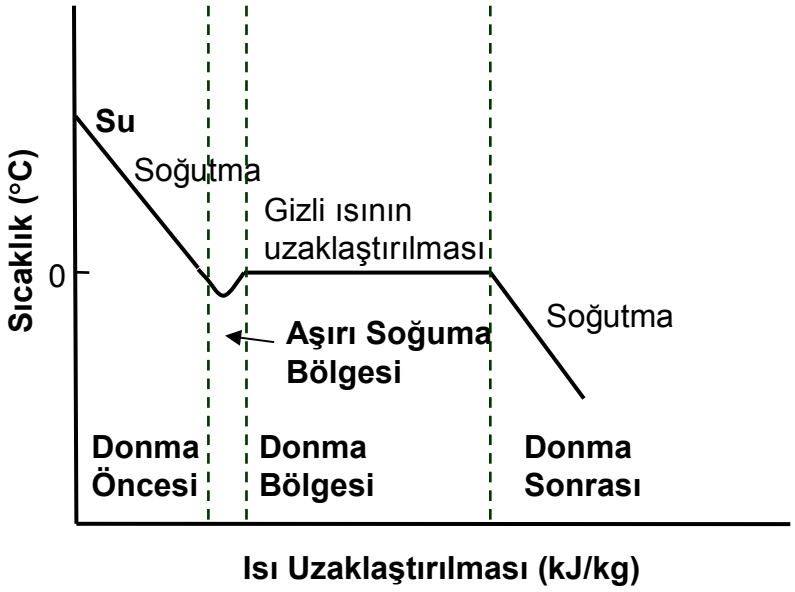
Nominal donma süresi: Dondurulan gıdanın yüzey sıcaklığının 0°C'ye eriştiği andan, ısıl merkez sıcaklığının; donma başlangıç noktasının 10°C altına düşene kadar geçen süredir. Örneğin dondurulan gıdanın donma noktası -1.5°C ise gıdanın yüzey sıcaklığının 0°C'ye eriştiği andan, merkez sıcaklığının -11.5 °C'ye (-1.5 + (-10) = -11.5) erişene kadar geçen süre; o gıdanın, o dondurulma koşullarındaki nominal donma süresidir. Nominal donma süresi, dondurulacak gıdanın dondurucuya girdiği andaki başlangıç sıcaklığını değil, yüzeyin 0°C'ye erişmiş olmasını temel almaktadır. Bu nedenle nominal donma süresi, donma hızı hakkında bilgi veren bir değerdir.

Efektif donma süresi: Dondurulacak gıdanın bulunduğu sıcaklıktan, ısıl merkez sıcaklığının belli bir dereceye düşmesi için geçen süreye "efektif donma süresi denir. Örneğin 18°C'de dondurucuya (başlangıç sıcaklığı) giren bir gıda donma sonunda ısıl merkez sıcaklığının -15°C'ye düşmesi hedef alınmış ise efektif donma süresi; gıdanın 18 °C'den ısıl merkez sıcaklığı -15 °C'ye ine kadar geçen süredir. Efektif donma süresi uygulamada karşılaşılan gerçek donma süresidir ve dondurucu kapasitesinin belirlenmesinde kullanılabilir.

Donma Süresine Etki Eden Faktörler

Gıdaların donma süresi üzerine; doğrudan gıdanın kendi özellikleri ve dondurucu ortamın (frizant) özellikleri olmak üzere, içsel ve dışsal olmak üzere iki grup faktör etkilidir.

Gıdanın ısıl iletkenlik katsayısı: Dondurulan gıdanın ısısı, iletimle yüzeye taşınarak buradan dondurucu ortama ulaşıp uzaklaştırılır. Donma süresinin hesaplanmasında kullanılacak ısıl iletkenlik katsayısı değeri, tercihen deneysel yolla saptanmış değer olmalıdır. Eğer böyle değere ulaşılamazsa, gıdanın bileşenlerinden yararlanılarak daha önce değin yolla hesaplanmış bulunan değer kullanılabilir.



Şekil 2. Suyun donma aşamaları

Isı aktarımının gerçekleştiği yüzey alanı: Donma süresi üzerine, gıdanın ısı aktarımına elverişli yüzey alanının da etkili olduğu kuşkusuzdur. Bu alan gıdanın geometrik şekline bağlıdır. Bu nedenle, donma süresinin hesaplanmasında kullanılan birçok eşitlikte, yüzey alanının etkisini yansıtmak amacıyla, geometrik şekille ilgili Plank eşitliğinde yer alan P ve R gibi bazı katsayılar yer alır. Bunlar dondurulan materyalin şekline bağlı olarak değişmektedir.

Gıdanın kalınlığı: Dondurulan gıdanın iç kısımlarındaki ısının yüzeye ulaşması için alınan yol, donma süresine etki eden önemli faktörlerden biridir ve donma süresinin hesaplanmasında gıdanın kalınlığı dikkate alınır. Kalınlık arttıkça donma süresi uzar.

Ambalaj: Gıdanın ambalajlanmış olması, donma süresini uzatan en önemli faktörlerden birisidir. Ambalaj materyalinin ısıl iletkenlik katsayısı ve kalınlığı, ambalajın donma süresi üzerine etkisini tayin eder. Dondurulmuş gıdalarda kullanılan ambalajların yapıldığı materyaller genellikle kötü ısı iletkenidirler ve bu nedenle donma süresine olumsuz etki ederler. Ancak ambalajın etkisi sadece ısıl iletkenlik katsayısı ve kalınlığından kaynaklanmaz. Ambalajla gıda arasında kalabilecek hava boşluğu yüzünden oluşan iki yeni sınır yüzey filmi ısı aktarımını olumsuz etkiler. Eğer ambalajla gıda arasında bir boşluk varsa, bu katman dikkate alınmadan yapılan bir donma süresi hesabı doğru olmaz. Normal olarak ambalajın donma süresine etkisi, toplam ısı aktarım katsayısının hesaplanmasında dikkate alınmaktadır

Gıda ve dondurucu ortam (frizant) sıcaklık farkı: Gıdanın sıcaklığı ile dondurucu ortamın sıcaklığı arasındaki fark, ısı aktarımının itici gücüdür. Bu fark büyüdükçe ısı aktarımı hızlanır ve don ma süresi kısalır. Kriyojenik sıvılarla dondurma sonucu donma süresinin kısalmasının nedenlerinden birisi budur.

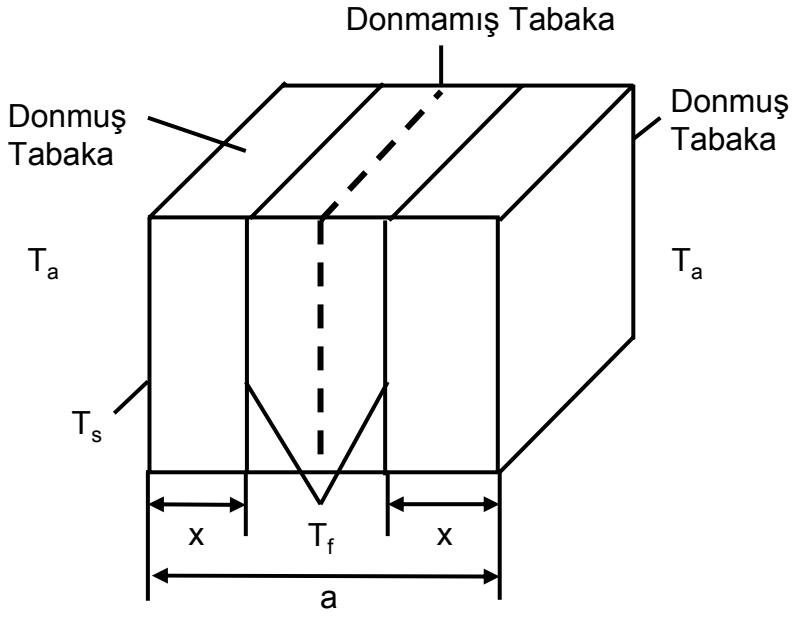
Yüzey filmi: Gıdaların bir akışkandan yararlanılarak ısıtılması veya soğumasında ısı aktarımına direnç gösteren faktörlerden birisi, yüzey filmidir. Örneğin soğuk hava

akımında dondurmada; gıdanın yüzeyinde eğer ambalajlı ise ayrıca ambalajın yüzeylerinde adeta oraya yapışmış gibi hareketsiz duran ve bu nedenle ısı yalıtkanı olarak davranan yüzey filmleri bulunur ve bunlar donma süresini etkilerler. Yüzey filminin kalınlığı arttıkça, ısı aktarımı güçleşir. Dondurulacak materyalin yüzeyindeki filmin kalınlığı, hava hızı ve sıcaklığı başta olmak üzere çeşitli faktörler tarafından etkilenmektedir. Hava hızı arttıkça, bu film kalınlığı azalmakta ve böylece ısı aktarımı iyileşmektedir. Yüzey filminin donma süresine etkisi, "taşınımla ısı aktarım katsayısı" değeri üzerinden hesaplamaya dahil edilmektedir.

Isı taşınım katsayısı (h) arttıkça donma suresi kısalmaktadır. Isı taşınım katsayısı dondurma yöntemine bağlı olarak farklılık gösterir. Örneğin plakalı donduruculardа, dondurulan materyalle, soğuk yüzeyin temas derecesi bu hususta en önemli faktördür Buna karşın hava akımında dondurmada hava hızı, havanın akış karakteri, dondurulan materyalin boyut ve şekli ile dondurulan cismin hava akışına karşı konum gibi faktörler, Isı taşınım katsayısını etkiler.

Plank Eşitliği

Donma süresinin tahmin edilmesinde kullanılan ilk ve en popüler eşitlik 1913 yılında Plank tarafından önerilmiş ve bu eşitlik 1949 yılında Ede tarafından gıdalara uyarlanmıştır. Bu eşitlik ürünün dondurulması sırasında sadece faz değişimi için gerekli olan zamanı açıklar. Kalınlığı a olan ve saf sudan oluşmuş bir sonsuz levha düşünelim. Bu metot ön soğutma aşamasını yani materyalin bulunduğu sıcaklıktan donma sıcaklığına ulaşıncaya kadar geçen süreyi, ihmal eder. Bu nedenle levhanın başlangıç sıcaklığı, donma başlangıç noktası T_f'e eşittir. Suyun donma başlangıç noktası 0°C'dir.



Şekil 3. Plank eşitliğinin donma süresinin belirlenmesinde kullanımı

Levha T_a sıcaklığındaki dondurucu ortama maruz bırakıldığında ısı aktarımı tek boyutludur. Bir süre sonra 3 tabaka gözlenir: kalınlıkları x olan 2 donmuş tabaka ve ortada donmamış bir tabaka. Levha içinde donmuş ve donmamış bölgeyi birbirinden ayıran hareketli bir tabaka bulunur. Su hareket eden bu tabakada buza dönüşürken donma gizli ısısı, L, açığa çıkar. Bu donma gizli ısısı hareket eden tabakadan dondurma ortamına aktarılmalıdır. Levha yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı h'dir.

Donmamış bölgenin sıcaklığı donan hareketli tabaka merkeze ulaşıncaya kadar sabit kalır. Isı aktarımı hareket eden tabakadan çevredeki dondurma ortamına doğru gerçekleşir. Burada iki tabaka söz konusudur: donmuş iletken tabaka ve taşınım yüzey tabakası. Eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$q = \frac{A \cdot (T_f - T_a)}{\frac{1}{h} + \frac{x}{k_f}}$$

Eşitlikteki bölen kısmı ısıl dirençlerin toplamına eşittir. dx/dt hızıyla hareket eden tabakada donma gizli ısısıyla açığa çıkan enerji L olduğuna göre;

$$q = A \cdot L \cdot \rho_f \cdot \frac{dx}{dt}$$

Oluşan bütün ısının soğutma ortamına aktarılması gerektiğine göre;

$$L \cdot \rho_f \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{(T_f - T_a)}{\frac{1}{h} + \frac{x}{k_f}}$$

Değişkenleri yeniden düzenler ve merkeze ulaştığında (a/2) donmanın sona ereceği dikkate alınarak integrali alınırsa

$$\int_0^{t_f} dt = \frac{L \cdot \rho_f}{(T_f - T_a)} \cdot \int_0^{a/2} \left[\frac{1}{h} + \frac{x}{k_f} \right] dx$$

İntegral alınırsa donma zamanı t_f elde edilir.

$$t_f = \frac{L \cdot \rho_f}{(T_f - T_a)} \cdot \left[\frac{a}{2h} + \frac{a^2}{8k_f} \right]$$

Bu eşitlik sonsuz levha için geliştirilmiştir. Benzer adımları kullanarak benzer eşitlikleri silindir ve küre içinde elde edebiliriz. Ancak katsayılar farklıdır. Nem oranı m_m olan bir gıda için donma gizli ısısı L gıdanın donma gizli ısısı L_f ile değiştirilmelidir.

$L_f = m_m \cdot L$

Burada

m_m = gıdanın nem içeriği, % nem/100
L = suyun donma gizli ısısı 333.2 kJ/kg

Buna göre bir gıdanın donması için geçen süreyi hesaplamada kullanılan Plank eşitliği;

$$t_f = \frac{\rho_f \cdot L_f}{(T_f - T_a)} \cdot \left[\frac{P \cdot a}{h} + \frac{R \cdot a^2}{k_f} \right]$$

Burada

t_f = donma süresi, s
ρ = donan materyalin yoğunluğu, kg/m^3
L_f = gıdanın donma gizli ısısındaki değişim kJ/kg
T_a = dondurucu hava (ortam) sıcaklığı, °C
T_f = donma başlangıç sıcaklığı, °C
h = yüzey ısıl taşınım katsayısı, W/(m^2·°C)
a = nesnenin kalınlık veya çapı, m
k = donan materyalin ısıl iletkenlik katsayısı, W/(m·°C)
P ve R ürün şekline göre kullanılan katsayılardır

Geometri	P	R
Sonsuz Levha	1/2	1/8
Sonsuz silindir	1/4	1/16
Küre	1/6	1/24

Eşitlikten de görüleceği gibi yoğunluğun, donma gizli ısısının ve kalınlığın (veya çapın) artması donma süresini uzatır. Sıcaklık farkının artması, yüzey ısıl taşınım katsayısı ve ısıl iletim katsayısının artması ise donma süresini kısaltır.

Örnek Soru 1

Hava akımlı bir dondurucuda küresel şekilli bir ürün dondurulmaktadır. Ürün başlangıç sıcaklığı 10°C ve soğuk hava sıcaklığı -40°C'dir. Ürünün çapı 7 cm, yoğunluğu 1000 kg/m^3 ve donma başlangıç sıcaklığı -1.25°C, donan ürünün ısıl iletkenliği 1.2 W/(m·°C), ve donma gizli ısısı 250 kJ/kg'dir. Isı taşınım katsayısı 50 W/(m^2·°C) olduğuna göre donma süresini hesaplayın.

Verilenler

Ürün başlangıç sıcaklığı T_i = 10°C
Dondurucu hava (ortam) sıcaklığı T_a =-40°C
Donma başlangıç sıcaklığı T_f = -1.25°C
Ürün yoğunluğu ρ =1000 kg/m^3
Ürün çapı a = 7 cm = 0.07 m
Ürünün ısıl iletkenlik katsayısı k = 1.2 W/(m·°C)
Ürün gizli ısısı L_f = 250 kJ/kg

Yüzey ısıl taşınım katsayısı h = 50 W/(m2·°C)
Küre için P ve R katsayıları:
P = 1/6
R = 1/24

Plank eşitliğinde değerler yerine konularak donma süresi hesaplanabilir

$$t_f = \frac{\rho_f \cdot L_f}{(T_f - T_a)} \cdot \left[\frac{P \cdot a}{h} + \frac{R \cdot a^2}{k_f} \right]$$

$$t_f = \frac{(1000\ \text{kg/m}^3) \cdot (250\ \text{kJ/kg})}{[-1.25°\text{C} - (-40°\text{C})]} \cdot \left[\frac{0.07\ \text{m}}{6 \cdot (50\ \text{W}[\text{m}^2 \cdot °\text{C}])} + \frac{(0.07\ \text{m})^2}{24 \cdot (1.2\ \text{W}[\text{m} \cdot °\text{C}])} \right]$$

$$t_f = \left(6452\ \text{kJ/}[\text{m}^3 \cdot °\text{C}]\right) \cdot \left(0.000233\ \frac{\text{m}^3 \cdot \text{C}}{\text{W}} + 0.00017\ \frac{\text{m}^3 \cdot \text{C}}{\text{W}} \right)$$

$$t_f = 2.6\text{kJ} / \text{W}$$

1 kJ = 1000 J ve 1 W = 1J/s olduğuna göre

t_f = 2600 s

t_f =0.72 h