

## **DONDURMA**

Sıvı bir maddeden enerji uzaklaşması sonucunda, maddenin sıvı fazdan katı faza dönüşmesi olayına donma denir. Gıdanın yapısındaki sıvının katı faza dönüşmesi olayıdır. Dondurma işlemi ile mikroorganizma faaliyetleri durdurulur. Gıdalarda bozulma nedeni olan enzim aktivitesi yavaşlar. Kimyasal ve biyokimyasal olaylarda azalma ve yavaşlama meydana gelir. Gıda maddelerinin yapısında bulunan suyun dondurulması ile bozulma nedeni olan mikroorganizmaların yararlanamayacağı bir ortam oluşturularak zararları en az düzeye indirmek amacıyla uygulanan bir soğuk saklama tekniğidir. Dondurulmuş ürünler steril değildir. Dondurulmuş ürünlerde mikrobiyal faaliyet olmaz. Sadece kimyasal bozulmalar çok yavaş bir şekilde gerçekleşebilir.

### **Donma Olayı**

**Suyun Donması:** Sıvı bir maddeden enerji uzaklaştırılması sonucunda, sıvı fazdan katı faza dönüşmesi olayına donma denir. Enerjinin uzaklaştırılmasıyla, sıvı fazdaki moleküllerin serbest hareketleri gittikçe yavaşlar ve moleküller spontan olarak kümeleşmek suretiyle kendilerine özgü düzenli bir yapıya dönüşme eğilimine girerler. Bu, faz değiştirmenin başlangıcına ait ilk işaretlerdir. Suyun buz haline geçişinde kristallerin oluşumu ve kristallerin irileşmesi şeklinde iki aşama bulunmaktadır. Oluşan kristallerin boyutları ortam sıcaklığına bağlıdır. Ortam sıcaklığı ne kadar düşük olursa, oluşan kristallerin boyutu da o kadar küçük olur. Kristallerin büyüme hızı da ortamın sıcaklığı ile ortamdaki ısıyı uzaklaştırılması hızına bağlıdır. Saf bir maddenin faz değiştirmesi sadece kendine özgü bir sıcaklıkta gerçekleşebilmektedir. Su için bu sıcaklık 0 °C'dir. 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.

Suyun, sıvı fazdan katı faza geçmesiyle gerçekleşen donma olayı sonucunda serbest kalan enerji (donma gizli ısı), 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. Donma sırasında sıvı ve katı karışımdan 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 görülür. Donma sırasında oluşan kristallerin boyutu donma hızına bağlıdır. Gıdalar %60-90 oranında su içerirler. Gıdalardaki su çok sayıda çözünmüş madde içeren bir çözelti niteliğindedir. Bu nedenle donma noktaları daima 0°C'nin altındadır.

Diğer taraftan hızlı dondurma ile oluşmuş küçük buz kristalleri ancak düşük sıcaklıklarda stabil kalabilir. Eğer ortam sıcaklığı yükselirse, küçük kristaller kaybolarak, biraz daha büyük olanlar daha da büyürler. Bu olay, sistemin ulaştığı yeni sıcaklıkta tüm kristallerin stabil kalabileceği bir boyuta ulaşana kadar devam eder.

Bir gıdanın dondurulabilmesi için üründen hissedilir ısı ve donma gizli ısının uzaklaştırılması, bu amaçla yeterli süre boyunca düşük sıcaklıktaki ortama maruz bırakılması gerekir. Hissedilir ve gizli ısının uzaklaştırılması ürün sıcaklığında azalmaya neden olduğu gibi suyun sıvı fazdan katıya (buz) dönüşmesine yol açar. Çoğu durumda donmuş gıdanın depolama sıcaklığında suyun yaklaşık %10 sıvı fazda kalır.

**Bağlı su,** Gıda maddelerinde bulunan suyun bir kısmı, özellikle iyonlara ve elektrik yüklü diğer parçacıklara bağlı olarak bulunmaktadır. "Bağlı su" denen bu su, aynı zamanda bir çözücü olma niteliğinde de değildir. Bağlı su, herhangi bir sıcaklıkta dondurulamaz. İşte bu

yüzden bağlı suya aynı zamanda “donmayan su” da denir. Hayvansal dokulardaki suyun yaklaşık % 8-10’u, meyve ve sebzelerdeki suyun yaklaşık % 6 kadarı bağlı sudur. Şu halde ticari amaçla dondurulmuş gıdalarda donmamış halde bulunan suya ek olarak donmayan su (bağlı su) da bulunmaktadır.

### Donmanın Aşamaları

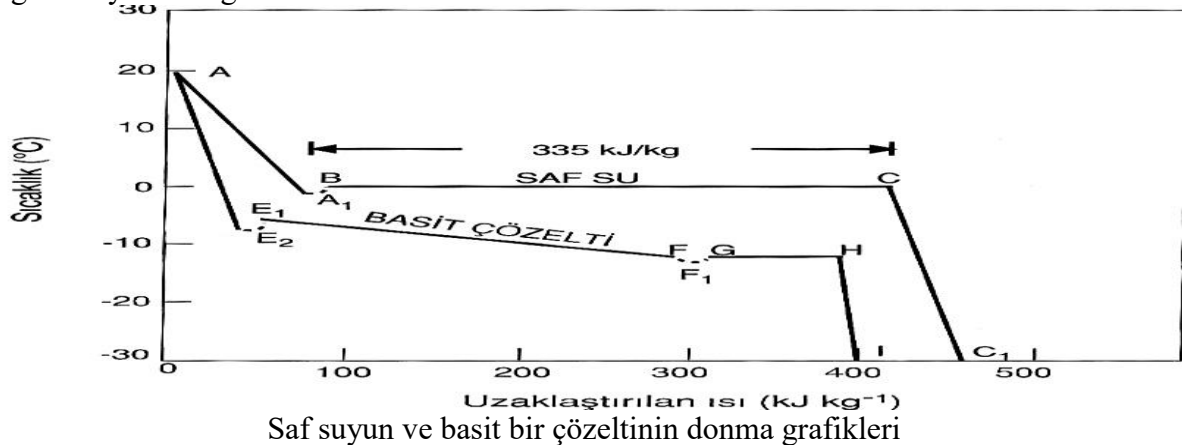
1. Ürünün sıcaklığının donma noktasına kadar düşürülmesi (ön soğutma aşaması). Isı faz değişimi olmaksızın düşük sıcaklıktaki ürüne transfer olur. Bu duyulur ısıdır.
2. Ürünün donma noktasında buz kristalleri oluşturarak donması (faz değişim aşaması) Serbest su buz haline dönüşür (%75 donma). Üründen ısı çekilmesinden ve faz değişiminden dolayı gizli ısı olarak adlandırılır.
3. Donmuş ürünün sıcaklığının donmuş yapıda istenen depolama sıcaklığına kadar düşürülmesi (tavlama aşaması). Ürünün denge sıcaklığı olan  $-18^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar soğutulmasıdır.

### Donma Grafikleri

Herhangi bir materyalin dondurulması sırasında materyalin sıcaklığında izlenen değişimlerle, uzaklaştırılan ısı miktarı (veya süre) bir grafiğe işlenirse “donma grafiği” elde edilir.

**Saf suyun donma grafiği:** Şekilde gösterilmiş bulunan saf suyun donma grafiği incelenirken, suyun özgül ısısının  $4.2 \text{ kJ/kgK}$ , buzun özgül ısısının  $2.1 \text{ kJ/kgK}$ , kristalizasyon (donam veya erime) gizli ısısının  $335 \text{ kJ/kgK}$  olduğu tekrar hatırlatılmalıdır.

Grafikte de görüldüğü gibi,  $20^{\circ}\text{C}$ ’deki su,  $0^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar soğutulurken  $84 \text{ kJ/kg}$  ısı uzaklaştırılmaktadır. Isının uzaklaştırılmasına devam edilince sıcaklığın  $0^{\circ}\text{C}$ ’nin bir miktar altına düştüğü ( $A_1$ ), fakat donmanın başlamadığı görülür. Bu olay “aşırı soğuma” olup, nedeni çekirdeklenmedeki gecikmedir. Çok saf ve çok az miktardaki (mikroskopik damlacık) su, belli bir sıcaklığa düşünce ( $A_1$ ), çekirdeklenme başlar ve bunu kristallerin büyümesi izler. Bu sırada serbest kalan donma gizli ısı, ortamın sıcaklığını derhal suyun gerçek donma derecesi olan  $0^{\circ}\text{C}$ ’ye yükseltir (B). Tüm kitlenin donması için, donma sonucu serbest kalan  $335 \text{ kJ/kg}$  düzeyindeki ısının uzaklaştırılması şarttır. Bu yüzden, donma süresi boyunca (B-C) uzaklaştırılan ısı, sadece kristalizasyon gizli ısıdır. Bu ısının hızla uzaklaştırılması, donma olayını hızlandırır, yoksa ortam sıcaklığının düşmesine neden olamaz. Buna göre donma boyunca ortam sıcaklığı  $0^{\circ}\text{C}$ ’de sabit kalır. Nihayet suyun tamamı donar (C) ve ancak bundan sonra uzaklaştırılan ısı,  $0^{\circ}\text{C}$ ’deki buzun sıcaklığının düşmesine neden olur. Böylece buz C-C<sub>1</sub> eğrisi boyunca soğur.



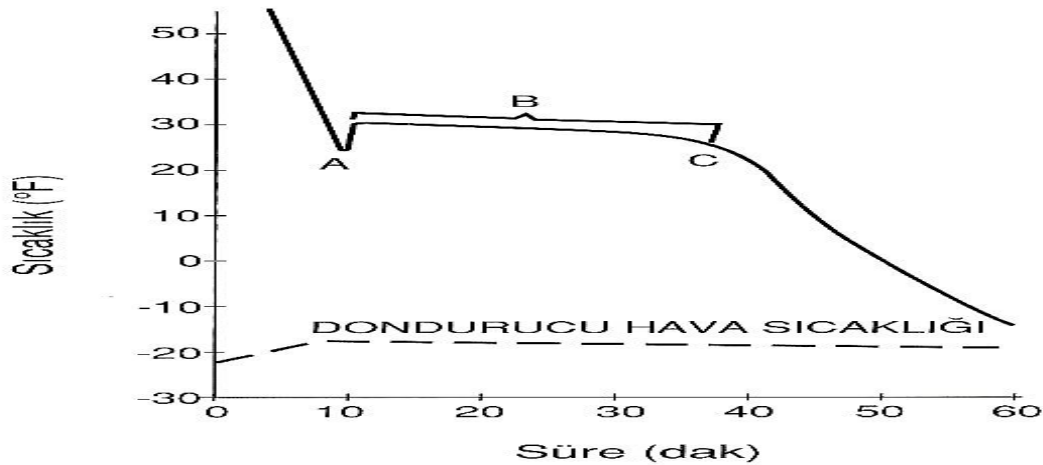
**Basit bir çözeltinin donma grafiği:** Yukarıdaki Şekilde de görüldüğü gibi, basit bir çözeltinin donma eğrisi suyunkinden farklıdır. Çözelti soğutulunca, özgül ısısı suyunkinden düşük olduğundan, sıcaklık hızla düşer ve aşırı soğuyarak E<sub>2</sub> noktasına erişir. Bu noktada

donma başladıktan sonra, serbest kalan donma gizli ısı, çözeltinin sıcaklığını o çözeltiye özgü donma noktasına ( $E_1$ ) yükseltir.

Bir çözeltinin donması demek, çözeltideki suyun "saf su kristalleri" halinde ayrılması demektir. Yani donan sadece sudur. Böyle olunca,  $E_1$  noktasında donma başlarken, çözeltideki bir kısım su, buz olarak ayrılır ve bu yüzden geri kalan çözeltinin konsantrasyonu yükselir. Konsantrasyonu artmış olan bu yeni çözeltinin, yeni bir donma noktası vardır ve bu  $E_1$ 'deki değerden daha düşük, örneğin  $E_2$  derecesidir. Böylece donma boyunca devamlı olarak buz kristalleri oluşmakta ve buna bağlı olarak konsantrasyonu gittikçe artan bir çözelti ortaya çıkmaktadır. İşte bu nedenle basit bir çözeltide donma başladıktan sonra, sıcaklık saf suda olduğu gibi sabit kalmamakta ve gittikçe düşmektedir. Böylece  $E_1$ -F eğrisi, bu olguya paralel olarak meyilli bir nitelik göstermektedir. Fakat sonunda çözeltinin konsantrasyonu, ancak bulunduğu sıcaklıktaki "doyma noktasına" kadar yükselebilir, daha fazla yükselemez. Şekilde de görüldüğü gibi çözelti, F noktasında doymakta ve bu yeni çözelti  $F_1$  noktasına kadar aşırı soğuyarak serbest kalan kristalizasyon gizli ısı nedeniyle sıcaklık, aynı şekilde G noktasına yükselmektedir. Bu nokta aynı zamanda, çözeltinin doyma noktası olduğundan, çözelti artık daha fazla konsantre olamaz. Bu noktada donarak ayrılan su ile orantılı olarak, çözünmüş madde de kristalize olup ayrılır ve böylece geride kalan çözeltinin konsantrasyonu daima sabit kalır. Bu yüzden G-H eğrisi boyunca buz ve çözünmüş madde karışık bir kitle oluşturarak kristalize olurlar. Tüm kitle tam olarak donduktan sonra (H) uzaklaştırılan ısı, kitlenin soğuyarak (I) noktasına erişmesini sağlar. Donmuş çözeltinin özgül ısı, saf buzun özgül ısından daha küçük olduğundan H-I eğrisi C-C<sub>1</sub> eğrisinden daha dik olarak gelişir.

#### Gıdaların Donma Grafikleri

Gıdalardaki su, çok sayıda çözünmüş madde içeren bir çözelti niteliğindedir. Bu nedenle gıdalarda donma, belli bir derecede başlar, içerdiği çözünmüş maddelere bağlı olarak birçok kriyohidrik noktadan geçerek, en düşük kriyohidrik dereceye ulaşır ve donma bu derecede sona erer. Ancak, gıdalarda çok sayıda ve değişik miktarlarda çözünmüş madde olduğundan gıdaların donma grafiklerinde basit bir çözeltideki gibi belirgin kriyohidrik noktalar fark edilemez.

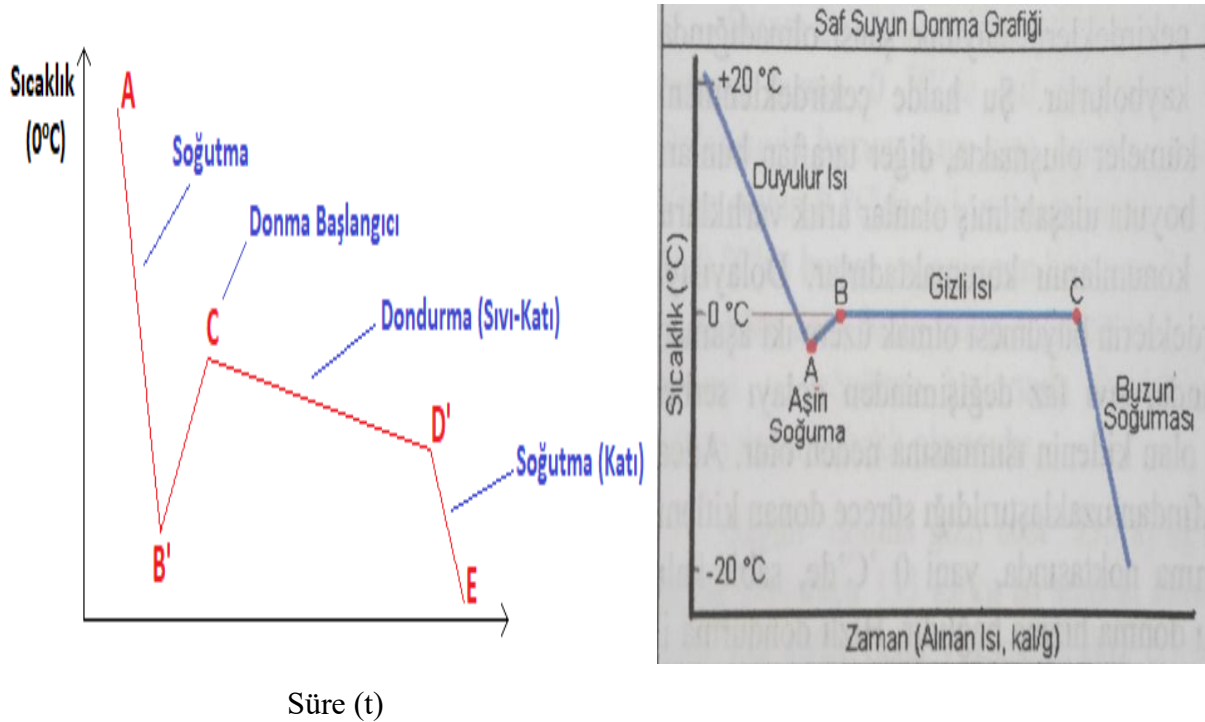


Durgun havada dondurulan çileklerin donma eğrisi

A) (Aşırı soğuma bölgesi) (B) Donma bölgesi (C) Son kriyohidrik nokta

Yukarıdaki şekilde çileklerin dondurulmasında saptanmış böyle bir eğri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi çileklerin dondurulmasında da önce bir aşırı soğuma (A noktası) görülmektedir. B bölgesi ise çileklerin suyunun tamamına yakınının, yani; kristalizasyon gizli ısının uzaklaştırıldığı bölgedir. Bu bölgenin başlangıcında saf buz kristalleri, daha sonra ise

çözünmüş madde kristalleri ile karışmış olan buz kristalleri (kriyohidrik karışım) oluşmaktadır. Nihayet donmanın sona erdiği C noktasından sonra, çileklerin sıcaklığı hızla düşmeye başlamaktadır.



### A – B' Arası

Soğutma, sıcaklık donma sıcaklığının altına düşer. Bu bölge aynı zamanda ön soğutma bölgesidir (sıvı, dondurma yapılmadan). Gıdaların donma sıcaklığı 0°C'nin altındadır. (hissedilir ısıнын uzaklaştırılması)

Ön soğutma; Bu aşamada suyun sıcaklığı hissedilen ısıнын uzaklaştırılmasıyla donma noktasına düşer. Sıcaklık eğrisi küçük miktarda aşırı soğuma (0 °C'nin altında) göstermektedir. Bir defaya mahsus çekirdek oluşumu gerçekleşir ve buz kristalleri şekillenmeye başlar, donma noktası 0 °C' yükselir.

### B'

Aşırı soğuma bölgesi. Su sıvı haldedir.

### B' – C Arası

Buz kristalleri oluşmaya başlar. Kristalizasyon gizli ısısı açığa çıkmaya başlar. Sıcaklık donma sıcaklığına yükselir.

### C – D' Arası

Buzlanma aşaması, buzlanma nedeni ile donmamış halde bulunan su içindeki katı madde konsantrasyonu devamlı olarak artar ve sonuç olarak donma noktasında sürekli düşme gözlenir. Gıdada sıcaklık zamanla erimiş maddelerden dolayı biraz azalır. (gizli ısıнын uzaklaştırılması).

Donma aşaması; donma gizli ısısı sıvı sudan uzaklaştırılarak onu katı buza dönüştürürken, faz değişimi tamamlanıncaya kadar sıcaklık donma noktasında sabit kalır. Sıvı suyun tamamı,

katı buza dönüştüğünde donma sonrası süreçte, hissedilen ısı uzaklaştırılır ve buzun sıcaklığı hızla düşer.

### **D<sup>1</sup> noktası**

Gıda maddesinde donmamış halde bulunan su, içindeki katı madde bakımından aşırı doymuş hale gelir ve katı madde kristalizasyonu olur. Kristalizasyon gizli ısıyı açığa çıkar. Katı madde kristalizasyonunun başladığı noktadır. Sıcaklık söz konusu katı maddenin ötektik sıcaklığına eşittir.

**Ötektik nokta;** Bir çözeltinin eridiği sabit donma sıcaklığına denir. Maximum düzeyde kristalizasyonun gerçekleştiği en düşük sıcaklıktır. Çözücü su ise ötektik teriminden çok kriyohidrik terimi kullanılır. Donma işlemi sırasında gıda maddesinde donmamış halde bulunan suyun, içindeki katı madde bakımından aşırı doymuş hale gelmesi sonucunda gözlenen, katı madde kristalizasyonunun başladığı noktadır. Maximum buzlanma için gereklidir. Sanayide uygulanmaz.

Dondurma için-----	-50 °C
Et için-----	-50/-60 °C
Ekmek için -----	-70°C

### **D' – E Arası**

Dondurma işlemi sonrası soğutma bölgesidir. Gıda maddesinin sıcaklığı dondurucu sıcaklığına düşer. (hissedilir ısıнын uzaklaştırılması)

Suyun buz haline geçişinde kristal oluşumu ve kristallerin büyüklüğü dondurulmuş ürünlerin saklanması oldukça önemlidir. Kristallerin boyutları ortam sıcaklığına bağlıdır. Sıcaklık ne kadar düşükse kristallerin boyutu da o kadar küçük olur. Küçük boyutlu kristaller ürünün çözündürülmesi sırasında gıdanın yapısında bir zarara neden olmaz.

Günümüzde gıdaların dondurularak saklanması çok yaygın bir şekilde uygulanan en iyi muhafaza yöntemidir. Bu yöntemde hücre suyunun donması ve hücrelerin ölmesinin sağlanmasına kadar sıcaklık düşürülür. Dondurulmuş gıdalar uygun şekilde muameleye tabi tutulup işlendiğinde tazeliğini korurlar. Genel olarak dondurma işlemi diğer tüm muhafaza yöntemlerine oranla gıda maddelerinin tat, yapı ve besin değerlerinin en iyi korunduğu yöntemdir.

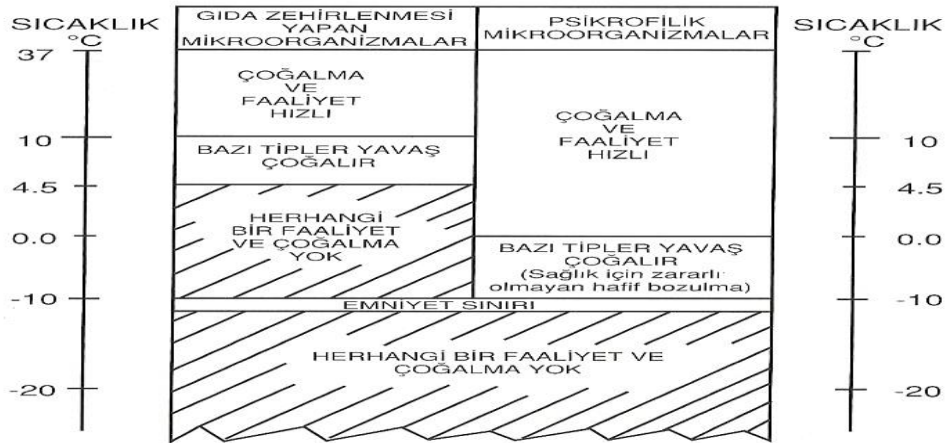
**Gıdalar genellikle -35 veya -40 derecede dondurulur, -18 veya -20 derecede muhafaza edilir.** Gıdadaki su miktarının azalması mikroorganizmaların yaşamalarına uygun olmayan bir ortam oluşturur. Ancak dokulardaki suyun donarak buza dönüşmesi sırasında hacim büyüdüğünden hücrelerdeki doku yapıları da bozulabilir. Bunu önlemek için donma olayının hızı çok iyi kontrol edilmelidir.

Gıdaların süratle bozulmalarının en önemli nedeni, fazla miktarda, hatta bazen %95 düzeyine erişen miktarda su içermeleridir. Yani, mikroorganizmalar, gıdaların çoğunda yeterli miktarda "faaydalanılabilir nitelikte" suyu kolaylıkla bulabilmektedir. Suyun mikroorganizmalarca faydalanılabilir nitelikte olması için, öncelikle onun sıvı fazda bulunması gerekir. **Buna göre mikroorganizmalar donmuş sudan yararlanamazlar.** Şu halde dondurma ile elde edilen sonuçlardan birisi, ortamı mikroorganizmalar için su yönünden elverişsiz kılmaktadır. Bu açıdan bakılınca, dondurma yolu ile adeta bir kurutma etkisi sağlanmakta yani, donmuş gıdanın su aktivitesi düşmektedir.

Gıda maddelerinde sıcaklık azaldıkça donan su miktarının arttığı görülür. Donma noktası altında sıcaklığa bağlı olarak su aktivitesi değeri de düşer. Dondurulma işlemi ile gıdanın su aktivitesinde düşme meydana gelir. Bu durumda mikroorganizmaların gelişmesini engeller.

Sıcaklık (°C)	Su aktivitesi (aw)
0	1.0
-5	0.95
-18	0.83
-20	0.80
-40	0.70
-50	0.62

Dondurmanın ikinci ve temel etkisi, belirli bir sıcaklığın altında mikroorganizma faaliyetlerinin kesinlikle durmasına neden olmasıdır. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi gerek gıda zehirlenmelerine neden olan mikroorganizmaların, gerekse psikrofilik mikroorganizmaların faaliyetleri -10°C'nin altında kesinlikle durmaktadır. Bazı mikroorganizmaların -18°C'nin altında bile çok yavaş faaliyet göstermesi, dondurarak muhafazada benimsenen bu temel ilkenin değişmesine neden oluşturmaz. Çünkü bulaşması dahi küçük bir olasılık olan bu tip mikroorganizmaların dondurulmuş ürünlerde -18°C ile -20°C'lerde belli bozulmaya neden olmaları hemen hemen olanaksızdır.



Sıcaklık ile mikroorganizma faaliyeti arasındaki ilişki

Gıdaları yavaş yavaş dondurursak oluşan buz kristalleri hücre dokularını parçalayacağından, yapısı bozulmuş olan bu gıda çözünme sırasında dışarıdan gelecek bakterilerin olumsuz etkilerine karşı direnç gösteremez ve çabucak bozulur. Donma sırasında oluşan buz kristallerinin boyutları, donma hızına bağlıdır. O halde donma, buz kristallerinin büyümelerine fırsat bırakmayacak şekilde mümkün olduğunca hızlı olmalıdır (şok donma). Bu şekilde dondurulmuş gıdalar tüketiciye ulaşana kadar dondurulmuş durumda olmalı ve depolarda -18 derecenin üstüne çıkılmamalıdır. Çünkü bir kere dondurulduktan sonra çözülen gıda artık dayanıklı değildir, hatta bu durumda bozulma daha hızlı oluşur, tekrar dondurmak da çare değildir.

Dondurulmuş gıda ürünlerinin kalitesi öncelikle hammaddenin ne şekilde işlendiğine, ne kadar verimli bir dondurma yöntemi uygulandığına ve sıcaklığın dağıtım ve depolama esnasında ne kadar dikkatli bir şekilde kontrol edildiğine bağlıdır. Dondurma işlemi, gıda ürünlerinin bozulmasına neden olan fiziksel ve biyokimyasal reaksiyonları yavaşlatır ancak asla tamamen durdurmaz. Bu reaksiyonlar zamanla ürün kalitesinin azalmasına yol açar.



Kalitenin azalma süresi; ürünün cinsine, kullanılan dondurma yöntemine ve depolama şartlarına bağlıdır.

### **Donma olayı ile birlikte;**

Buz kristalleri oluşması sonucu gerek gıdada gerekse mikroorganizmalarda fiziksel hasar meydana gelir. Gıdanın su aktivitesi düşer. Hücre içi çözünen madde konsantrasyonu artar, protein yıkımı başlar ve pH düşer. Mikroorganizmalar üzerinde termal şok başlar. Donmuş gıda maddelerinde, lipaz enzimi nedeni ile yağlarda acılaşma, renk kararmaları ve fiziksel şekil bozuklukları (pörsüme, büzülme, vb.) oluşur.

Depolama süresi iki farklı şekilde ölçülebilir. Bunlardan ilki, yüksek kalite süresidir (High Quality Life). Bu süre, yüksek kaliteli bir ürünün dondurulduğu andan başlayıp, ürün kalitesindeki hissedilebilir ilk azalmanın ortaya çıktığı ana kadar geçen süre olarak tanımlanır. İkinci ölçüm çeşidi ise Pratik depolama süresidir (Practical storage life). Bu süre de, ürünün dondurulmasından itibaren tüketim veya başka işleme tabi tutulabilmesi için donmuş şekilde yeterli kaliteyi muhafaza edebildiği süredir.

### **Su ve Buzun Bazı Fiziksel Nitelikleri**

**Yoğunluk:** Suyun 4 °C’de yoğunluğu 1000 kg/m<sup>3</sup>’tür. Suyun sıcaklığı yükseldikçe bu değer azalır. Mesela 100 °C’de suyun yoğunluğu 958.4 kg/m<sup>3</sup>’tür. 0 °C ‘deki suyun yoğunluğu 999.8 kg/m<sup>3</sup> olduğu halde, faz değiştirip donunca yoğunluğu birdenbire düşer. Buna göre 0 °C’deki suyun yoğunluğu 916.8 kg/m<sup>3</sup>’tür. Böylece 0°C’deki suyun, buza dönüşmesiyle hacminin yaklaşık % 8.3-9.0 oranında arttığı anlaşılmaktadır. Bu durum suya özgü bir davranıştır.

**Özgül Isı:** Suyun 0 °C’de özgül ısısı 4.2176 kJ/kgK ve buna karşın 100 °C’de ise 4.211 kJ/kgK’dir. Görüldüğü gibi suyun özgül ısısı 0-100 °C arasında hemen hemen hiç değişmemekte, sabit kalmaktadır. Ancak su donup katı faza dönüşünce, özgül ısısı yarıya düşmektedir. Nem içeriğine göre de gıdaların özgül ısıları değişir. Nem içeriği azaldıkça özgül ısı azalmaktadır.

**Isıl İletkenlik Katsayısı:** Suyun 0 °C’deki ısıl iletkenlik katsayısı 0.5610 W/mK’dir. Sıcaklık yükseldikçe ısıl iletkenlik katsayısı da yükselmektedir. Ancak su katı faza dönüşünce, ısıl iletkenlik katsayısı birdenbire yükselmektedir. Mesela buzun 0 °C’de ısıl iletkenlik katsayısı 2.240 W/mK düzeyindedir. Buzun ısıl iletkenliği, suyun ısıl iletkenliğinden yaklaşık 4 kat daha büyüktür. Bunun sonucu olarak gıdaların dondurulması çözündürülmesinden hızlıdır.

**Isıl Yayınım Katsayısı:** Bir maddenin ısıl yayınım katsayısı (thermal diffusivity) onun ısıl iletkenlik katsayısı, özgül ısısı ve yoğunluğu ile ilişkili bir değerdir. Isıl yayınım katsayısı yükseldikçe, ısı yayınımı, yani; sıcaklığın zamana göre değişimi artar. Suyun 0 °C’deki ısıl yayınım katsayısı 1.31x10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s, buzunki ise 11.70x10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s’dir. Bu değerlerden buzun suya göre neden hızla ısınıp soğuyabildiğini anlayabiliriz. Gıdaların donma ve çözünme hızlarında farklılığın nedeni de buzun ve suyun ısıl yayınım katsayılarının değişik olmasına dayanmaktadır. Gıdanın ısıl yayınım katsayısı gıdanın ısıl iletkenlik, yoğunluk ve özgül ısı değerlerine göre değişmektedir. Donma noktası altında yoğunluk ve özgül ısı değeri azalmakta, ısıl iletkenlik değeri artmaktadır. Buna bağlı olarak, ısıl yayınım katsayısı artmaktadır.

**Entalpi Değişimi:** Su, basınca bağlı olmaksızın 0 °C’de donar. Suyun “donma gizli ısısı” 335 kJ/kg’dır. Buna göre 0 °C’deki su, 0 °C’deki buz haline dönerken 335 kJ/kg ısı serbest kalır. Böylece, 0°C’deki suyun entalpisinin 0 °C’deki buza göre 335 kJ/kg daha yüksek olduğu görülmektedir. Buz erirken aynı enerjiyi, yani “erime gizli ısısını” kazanması gerekmektedir.

## Suyun termal özellikleri

1. Bilinen tüm maddeler ısıları düştükçe büzüşürler. Bilinen tüm sıvılar da yine ısıları düştükçe büzüşür, hacim kaybederler. Hacim azalınca yoğunluk artar ve böylece soğuk olan kısımlar daha ağır hale gelir. Bu yüzden sıvı maddelerin katı halleri, sıvı hallerine göre daha ağırdır. Ama su, bilinen tüm sıvıların aksine, belirli bir ısıya (+ 4°C'ye) düşene kadar büzüşür, ama sonra birdenbire genleşmeye başlar. Dondduğunda ise daha da genleşir. Bu nedenle suyun katı hali, sıvı halinden daha hafiftir. Yani buz, aslında "normal" fizik kurallarına göre suyun dibine batması gerekirken, su üstünde yüzer.

2. Buz eridiğinde ya da su buharlaştığında, etraftan ısı çekilir. Bunun tersi gerçekleştiğinde ise, dışarıya ısı verilir. Bu "gizli ısı" olarak bilinen kavramdır. Gizli ısı, suyun ısınıp değişirmeyen, ancak sadece onun katıdan sıvıya ya da sıvıdan gaz haline geçmesini sağlayan ısıdır. Bir buz eritmek için ona ısı verdiğinizde, buz 0°C'ye kadar gelir. Sonra biraz daha ısı verirsiniz, buzun ısısında hiçbir artış olmaz, hala 0°C'dir. Ama artık buz değildir, eriyip su olmuştur. Isıda bir fark olmamasına rağmen, sadece katı halin sıvıya dönüşmesi için kullanılan bu enerjiye "gizli ısı" denir.

Tüm sıvıların gizli ısıları vardır. Ancak suyun gizli ısısı, bilinen tüm sıvıların en yükseği sayılabilir. Normal ısılarda, sadece amonyak sudan daha yüksek bir donma gizli ısısına sahiptir. Buharlaşma gizli ısısında ise hiçbir sıvı, su ile boy ölçüşemez.

3. Suyun "termal kapasitesi", yani suyun ısınıp bir derece artırmak için gereken ısı miktarı, bilinen diğer sıvıların çok büyük bölümünden daha yüksektir.

4. Suyun termal iletkenliği, yani ısıyı iletebilme yeteneği, bilinen diğer herhangi bir sıvıdan en az dört kat daha yüksektir.

5. Buzun ve karın termal iletkenlikleri ise düşüktür.

Teknik birer fiziksel özellik gibi duran yukarıdaki beş maddenin ne gibi bir öneme sahip olduğunu merak edebilirsiniz. Bunlar çok büyük bir öneme sahiptir, çünkü dünya üzerindeki yaşam ve bizim hayatımız, bu üstteki özelliklerin tam tamına bu şekilde olması sayesinde mümkündür.

## Suyun Genleşmesi

Genleşme, sıcaklık, basınç, kuvvet gibi etkenlerle cismin boyutlarında görülen büyümedir. Genleşmedeki asıl neden ısı alan maddenin atomlarının hızlarının artması ve atomların arasındaki uzaklığın artmasıdır. Aslında bütün maddeler hacimce genleşir. Ancak telve çubuk şeklindeki maddelerin boylarının yanında, diğer boyutları ihmal edilebildiği için yalnızca boyca genleştikleri kabul edilecektir. Aynı şekilde ince levhaların yüzeylerinin yanında, diğer boyutları ihmal edilebildiği için yalnızca yüzeyce genleştikleri kabul edilecektir. Isı enerjisi alan bütün maddeler genleşir. Ancak bu durum su için bir aykırılık gösterir. Su 0' ile +4 °C' arasında hacim kaybeder. Ve +4' de en büyük hacme en düşük yoğunluk değerine ulaşır. Bu olaya 'suyun anormalliği' adı verilir. Suyun bu davranışının doğanın dengesi bakımından büyük bir önemi vardır.

## Suyun Donma Noktası

Suyun basit fakat çevre açısından son derece önemli bir özelliği de suyun sıvı hali üzerinde batmadan yüzeabilen, suyun katı hali olan buzdur. Bu katı faz, (sadece düşük sıcaklıklarda oluşabilen) hidrojen bağları arasındaki geometriden dolayı, sıvı haldeki su kadar yoğun



değildir. Hemen hemen tüm diğer maddeler için, katı form sıvı formdan daha yoğundur. Standart atmosferik basınçtaki taze su, en yoğun halini 3.98 °C'de alır ve aşağı hareket eder, daha fazla soğuması halinde yoğunluğu azalır ve yukarı doğru yükselir. Bu dönüşüm, derindeki suyun, derinde olmayan sudan daha sıcak kalmasına sebep olur, bu yüzden suyun büyük miktardaki alt bölümü 4 °C civarında sabit kalırken, buz öncelikle yüzeyde oluşmaya başlar ve daha sonra aşağı yayılır. Bu etkiden dolayı, göllerin yüzeyi buz ile kaplanır. Hemen hemen tüm diğer kimyasal maddelerin katı halleri, sıvı haline göre yoğun olduğundan dipten yukarı donmaya başlarlar.

Suyun hacmi, bilinen tüm sıvıların aksine, belirli bir sıcaklığa (+4 °C'ye) düşene kadar azalır, daha sonra tekrar artmaya başlar. Donduğunda ise hacmi sıvı hale göre daha fazladır. Bu nedenle suyun katı hali, sıvı halinden daha hafiftir. Bu yüzden buz, suyun dibine batmayıp su üstünde yüzer. Suyun bu özelliği yaşamın kış aylarında ya da her zaman soğuk olan bölgelerde sudaki yaşamın devam etmesine olanak tanır. Deniz, nehir ve göllerin üst kısmı donar, buz üst kısımda kaldığı için su içindeki canlılar yaşamlarını sürdürmeye devam edebilirler. 100% saf suyun tamamı -48 °C'de donar.

### **Suyun Gizli Buharlaşması**

100 °C'de 1 g suyu 1 g su buharı haline dönüştürmek için 539 kaloriye ihtiyaç vardır. Gizli buharlaşma ısısının yüksekliği canlı sisteminin izotermal olmasında en önemli katkıya sahiptir. Suyun gizli buharlaşma ısısı, H bağlarından dolayı yüksektir.

### **Suyun Erime Isısı**

1 gram buz eritmek için 0 °C'de 80 kalori gerekir. Erime ısısının yüksek olması suyun donmasını geciktirir; böylece biyolojik sistemler düşük sıcaklıklara dayanıklı olabilen özelliklerini kazanırlar.

### **Suyun Yüzey Gerilimi**

Su, molekülleri arasındaki güçlü kohezyon kuvveti nedeniyle oluşan yüksek yüzey gerilimine sahiptir. Bu görülebilir bir etkidir, örneğin, küçük miktardaki su çözünmez bir yüzey üzerine (örn: polietilen) konduğunda, su, diğer madde ile beraber düşene dek kalacaktır.

Bu kuvvetin kaynağı temel olarak su moleküllerini bir arada tutan moleküller arası çekici kuvvetlerdir. Suyun içinde olan moleküller her yönden komşu moleküllerle kuşatıldıkları için, üzerlerine etkiyen toplam kuvvet sıfırdır. Buna karşın, yüzeydeki moleküllerin sadece bir tarafı diğer su molekülleriyle çevrili olduğu için, bunlar içeriye doğru net bir kuvvetle çekilirler. Bu durum yüzeyde bir gerilme oluşturup yüzeyin minimum olmasını sağlar. Hacimleri eşit birçok geometrik şekil içinde yüzey alanı en az olan küredir. Su damlalarının küresel bir şekil alması da yüzey geriliminin en az yüzey oluşturacak şekilde molekülleri hareket ettirmesidir.

### **Su ve buzun başlıca fiziksel nitelikleri**

#### **Yoğunluk**

Suyun 0°C'deki yoğunluğu 999.8 kg/m<sup>3</sup> (0.9998 g/cm<sup>3</sup>)

Buzun 0°C'deki yoğunluğu 916.8 kg/m<sup>3</sup> (hacimde yaklaşık %8.3-9.0 artış) (0.9193 g/cm<sup>3</sup>)

#### **•Özgül ısı**

Suyun 0°C'deki özgül ısısı 4.2176 kJ/kg K

Buzun 0°C'deki özgül ısısı 2.1009 kJ/kg K

Sıcaklık düştükçe özgül ısı da düşmektedir.

#### **•Isıl iletkenlik katsayısı**

Suyun 0°C'deki ısı iletkenlik katsayısı 0.5610 W/m K

Buzun 0°C'deki ısı iletkenlik katsayısı 2.240 W/m K

Buzun sıcaklığı düştükçe ısı iletkenliği daha da iyileşmektedir.

•Isıl yayınım katsayısı

Suyun 0°C'deki ısı yayınım katsayısı  $1.31 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s

Buzun 0°C'deki ısı yayınım katsayısı  $11.70 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s

•Entalpi değişimi

Suyun donma gizli ısısı 335 kJ/kg dır.

Bazı hayvansal ve bitkisel kökenli gıdaların dondurulmasında sıcaklığa bağı olarak su içeriğinin buza dönüşüm oranları

Sıcaklık (°C)	Suyun donma %'si
-5	75
-10	82
-20	85
-30	87
-40	91
-65	100

Sıcaklık (°C)	Su içeriğinin buza dönüşme oranı (%)		
	Yağsız et	Morina balığı	Portakal suyu
-40	89.2	92.5	97.9
-30	88.5	91.8	96.9
-20	87.0	90.4	94.9
-18	86.5	90.0	94.3
-16	85.9	89.4	93.5
-14	85.1	88.7	92.4
-12	84.0	87.7	91.0
-10	82.5	86.3	89.1
-9	81.5	85.4	87.7
-8	80.2	84.3	86.1
-7	78.6	82.8	84.0
-6	76.5	80.8	81.2
-5	73.5	78.1	77.3
-4	69.9	74.0	71.4
-3	61.5	67.1	61.6
-2	46.5	53.4	42.0
-1	1.5	12.2	0.0
0	0.0	0.0	0.0

**Bitkisel Dokuların Donması**

Meyve ve sebze gibi bitkisel kökenli fakat parçalanmamış bütün doku halindeki gıdalar hücrelerden oluşurlar. Yüksek miktarda su içerseler de, bu dokular çözeltide olduğu gibi,

sürekli bir sıvı faz olarak düşünülemezler. Komşu hücreler arasında daima az veya çok boşluklar bulunmaktadır. Bir hücrede bulunan toplam suyun önemli bir kısmı stoplazma ve vakuolde yer almakla birlikte, hücrenin her tarafında, hatta membranda, hücre duvarında ve hücreler arasındaki boşlukta daima su bulunmaktadır. Öyleyse, bitkisel bir dokunun dondurulmasında, hücrenin her tarafında buz kristalleri oluşma şansı vardır. Ancak bu kristallerin, oluşma önceliğinin yeri, özellikle donma hızına bağlı olarak bazı faktörler tarafından belirlenmektedir.

Bitkisel bir doku dondurulurken, suyun kristalizasyonu ilk önce hücreler arası boşluklarda gerçekleşir. Çünkü buralardaki çoğunluğun hava olan gazda bulunan su buharının, soğuması ile yoğunlaşması sonucu oluşan su, sadece çok seyreltik bir çözelti niteliğindedir. Yani, oluşan bu çözeltinin konsantrasyonu, hücre içindeki sıvının konsantrasyonu ile kıyaslanamayacak kadar düşüktür. Bu nedenle donma sırasında ilk buz oluşumuna karşı gösterdiği bir tür engelleme özelliği de eklenince; hücre içinde kristalizasyonun başlaması zorlaşmakta ve gecikmektedir.

Dondurulan dokudan ısı uzaklaştırıldıkça, hücrelerin çevresi, sıcaklığı gittikçe düşen bir buz yuvası ile sarsılır. Hücre dışında buz kristallerinin oluşumu ve bunların büyümesi sonucunda, hücre dışında, başlangıçtaki aksine hücre içi sıvısına kıyasla konsantrasyonu daha yüksek ve donamamış durumda, yoğun bir çözelti oluşur. Böylece hücre içindeki donmamış sıvı ile hücre dışındaki sıvının su buharı basıncından daha yüksek olması demektir. İşte bu nedenle ozmotik basınç bakımından bir dengeye ulaşmak için hücre içinden hücre dışına su buharı transferi gerçekleşir ve bu oluşum, hücre dışındaki kristallerin daha da büyümesini sağlar. Bu yolla hücre, içindeki kendi öz suyunu kaybederek adeta kurur. Böylece hücre içi sıvısının yoğunluğu gittikçe artar. Buna bağlı olarak hücre içi sıvısının donma noktası daha da düşer ve adeta hücre içinde buz kristalleri oluşma şansı kaybolur.

Bitkisel dokularda hücre duvarı ve membranı hücre içinde buz oluşumuna karşı bir engel gibi davranmaktadır. Bu engelleme daha çok haşlanmamış bitkisel dokular için söz konusudur. Buna karşın haşlama sonucunda zedelenmiş sebze dokularında, bir hücreden bile daha iri buz kristallerinin oluşma olasılığı vardır. Eğer soğuma hızı düşükse; hücrede oluşmuş tek bir kristal, hücrenin duvarındaki bir pordan komşu hücrenin içine doğru yürüyebilir. Böylece ikinci hücredeki kristal, aslında birinci hücredeki kristalin devamından başka bir şey değildir. Haşlama gibi bir işlemin uygulanmadığı zedelenmemiş normal bir hücrede ise böyle bir oluşum gerçekleşemez.

### **Hayvansal Dokuların Donması**

Hayvansal dokuların donması bitkisel dokuların donmasından biraz farklıdır. Bunun başlıca nedeni bitkisel hücrelerin bir "hücre duvarı-hücre zarı" kompleksi içermelerine karşın, hayvansal hücrelerde sadece bir hücre zarı bulunmasıdır. Bitkisel hücrelerin "hücre duvarı-hücre zarı" kompleksi, hücre içinde buz kristalleri oluşumunda önemli bir engel olarak davranırken, hayvansal hücre zarlarının bu engelleme rolü çok sınırlıdır. Bu yüzden hayvansal dokuların donmasında hücre içi buz kristalleri oluşumu, bitkisel hücrelere göre çok daha kolaydır. Bu nedenle hayvansal dokuların dondurulmasında, donma hızının donan dokunun niteliklerine etkisi genellikle çok sınırlıdır ve çözülmüş dokuda bu etki hemen hemen yok denecek kadar azdır. Bu konuda, hayvansal dokuların hücre zarının, yarı sert bitkisel hücrelere kıyasla esnek bir nitelikte olması da diğer bir etkidir.

**Çözeltilerin Donma Noktası:** Su 0 °C'de donmakla birlikte glukoz, fruktoz veya sakaroz gibi bir katı madde suda çözününce, oluşan çözeltinin donma noktası artık 0 °C'nin altına iner. Gıdalardaki su, içerisinde çeşitli bileşiklerin çözülmüş bulunduğu bir çözelti halinde olduğundan, gıdaların donma noktası, suyun donma noktasının biraz altındadır. Suyun donma noktasıyla, bir çözeltinin donma noktası arasındaki farka, "donma noktası depresyonu" denir. Donma noktası depresyonu, doğrudan doğruya çözülmüş maddenin konsantrasyonu ve molekül ağırlığının bir fonksiyonudur.

**Gıdaların Donma Noktası:** Bir çözeltinin veya bir gıdanın “donma noktası” denince donma başlangıç noktası, yani ilk buz kristallerinin oluştuğu sıcaklık anlaşılır. Bilindiği gibi çözeltilerde ve gıdalarda donma olayı donma noktasında başlar, gittikçe düşen sıcaklıklarda devam eder ve nihayet ötektik nokta denen özel bir sıcaklıkta sona erer. Gıdaların donma noktaları, deneysel yolla veya geliştirilmiş bazı eşitliklerle saptanabilmektedir.

Bazı gıda gruplarının donma noktaları

Gıda grupları	Su içeriği (%)	Donma noktası (°C)
Sebze	78 – 92	–0.8 ile –2.8
Meyve	87 – 95	–0.9 ile –2.7
Et	65 – 70	–1.7 ile –2.2
Balık	65 – 81	–0.6 ile –2.0
Süt	87	– 0.5
Yumurta	74	– 0.5

**Donma Süresi ve Donma Hızı:** Bir gıdanın donma olayı, üç aşamada gerçekleşmektedir. Birinci aşama, gıdanın bulunduğu sıcaklıktan, donma başlangıç derecesine kadar, yani; suyun kristalleşmeye başladığı ana kadar geçen süredir. Bu süreye donma öncesi soğuma denir. Gıdada bulunan donabilir nitelikteki suyun tamamına yakını donunca, donma aşaması sona erer ve yeni bir soğuma aşaması başlar. Donma sonundaki bu soğuma aşamasında gıda, donmanın sona erdiği sıcaklıktan “son sıcaklığa” veya “dengeleme sıcaklığına” kadar soğur.

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

**Nominal donma süresi:** Dondurulan gıdanın yüzey sıcaklığının 0 °C’ye eriştiği andan, termal 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  $(-1.5 + (-10)) = -11.5$  °C) erişene kadar geçen süre, o gıdanın 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 değerdir. Gıda maddelerinin kalitesinin tahmininde yararlanılır.

**Efektif donma süresi (etkin donma süresi):** Dondurulacak gıdanın bulunduğu sıcaklıktan, termal merkez sıcaklığının belli dereceye düşmesi için geçen süreye denir. Örneğin, bir gıda dondurucuya 18 °C’de (başlangıç sıcaklığı) giriyorsa ve donma sonunda termal merkez sıcaklığının -15°C’ye düşmesi hedef alınmışsa, efektif donma süresi gıdanın 18 °C’den termal merkez sıcaklığı -15 °C’ye inene kadar geçen süredir. Yani bu süre dondurucunun işgal edildiği süredir. Bu nedenle dondurucunun kapasitesinin belirlenmesinde kullanılacak nitelikte bir değerdir. Efektif donma süresi uygulamada karşılaşılan gerçek donma süresidir.

### Donma Süresini Etkileyen Faktörler

Donma süresi, ısı tutuklanma süresidir. Isıl merkez sıcaklığının 0 °C’den -5 °C’ye düşmesi için geçen süredir. Bir materyalin donma süresi, onun donma hızı hakkında bir fikir vermez. Bu nedenle çeşitli gıdaların donma süreleri kıyaslanarak onların donma hızları hakkında bir görüş bildirilemez. Donma hızının çok farklı tanımları bulunmaktadır. Bir grup araştırmacı donma hızını; “termal merkez sıcaklığının,  $T_1$  dereceden  $T_2$  dereceye düşmesi için geçen süre” olarak tanımlamaktadır. Ancak her araştırmacı bu tanımda yer alan  $T_1$  ve  $T_2$  sıcaklıklarını farklı kabul etmektedir.

Donma hızı gerçekte sabit değildir ve donma süresi boyunca hızlanarak artar.

Donma hızı; Termal merkez sıcaklığının  $T_1$  °C' den  $T_2$  °C'ye düşmesi için geçen süre olarak belirlenmiştir. Örneğin  $T_1$ :-1 °C ve  $T_2$  ise -7 °C olarak alınmıştır. Suyun büyük bölümü bu sıcaklık aralığında donmaktadır.

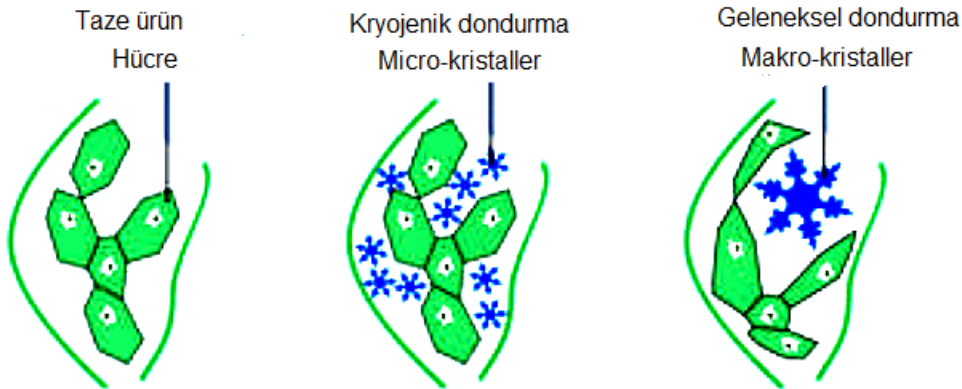
Donma hızı; dondurulan materyalin termal merkezinin yüzeye olan en yakın mesafesinin, nominal donma süresine oranı olarak tanımlanmaktadır. (Ortalama donma hızı denir). Donma hızı, buz cephesinin yüzeyden içeriye doğru gelişme hızını ifade etmektedir. Donma hızı gerçekte sabit değildir. Donma süresi boyunca hızlanarak artar. (Buzun ısı iletiminin sudan daha fazla olduğu için)

**Donma hızı;** dondurulan materyalin dondurucuya giriş sıcaklığı ile son sıcaklığı arasındaki farkın, donma süresine bölümüyle elde edilen değer  $^{\circ}\text{C}/\text{h}$  veya  $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ . şeklinde tanımda en yaygın kullanılan tanımdır.

Donma hızı, dondurulan gıdanın kalitesi üzerine etkili en önemli faktörlerden birisidir. Bu yüzden donma hızının çeşitli ülkelerin mevzuatında sınıflandırıldığı ve tanımlandığı görülmektedir. Çizelgede yaygın olarak benimsenmiş bir sınıflandırma ve bunların hangi tip dondurucularda gerçekleştiği gösterilmiştir.

Donma hızı ve dondurucu tipleri

Donma hızı	Donma hızı ( $\text{cm h}^{-1}$ )	Dondurucu tipi
Yavaş dondurma	0.2'ye kadar	Durgun soğuk hava dondurucu,
Çabuk dondurma	0.3–0.5	Hava dolaşımli dondurucu ve plakalı dondurucu,
Hızlı dondurma	0.5–1.0	Akışkan yatak dondurucu,
Aşırı hızlı donma	1.0 üzerinde	Kriyojenik dondurucu



Hızlı ve yavaş dondurma sürecinde buz kristali oluşumu ve hücre üzerindeki etkisi

**Don Çatlağı;** gıdaların hızlı dondurulmasının bir çok olumlu yönleri bulunmasına karşın, belki de tek olumsuz yönü, bazı gıdalarda belli koşullarda çatlamalara ve hatta daha ileri düzeye ulaşarak parçalanmaya neden olmasıdır.

**Don yanığı;** Ambalajsız gıdaların dondurulması sırasında yüzeyde süblimasyonla nem kaybı sonucu oluşan renk değişimine nedirdir. Suda çözünen maddeler yüzeye su ile taşınır ancak, su buharlaşması sonucu yüzeyde birikme oluşur.

**Glazing;** ambalajsız gıdalarda don yanığının önlenmesi için ürün yüzeyinin ince bir buz tabakası ile kaplanmasıdır.

**Ostwald olgunlaşması;** hızlı dondurma ile oluşmuş küçük buz kristalleri ancak düşük sıcaklıklarda stabil kalabilir. Eğer ortam sıcaklığı yükselirse, küçük kristaller kaybolarak,

biraz daha büyük olanlar daha da büyürler. Bu olay sistemin ulaştığı yeni sıcaklıklarda tüm kristallerin stabil 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.

**Camsı yapı;** Çözülmüş maddenin büyük moleküllü olması veya ötektik sıcaklığın çok düşük olmasına bağlı olarak soğutma sonunda kristalizasyonun engellenebileceği yüksek bir viskoziteye ulaşılması nedeniyle belli bir sıcaklıkta ( $T_g$ ) ortaya çıkan yapıdır.  $T_g$ , depolama stabilitesinin belirlenmesinde önem taşır.  $T_g$  derecesinin altında depolanınca maksimum stabilite göstermekte, tabi  $T_g$  altındaki bir sıcaklıkta depolama ile her türlü olumsuz reaksiyonlar değil, sadece difüzyona bağlı olarak gelişen reaksiyonlar (rekristalizasyon, nem migrasyonu gibi fiziksel olaylar) sınırlanabilmektedir.

Bir çok gıdanın  $T_g$  sıcaklığı, halen onlara ticari olarak uygulanan donmuş halde depolanmalarındaki sıcaklıktan daha düşük olduğu bilinmektedir. Böylece donmuş gıdayı en iyi nitelikte koruyabilmek için dondurmadan önce uygun bazı polimerler ekleyerek onun doğal  $T_g$  derecesini yükseltmektedir.  $T_g$  erime sıcaklığından her zaman daha düşüktür.  $T_g$  sıcaklığına erişildiğinde ise polimer sert ve camsı davranışa geçer.

Amorf yapının (yumuşak kauçuğumsu) sert, kırılğan ve katı (rijit) camsı yapıya geçtiği sıcaklığa ise camsı geçiş sıcaklığı denir.

Bir sıvıda, atomlar kristal yapıya göre daha hızlı hareket eder. Sıvı soğutulduğunda atomların hareket edebildiği alan küçülür (boşluk hacmi azalır ve yoğunluğu kristal yoğunluğuna yaklaşır). Camsı geçiş sıcaklığının altına inildiğinde atomlar artık hareket edemez, malzeme katı hale gelir.

#### **Camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) özellikleri**

1. Dondurarak kurutmada ürün sıcaklığı  $T_g$ ' nin altında olmalıdır. Aksi takdirde ürünün yapısı bozulur. Bir polimer soğutulduğunda katılaşması olayı çamsılaşmadır.
2. Ürünlerin  $T_g$ ' nin sıcaklığının üzerinde depolanmaları kimyasal reaksiyonları hızlandırır.
3. Cips ve benzeri ürünlerde  $T_g$ ' nin üzerinde depolama ürünün gevrekliğini bozar
4. Polimer maddelerin temel ayırt edici özelliklerinden biridir.
5. Maddenin camsı özelliklerini kaydedip viskoz özelliklerini kazanmaya başladığı sıcaklık sınırıdır.
6. Erime sıcaklığından her zaman daha düşüktür.
7. Polimerler  $T_g$ ' nin altındaki sıcaklıklarda sert ve kırılğan, üstündeki sıcaklıklarda ise yumuşak ve esnektirler.

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

**1. Gıdanın ısı iletkenlik katsayısı:** Dondurulan gıdanın ısısı, kondüksiyonla yüzeye taşınarak buradan dondurucu ortama ulaşır uzaklaştırıldığına göre, gıdanın ısı iletkenlik katsayısının donma süresine ne kadar etkili olduğu kolaylıkla anlaşılabilir. Donma süresinin hesaplanmasında kullanılacak olan ısı iletkenlik katsayısı değeri, tercihen deneysel yolla saptanmış değer olmalıdır. Eğer böyle bir değere ulaşılamazsa, gıdanın bileşenlerinden yararlanılarak daha önce değinilen yolla hesaplanmış değer kullanılabilir.

**2. Isı transferinin gerçekleştiği yüzey alanı:** Donma süresi üzerine, gıdanın ısı transferine elverişli alanının da etkili olduğu kuşkusuzdur. Bu alan gıdanın geometrik şekline bağlıdır. Bu nedenle, donma süresinin hesaplanmasında yararlanılan birçok eşitlikte, yüzey alanının etkisini yansıtmak amacıyla, geometrik şekil ile ilgili bazı katsayılar yer almaktadır.

**3. Gıdanın kalınlığı, iriliği ve şekli:** Dondurulan gıdanın iç kısımlarındaki ısının yüzeye ulaşması için geçen yol, donma süresine etki eden faktörlerden birisidir. Bu nedenle donma



süresinin hesaplanmasında, gıdanın kalınlığı dikkate alınarak bu önemli faktörün etkisi karşılanmaktadır. Kalınlık arttıkça donma süresinin uzadığı bilinen bir gerçektir.

**4.Ambalajın şekli, kalınlığı ve büyüklüğü:** Gıdanın ambalajlanmış olması donma süresini uzatan en önemli faktörlerden birisidir. Ambalaj materyalinin ısı iletkenlik katsayısı ve kalınlığı, ambalajın donma süresi üzerine etkisini tayin eder. Ambalaj ideal olarak gıdayı bir deri gibi sarmalı, arada boşluk kalmamalıdır. Ambalajla gıda arasında kalabilecek hava boşluğu yüzünden oluşan iki yeni sınır yüzey filmi, bu hususta ek olumsuzluklara neden olmaktadır. Eğer ambalajla gıda arasında bir boşluk varsa, bu katman dikkate alınmadan yapılan bir donma süresi hesabı, tutarlı olmaz. Normal olarak ambalajın donma süresine etkisi, toplam ısı transfer katsayısının hesaplanmasında dikkate alınmaktadır.

**5.Gıda ve dondurucu ortam sıcaklık farkı:** Gıdanın sıcaklığı ile dondurucu ortamın sıcaklığı arasındaki fark, ısı transferinin itici gücüdür. Bu fark büyüdükçe ısı transferi hızlanır ve donma süresi kısalır. Kriyojenik dondurmada donma süresinin kısalmasının nedenlerinden birisi budur.

**6.Yüzey filmi:** Gıdaların bir akışkandan yararlanılarak ısıtılması veya soğutulmasında ısı transferine direnç gösteren faktörlerden birisi, yüzey filmidir. Yüzey filminin kalınlığı arttıkça, ısı transferi güçleşir. Dondurulacak materyalin yüzeyindeki filmin kalınlığı, hava hızı ve sıcaklığı başta olmak üzere çeşitli faktörler tarafından etkilenmektedir. Hava hızı arttıkça, bu filmin kalınlığı azalmakta ve böylece ısı transferi iyileşmektedir.

## **Dondurma Yöntemleri ve Dondurucu Tipleri**

### **1. Soğuk Hava ile Dondurma**

Halen en yaygın uygulanan, değişik cihazlardan yararlanılan ve birçok modifikasyonu olan en eski yöntem budur. “Durgun havada dondurma” ve “hava akımında dondurma” olarak başlıca iki farklı uygulaması vardır. Soğuk Hava ile Dondurma Soğutucu gaz olarak, genellikle bir soğutma ekipmanının evaporatörü yardımıyla soğutulan hava kullanılarak yapılan dondurma işlemidir.

**1.1.Durgun Havada (konveksiyonla) Dondurma:** Metodun isminden de anlaşıldığı gibi, dondurmada kullanılan soğuk hava, hareketsizdir. Böyle bir dondurucunun esası, iyice izole edilmiş bir soğuk odadır. Soğutma ekipmanının evaporatörü, tavanda, duvarda veya odanın ortasında yukarıdan aşağıya doğru uzanan borular demeti şeklinde bulunabildiği gibi dikine raflar şeklinde de olabilir. Dondurulacak ürünler bu raflar arasında istif edilir. Durgun havada dondurma yönteminde soğuk odanın sıcaklığı -15 °C ile -30 °C arasında değişir. Hareketsiz veya çok yavaş hareketli bir hava ile dondurulan materyalin yüzeyi arasında sağlanan ısı transferi katsayısı çok düşük olduğundan, dondurulmak üzere depoya konan gıda maddesinin donması çok uzun sürmektedir. Bu yöntem esas olarak balık dondurmak amacıyla uygulanmış olup halen aynı amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır. Sharp freezing; -15 ile -30 °C – balık dondurma

- Soğuk hava hareketsizdir
- Basit ve ucuzdur
- Donma süresi uzundur.

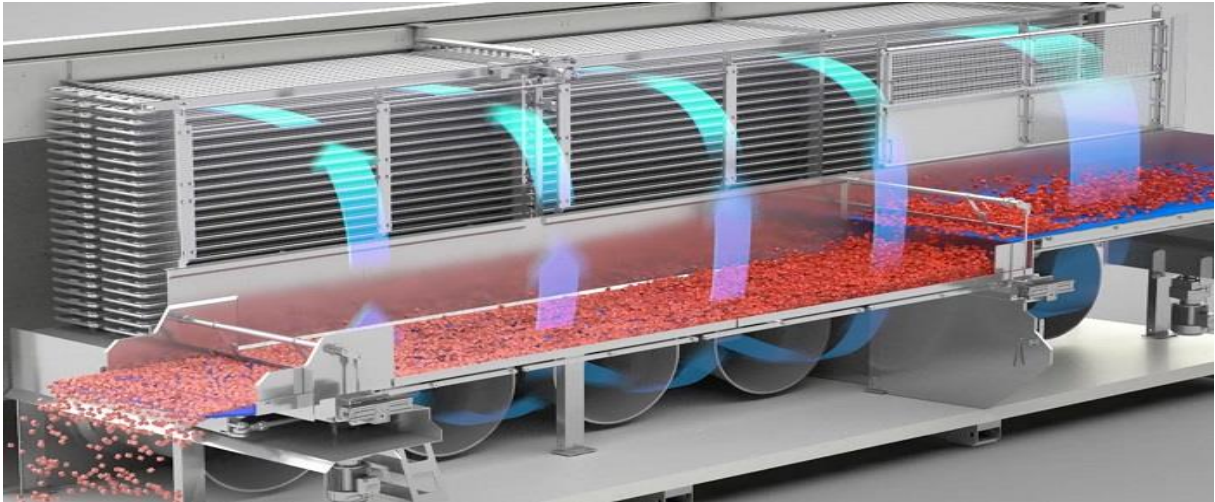
Bu tip dondurucular kullanılan ekipman açısından basit ve ucuzdur. Durgun hava dondurma odalarında hava hareketini sağlayan genelde hiçbir düzen yoktur, hava sadece doğal taşınım ile hareket etmektedir. Ancak bunu bir hava hareketi olarak görmek olanaksız olduğundan havanın durgun olduğu kabul edilmektedir Hatta bazı durgun hava dondurucularında bir fan yardımıyla, sınırlı bir hava hareketi sağlanmaktadır. Ancak bu düşük hava hızı nedeniyle

böyle bir düzenlemeyi "hava akımında dondurma" yöntemiyle karıştırmamak gerekir. Çünkü hava akımında dondurmada hava, zorlanmalı bir sirkülasyonla yüksek bir hızla dolaştırılarak, yüksek bir donma hızı sağlanabilmektedir.

Gıda maddelerinin dondurulmasında eskiden beri uygulanan ve bu alandaki en eski metod olan durgun havada dondurma metodu, "sharpfreezing" yani; "hızlı (ani) dondurma olarak isimlendirilmektedir. Bu yöntem günümüzde isminin çok gerisinde kalan bir uygulamadır. Çünkü daha iyi bir yöntemin bilinmediği -18 °C 'nin altında dondurmanın sağlanamadığı bir dönemde verilen bu ismin, bugünkü teknikteki anlamı tamamen farklıdır.

Durgun havada dondurma yönteminde soğuk odanın sıcaklık derecesi - 5 °C ila - 30 °C arasında bulunur. Hareketsiz veya çok yavaş hareketli bir havanın ısı iletkenliği çok düşük olduğundan, dondurulmak üzere depoya konan gıda maddesinin donması çok uzun süre alır. Donma süresi, dondurulan materyalin büyüklüğüne, ambalajın niteliğine, dondurulan birimler arasındaki boşluğa ve bunun gibi değişik faktörlere bağlı olarak birkaç saatten bir haftaya kadar değişebilir. Bu metod esas olarak balık dondurma amacıyla uygulanmış olup halen de aynı amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır.

**1.2. Hava Akımında Dondurma:** Bu tip dondurucuların genel ilkesi soğuk havanın, dondurulan gıda maddesi ile evaporatör arasında hızla dolaşmasıdır. Güçlü fanlar yardımıyla hareket ettirilen hava, soğutma spiralleri (evaporatör) üzerinden geçerken soğur ve sonra dondurulan ürün üzerinden 5-10 m/s hızla geçer. Hava akımında dondurma yönteminde çok değişik tipte donduruculardan yararlanılır. Bunlardan en yaygınlarından biri, tünel donduruculardır. En basit tip tünel dondurucularda dondurulacak ürün ya bir bantla taşınır veya üst üste yerleştirilmiş kerevetlerden oluşan araba dizilerinin tünel içindeki hareketiyle taşınır. Buna göre tünel dondurucular genellikle ya bantlı veya kerevet-vagonlu olabilmektedir. Bant veya vagonların tüneldeki hareketi (hızı), donma süresine göre ayarlanır.



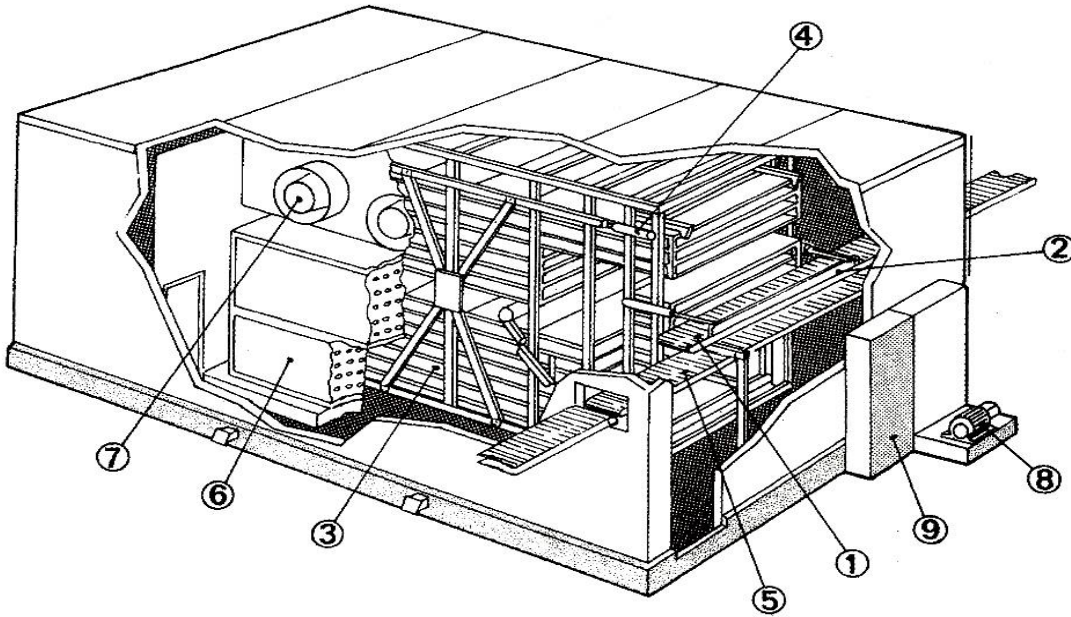
Şekilde de gösterilen tipteki tünel dondurucularda, dondurulacak ürün tünele, raylar üzerinde kaydırılan arabalarla sokulur. Her bir araba, üzerinde dondurulacak ürün bulunan ızgara şeklindeki tablaların (kerevet) üst üste, fakat havanın serbestçe hareketine olanak tanıyacak kadar aralıklarla yerleştirilmesiyle oluşmaktadır. Arabalar tünele hidrolik bir güçle itilerek sokulmaktadır. Bir araba dondurulmak üzere, tünel girişinden tünel içine hidrolik bir sistemle itilince, o da önceki diğer arabaları iterek raylar üzerinde ileri doğru kaydırır. Böyle bir çalışma ilkesi nedeniyle bu tip dondurma sistemlerine "ileri doğru itişli tünel" veya "taşıyıcı tünel dondurucular" ismi verilmektedir.



Yatay hava akışlı kesik çalışan kerevetli bir tünel dondurucu

İleri doğru itişli tünel dondurucularda, bir araba tünele itilince, daha önce tünele sokulmuş arabalardan ilki, taşıdığı ürün donmuş olarak tünel sonuna ulaşmaktadır. Tünelden çıkan bu arabadaki donmuş ürün boşaltılır ve yeniden yüklenmek üzere, başka bir yoldan tünelin başına döner.

Diğer taraftan ileri düzeyde mekanize edilmiş “taşıyıcılı tünel dondurucular” da vardır. Şekilde çalışma ilkesi gösterilen bu tip dondurucular gerçekte biri altta diğeri onun üstünde 2 tünelden oluşmaktadır. Dondurulacak ürün tüneli taşıyıcılar içinde aşmaktadır. Taşıyıcı ünite önce üst tünelde hareket etmekte daha sonra bir elevatör sistemiyle alt tünele inmekte son olarak da geriye doğru hareket ederek yine tünelin giriş tarafındaki boşaltma ucuna ulaşmaktadır. Donmuş ürün bir itme sistemiyle raflardan, donmuş ürün uzaklaştırma bandına itilirler. Boşaltma taşıma rafı, bu defa yükleme bandı hizasına yükselince yeni ürün itilerek buraya yerleştirilmektedir.



Mekanize tünel dondurucu

1. Ürün yükleme konveyörü 2. İtme düzeneği 3. Ürün taşıyıcı 4. Ana itici
5. Donmuş ürün çıkış konveyörü 6. Evaporatör 7. Aksial fan 8. Hidrolik güç ünitesi
9. Kontrol paneli

Dondurulan ürün ile soğuk havanın tünel içindeki hareketleri “paralel” veya “zıt” olabilir. Zıt akımlı tünellerde dondurulacak ürün, tünelin bir tarafından, soğuk hava ise diğer ucundan verilir. Buna göre sıcaklığı en düşük olan 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 tüm donma süresince herhangi bir noktada

ürünün sıcaklığının yükselmesi söz konusu değildir. Ancak bu tip uygulamalarda soğuk hava, tünelin karşı ucuna yani, ürün giriş ucuna ulaşana kadar ısınır ve sıcaklığı yükselir. Kısmen ısınmış bu hava tekrar evaporatöre dönecek ve yeniden soğutulacaktır.

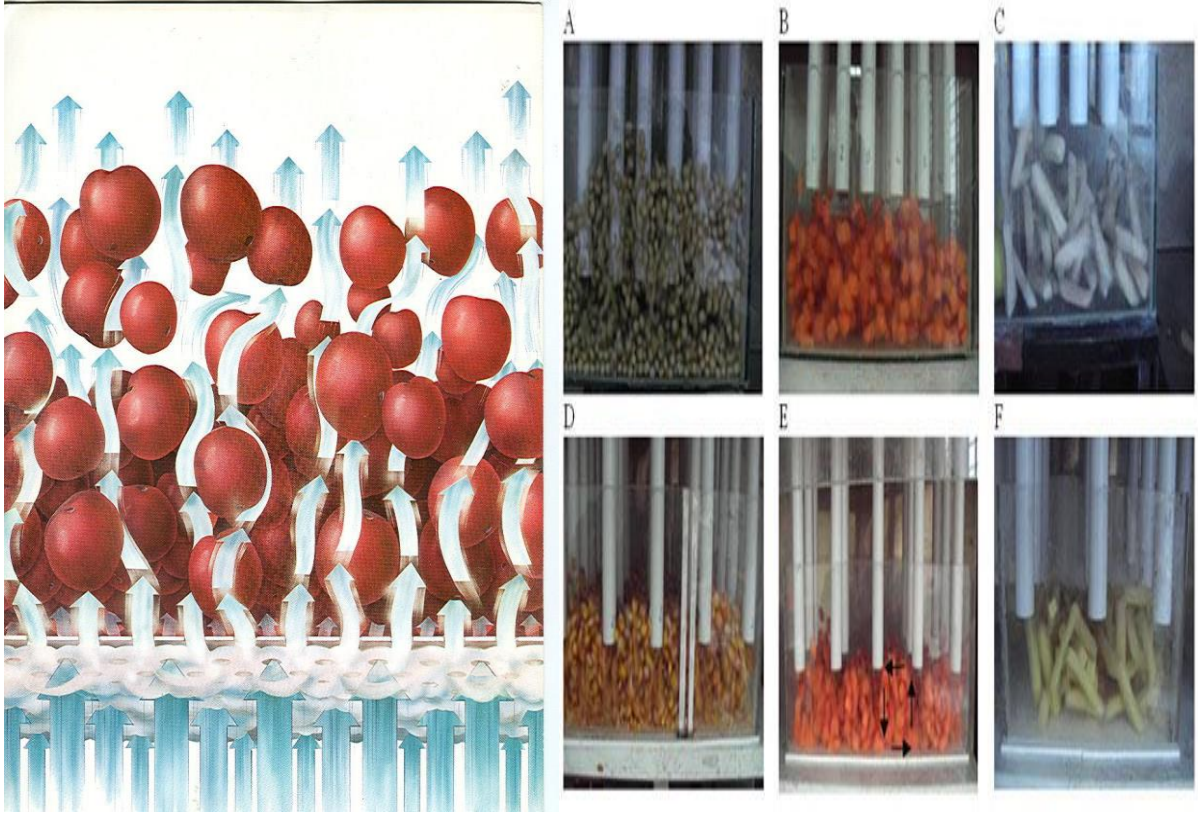
Bazı tünellerde ise soğuk hava, bant boyunca hem alttan hem de üstten verilir. Bu uygulamada havanın tüneldeki dağılımı kusursuzdur. Ancak genellikle soğuk hava, bandın altından yukarı doğru üflenir. Bu üfleme ile bant üzerindeki madde, hava hızı ve parçacık iriliğine bağlı olarak hafif bir titreşim kazandığından donma hızı yükselir. Fakat bu sınırlı vibrasyon, dondurulan parçacıkların birbirine yapışmaksızın ve böylece bir kitle haline dönüşmeden donmalarını sağlamaz. Halbuki günümüzde, birçok ürünün bir blok haline gelmeden tek tek parçalar halinde dondurulması istenmektedir. Bu nedenle, bantlı dondurucularda, 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.

Akışkan yatak dondurucularda 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 dondurucular gerçekte bant donduruculardır. Bununla birlikte çok değişik akışkan yatak dondurucular mevcuttur. Şekilde bir akışkan yatak dondurucu gösterilmiştir.



Akışkan yatak dondurucu





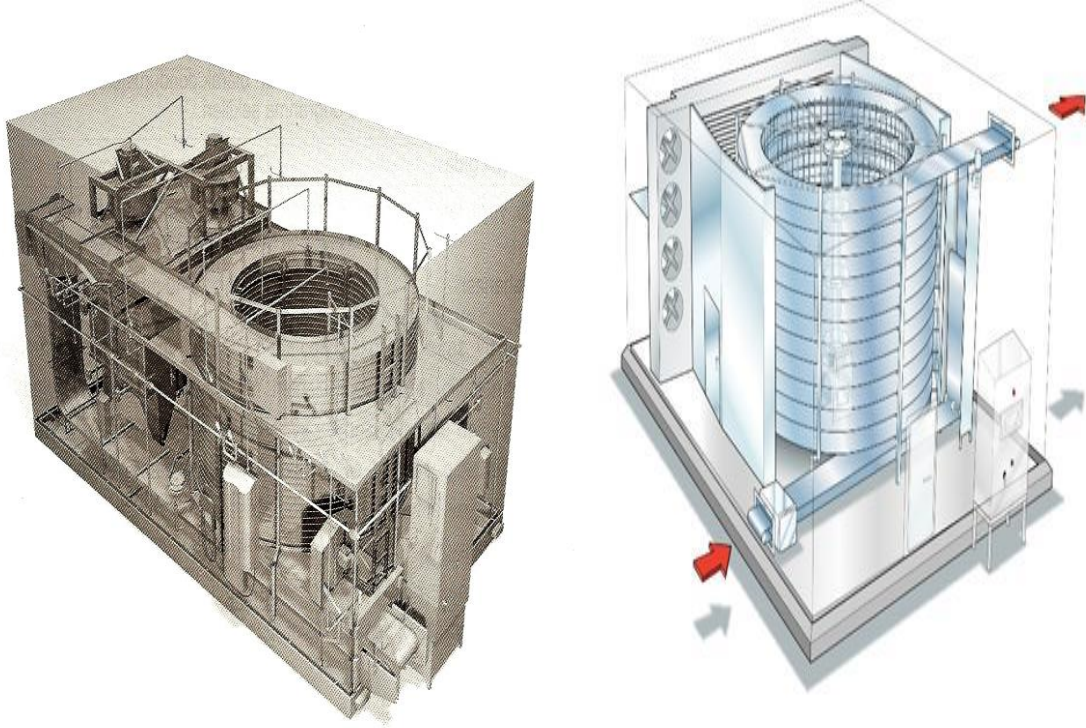
#### Akışkan yatak dondurucuda ürünün akışkanlık kazanması

Akışkan yatak dondurucularda, diğer hava dolaşimli dondurma sistemlerinin hiçbirinde ulaşılamayan hızlı bir dondurma gerçekleşebilmektedir. Bu yöntemde sadece hızlı bir donma sağlanmakla kalmayıp, ayrıca her parça ayrı ayrı donduğundan; ürünün bir blok haline dönüşmesi önlenmiş olur. Bu şekilde her tane veya parçacığın ayrı ayrı donmasına **bireysel hızlı dondurma (Individual 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 parçacığın akışkanlık kazanabilmesi, parçacık iriliği ile hava hızına bağlıdır.

Akışkan yatak dondurma yöntemi daha çok çilekçillere, kiraz, vişne ve tanelenmiş çekirdeksiz üzüm gibi bütün haldeki meyvelerle, dilimlenmiş şeftali, armut, elma, yarıya bölünmüş kayısılarla ve kuşbaşı şeklinde doğranmış etlere başarı ile uygulanmaktadır. Çizelge 8.4’de akışkan yatak dondurucularda, IQF olarak dondurulacak bazı ürünlerin parçacık boyutları ve doğranma şekilleri verilmiştir.

Yukarıda tanımlanan donduruculara ek olarak aşağıdaki Şekilde görüldüğü gibi bir de spiral bantlı dondurucular vardır. Bunlarda, dışa karşı yalıtılmış bir kabin içinde yer alan ve toplam uzunluğu 100-300 m arasında değişen bir bant, dondurulacak ürünü spiral bir yol izleyerek aşağıdan yukarı doğru taşıırken, soğuk hava banda dik olarak üstten verilmektedir. Bandın spiral şeklinde oluşu, az yer işgal eden, daha küçük bir sistemde, büyük miktarda hammaddenin dondurulmasına olanak vermektedir. Spiral bantlı dondurucular özellikle, plakalı dondurucularda dondurulma olanağı bulunmayan, ambalajlanmış haldeki şekilsiz ürünlerin dondurulmasında kullanılmaktadır. Aşağıdaki şekilde spiral bantlı dondurucunun içten görünüşü verilmiştir.

Yukarıda değinildiği gibi bu dondurucularda hava ile ürün, zıt akım ilkesine göre karşılaşmakta ve hava banda dikey olarak verilmektedir. Böylece, hava akımında kontrollü türbülans sağlanarak, ürün ile hava arasındaki ısı transferi çok iyileşmektedir. Bu dondurucularda dondurulan ambalajlanmamış ürünlerde su kaybına bağlı ağırlık azalması, % 0.6'ya kadar düşürülebilmektedir.



Spiral bantlı dondurucu, dıştan görünüş

Görüldüğü gibi hava akımında dondurmada birçok modifikasyon söz konusudur. Çünkü yöntem, dizaynına elverişlidir. Bunlardan birisi de dikine hareket eden tepsilerden oluşan bir sistemdir. Bu sistemde fasulye, bezelye, çilek gibi ürünler tepsi şeklinde gözle konur. Tepsiler bir taşıyıcı sistemle yukarı doğru hareket ederken hava akımıyla karşılaşır. Her tepsinin sistemdeki bir devri ile, ürünün donması sona erer.

Birçok olumlu yönleri olması sebebiyle dondurma teknolojisinde en yaygın olarak kullanılan dondurma metodu, soğuk hava ile dondurma yöntemidir. Ancak soğuk hava dondurma metodunun bazı olumsuz tarafları da vardır. Bu olumsuzlukların en önemlisi ambalajlı ürünlerde oluşan nem kaybıdır. Ne kadar soğuk olursa olsun havanın, mutlaka bir kurutma potansiyeli vardır. Çünkü bir ürünün kuruması kendinin çevreleyen havanın nem içeriğine bağlıdır. Su, soğuk havaya su buharı olarak geçer ve havanın su buharı içeriğini yükseltir. Ürünün daha sıcak olduğu donma başlangıcında su kaybı çok daha fazladır. Çünkü ıslak bir maddenin su buharı basıncı, sıcaklığına bağlıdır. Buna göre donma başlangıcındaki ürünün su buharı basıncı ile, soğuk havanın su buharı basıncı arasında daha büyük bir fark bulunmaktadır. Özellikle donma başlangıcında suyun buharlaşarak kaybolmasına neden olan faktör de budur.

- İlke; güçlü fanlar yardımıyla havanın dondurulan gıda maddesi ile evaporatör arasında hızlı hareket etmesidir (5-10 m/s)
- Havası sıcaklığı -30 ile -45 °C arasındadır
- Bu amaçla kullanılan başlıca dondurma sistemleri;
  - Tünel tipi dondurucular (Bantlı / kerevet-vagonlu; hava akımı zıt / paralel)



Akışkan yatak dondurucular (**IQF**; bireysel hızlı dondurma – **Individually Quick Freezing**) – küçük taneli ve parçalı / dilimlenmiş ürünlerde

Spiral bantlı dondurucular – (zıt akım) ambalajlanmış şekilsiz ürünler

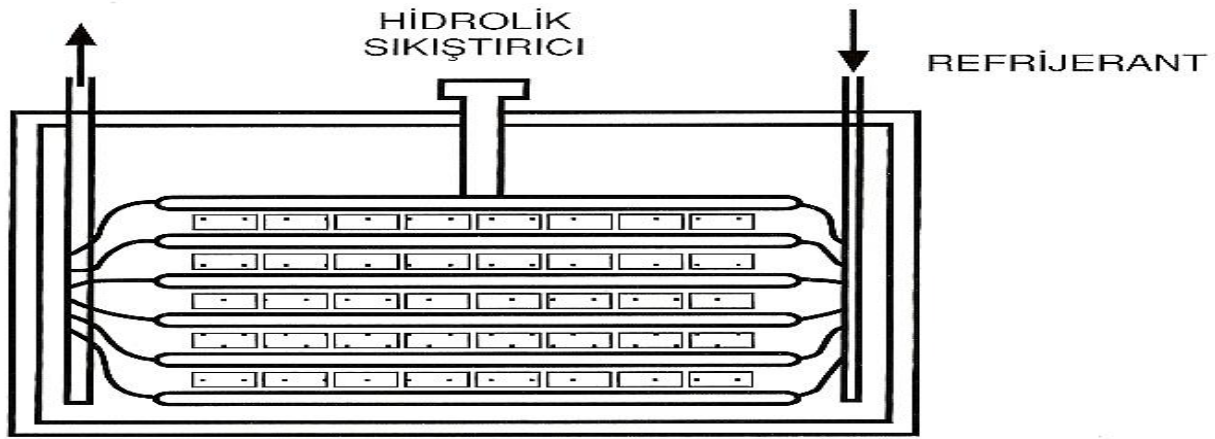
Günümüzde dondurulmuş gıda tesislerinde IQF (Individual Quick Frozen–Bireysel Şok Dondurma) tekniği kullanılarak işlenen meyve ve sebzelerin birebir şoklanarak dondurulması sağlanır. Bu yöntemle gıda maddeleri konveyör banta dökülerek makinenin şoklama dediğimiz dondurucu kısmına girer. Çok kısa sürede -40 °C soğukta tek tek ve aniden dondurulur. Böylece ürün hücre öz suyunu salmaz, besin değerlerini kaybetmez ve fiziksel yapısında ve doğal lezzetinde herhangi bir bozulma olmaksızın katkı maddesiz uzun ömürlü olur.

## **2. İndirekt Kontakt (Dolaylı Temas-Değdirme) Yöntemiyle Dondurma**

Bu metodun ilkesi, içten soğutulan iki plaka arasına yerleştirilmiş ambalajlı ürünlerin, plaka ile teması sonucu dondurulmasıdır. Dondurulan ürün ile soğumayı gerçekleştiren refrijerant arasında plaka bulunduğundan bu yönteme “dolaylı temas metoduyla dondurma” denir. Gıdalarının direkt kontakt metodu ile dondurulmasında tek koşul, dondurulacak ürünün dikdörtgen prizması şeklinde yani kibrit kutusu gibi bir ambalajda bulunmasıdır. Ambalajlı fakat şekilsiz bir kitlenin bu sistemde dondurulma olanağı yoktur. Çünkü ambalajın düzgün bir yüzeyle, yani plakayla her iki taraftan tam olarak temas edebilmesi, donma süresi açısından çok önemlidir. Buna göre; düzgün şekilli ve aynı kalınlıktaki ambalajlar plaka üzerine yan yana yerleştirilip, diğer plakanın da üstten oturtulmasıyla, iki yönden hızlı bir dondurma sağlanabilmektedir.

Bu açıklamalara göre indirekt kontakt metodu ile dondurmada en yaygın sistemin plakalı dondurucular olduğu görülmektedir. Bu yüzden bu metoda aynı zamanda, “plakalı dondurma” metodu da denmektedir. Plakalar dört köşe, içi boş alüminyum raflardan ibaret olup, içinde soğutma spiralleri yani refrijerantın evapore olduğu üniteler (evaporatörler) bulunur. Böyle bir düzenlemede ısı iletimi, önce plaka ve sonra spiral materyali üzerinden iki engeli aşarak gerçekleşir. Bu yüzden daha gelişmiş bazı sistemlerde plaka içinde spiral bulunmaz, ancak plakanın içi spiral şeklinde yapılmıştır. Soğutucu akışkan bunun içinde dolaşır ve böylece ayrıca yer alan spiral materyalinin ısı transferini engellemesi ortadan kaldırılmış olur.

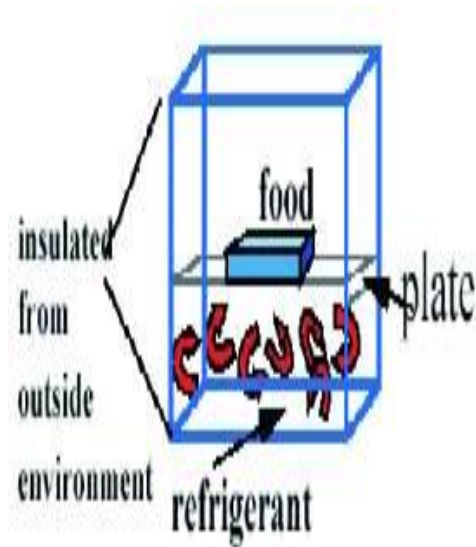
Plakalar aşağıdaki şekilde açıklandığı şekilde yüklendikten sonra kabin kapatılır ve soğutucu istenen derecede çalıştırılır. Ürün, sıcaklığı -18 °C'ye erişene kadar burada bırakılır. Donma süresi başta, ambalajla plakanın temas derecesine bağlı olmak üzere; ambalaj materyalinin cins ve kalınlığına, dondurulan ürünün çeşidine, başlangıç sıcaklığına ve bizzat tüm ambalajlı gıdanın kalınlığına göre değişir. Genel olarak 5 cm kalınlıktaki ambalajlı kitleler 90-120 dakikada donmaktadır. Görüldüğü gibi kabin şeklindeki plakalı dondurucular, kesik çalışmakta ve genellikle her 2 saatte bir, belli bir parti dondurulmakta ve sonra boşaltılmaktadır.



Kesik çalışan, yatay plakalı dondurucunun çalışma ilkesi

Gıdaların indirekt temas metoduyla dondurulmasında tek koşul, dondurulacak ürün dikdörtgen prizması şeklinde yani kibrit kutusu gibi bir ambalajda bulunmasıdır. Ambalajlı ve fakat şekilsiz bir kitlenin bu sistemde dondurulma çok zordur. Çünkü ambalajın düzgün bir yüzeyle, plakaya tam olarak değmesi, donma süresi açısından çok önemlidir.

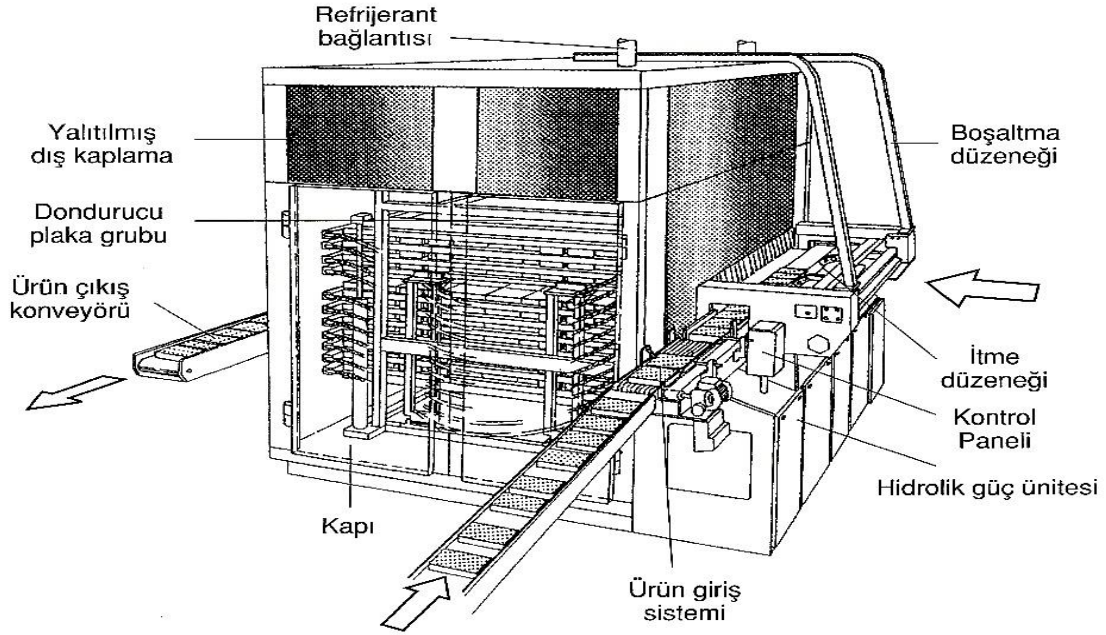
Buna göre düzgün şekilli ve aynı kalınlıktaki ambalajlar plaka üzerine yan yana yerleştirilip, diğer plakada üstten oturunca, iki yönden hızlı bir dondurma sağlanabilmektedir. Ambalajlanmış ıspanak, taze fasulye, bezelye gibi sebzeler genellikle bu yöntemle şoklanarak saklanır.



Plakalı dondurucu

Yatay plakalı donduruculardan, otomatik ve sürekli çalışanları da vardır. Bunlarda yükleme boşaltma otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Bu dondurucularda tüm plakalar bir elevatör sistemiyle aşağı ve yukarı hareket edebilmektedir. Bir plaka çifti yükselme seviyesine gelince, plakalar aralanmakta, dondurulmak üzere hazırlanmış bulunan ve taşıma konveyörü üzerinde toplanmış olan bir grup paketlenmiş ürün, bu iki plaka arasına itilerek yerleştirilmektedir. İtme esnasında bir önceki dondurma devresinde bu plakalar arasında dondurulmuş paketler, plaka çiftinin diğer tarafından çıkarılarak donmuş ürün taşıma

konveyörü ile uzaklaştırılmaktadır. Tanımlandığı gibi dondurulmuş ürünler bu şekilde alınıp aynı anda buraya yeni ürün yerleştirilerek sistem yüklendikten sonra, plakalar sıkıştırılarak arası kapanmaktadır. Aşağıdaki şekilde bu tarzda çalışan bir otomatik plakalı dondurucu gösterilmiştir.



Sürekli çalışan plakalı dondurucu

Dolaylı temas metodu sadece düzgün yüzeyli, ambalajlanmış ürünlere uygun olmakla birlikte, sıvı ve püre halindeki gıdaların süratle dondurulmasında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan soğutulmuş yüzey, silindir şeklinde olup, dıştan yalıtılmıştır. Soğutucuya verilen sıvı veya yarı sıvı haldeki ürün, silindirin iç yüzeyi ile mil arasındaki boşlukta çok ince bir film oluşturur. Bu sırada donma gerçekleşirken, kazıyıcılar yardımıyla silindirin yüzeyi kazıyarak temizlenir. Donma sadece birkaç saniye sürer. Endüstride dondurma üretimi bu yöntemle gerçekleştirilmektedir.

### 3. Daldırarak Dondurma

Bu yöntemle dondurulacak ürün, ambalajlanmış veya ambalajlanmamış olarak, düşük derecelere kadar soğutulmuş uygun bir sıvıya 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 yoluyla dondurma olarak da kabul edilmektedir.

Ambalajsız gıdaların daldırılarak dondurulmalarında, gıda maddesi ile soğutucu sıvı arasında kusursuz bir ısı iletimi sağlanmakta ve böylece hızlı bir donam gerçekleşmektedir. Ayrıca bu yöntemin diğer bazı olumlu özellikleri de mevcuttur. Her şeyden önce belirgin bir şekli olmayan birçok ürünün bu yolla başarı ile dondurulmaları mümkündür. Aynı zamanda parçacık halindeki ürünler bu yöntemle bireysel olarak dondurulabilmektedir. Örneğin, soğuk şeker şurubuna daldırılarak dondurulan meyveler ince bir şurup filmiyle kaplanarak tek tek donduklarından bunlar depolamada, renk ve aromalarını daha iyi korumakta ve oksidatif değişimlere uğramamaktadırlar. Ayrıca soğuk hava akımında dondurmada olduğu gibi, hava ile sürekli bir şekilde temas söz konusu olmadığından özellikle oksidasyona duyarlı ürünlerde daha iyi sonuç alınmaktadır.

Daldırılarak dondurmada kullanılacak soğutucu sıvı sayısı sınırlıdır. Bunun nedeni ise, kullanılacak frizantlarda aranan bazı özelliklerden kaynaklanmaktadır. Her şeyden önce bu amaçla kullanılacak sıvının düşük derecelerde dahi donması gerekmektedir. Gıda ile doğrudan temas eden yani; ambalajlanmamış ürünlerde kullanılan frizantların ise ayrıca; toksik etkili olmaması, yabancı renk, koku ve tat içermemesi, gıdanın rengini değiştirici etkide bulunmaması ve uygulama sırasında bileşiminin değişmemesi gerekmektedir. Ancak dondurma işlemi boyunca, frizantın kirlenme ve buharlaşmasının önlenmesi ve konsantrasyonunun sabit tutulması olanaksızdır. Diğer taraftan ambalajsız gıdaların daldırılarak dondurulmalarında kullanılan frizantlarda aranan en önemli özellik, frizantın duyuşal özellikleri ile, dondurulan gıdanın duyuşal özelliklerinin uyuşmasıdır. Örneğin, meyveler şeker şurubu ile, balıklar ise salamura ile dondurulabilir.

Daldırılarak dondurmada kullanılan frizantların yani, donma noktası düşük sıvılardan en yaygınları, salamura (tuz çözeltisi), şeker şurubu ve gliserol çözeltileridir. Düşük bir donma derecesine ulaşabilmek için bu çözeltilerin bir konsantrasyonda olmaları gerekmektedir. Örneğin, salamura ile sıcaklık en çok -21 °C'ye düşürülebilmektedir. Meyvelerin dondurulmasında kullanılan gliserolün sudaki % 67'lik çözeltisi ile -47 °C'ye, propilenin sudaki % 60'lık çözeltisiyle, -51 °C'ye kadar sıcaklık düşürülebilmektedir. Bazı sulu frizantların donma noktaları çizelge 8.5'de gösterilmiştir.

Öte yandan bu yöntem halen çok kısıtlı bir uygulama alanına sahiptir ve günümüzde özellikle balıkların dondurulması ile sınırlıdır. Buna göre, bir soğutma sisteminde düşük derecelere kadar soğutulmuş salamuraya daldırılan balıklar hızla soğutulabilmektedir.

Bazı sulu frizantların 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
Ca Cl <sub>2</sub>	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

#### 4. Kriyojenik Sıvılarla Dondurma

Kriyojenik dondurmada, herhangi bir soğutma sistemine gerek bulunmamakta, soğuma ve donma doğrudan bir kriyojenden yararlanılarak sağlanmaktadır. Kendi 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. Bazı kriyojenlerin özellikleri çizelge 8.6'da gösterilmiştir. Bu tablodan da anlaşıldığı gibi birçok kriyojenik madde

bulunmaktadır. Ancak günümüzde gıdaların dondurulmasında sadece sıvı azot (LN<sub>2</sub>) ve sıvı karbondioksit (LCO<sub>2</sub>) kullanılmaktadır. Gıdaların dondurulması doğrudan LN<sub>2</sub> veya LCO<sub>2</sub> veya bunların buharı ile karşılaştırılarak, donma -60 °'ye veya bu derecenin altında soğuk bir atmosferde gerçekleştirilmektedir.

Kriyojenik materyallerin bazı özellikleri

Kriyojen	1 Atm basınçta kaynama noktası (°C)	Buharlaştırma gizli ısı (kcal kg <sup>-1</sup> )
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

\* 5 atm basınçta

\*\* Sublimasyon sıcaklığı

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

Kaynama noktası çok düşük olan sıvılaştırılmış gazlara kriyojenik sıvılar denir. Gıdaların dondurulmasında en fazla kullanılan kriyojenik sıvıların başında "sıvı azot" ve "sıvı karbondioksit" gazı gelmektedir. Sıvı azot'un kaynama sıcaklığı -196°C ve sıvı karbondioksit'in ise, -145°C'dir. Çilek ve bazı üzüm sü meyvelerde dilimlenmiş domates ve mantar gibi bazı hassas gıdalardan ancak çok hızlı bir dondurma ile, kusursuz bir ürün elde edilebilmektedir. Kriyojenik dondurma yöntemi de esas olarak bu tip ürünler için geliştirilmiş olup, uygulaması da halen bu ürünlerle sınırlıdır. Bununla birlikte kriyojenik dondurmada kullanılan cihazların basit ve ucuz olmaları, az yer kaplamaları gibi diğer bazı üstünlükleri de vardır. Ancak kriyojenik sıvıların pahalı olması metodun en olumsuz yönüdür.

Kriyojenik sıvılardan en yaygın olarak kullanılan sıvı azot gazı; havanın sıkıştırılıp önce likit hale getirilmesi ve sonra oksijenin kaynama derecesinin -183°C, azotun kaynama derecesinin -196°C olması durumundan yararlanılarak, sıvı havanın özel bir valften geçirilmek suretiyle adeta damıtılarak, azot gazının oksijenden ayrılması yoluyla üretilmektedir. Üretilen azot gazı tekrar sıkıştırılarak sıvı azot gazı elde edilmektedir. Sıvı azot gazı atmosferik basınçta -196 °C de kaynadığından, eğer elde edilmiş sıvı gaz iyi izole edilmiş tanklarda depolanırsa, bu sıcaklıkta atmosferik basınçta sıvı olarak kalır ise sadece çok az bir kısmı -196 °C'deki azot gazına dönüşür. Şu halde sıvı azot gazının tanımlanan bu koşullara uygun olarak depolanıp taşınmasında bir sorun yaratmaz ve tank veya tüpten fazla basınç oluşmaz. Bu özellik, azot gazının kriyojenik dondurmada kolaylıkla uygulanmasına olanak vermektedir. Sıvı azot gazı eğer -196 °C'nin üzerinde, örneğin oda sıcaklığında saklanmak istenirse bu defa çok yüksek basınç altında bulundurulması gerekir.

Diğer taraftan kriyojenik dondurmada karbondioksit, sıvı halde veya katı halde (kuru buz) olmak üzere iki formda da uygulanmaktadır. Sıvı CO<sub>2</sub> gazının yüksek basınç altında sıkıştırılmasıyla elde edilir. Kaynatma derecesi -145°C'dir. Bir memeden püskürtülürken, -79°C'de sublime olma niteliğinde katı faza dönüşür ki buna "kuru buz" denir. Yaklaşık 2 kg

sıvı CO<sub>2</sub> den 1 kg kuru buz elde edilir. Buna göre dondurulacak ürün ya sıvı karbondioksit daldırılır ve karbondioksit, ürün üzerine püskürtülür. Kuru buz ise dondurulacak gıda ile karıştırılır.

Kriyojenik dondurmanın birçok olumlu yönü vardır. Her şeyden önce bu yöntemle birlikte çok yüksek bir donma hızına ve buna bağlı olarak yüksek kaliteye ulaşılabilir. Kriyojenik dondurma sistemlerinin sabit yatırımı düşük, 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 da vardır. Bu nedenle kriyojenik dondurma, bu masrafları karşılayabilecek ürünlere uygulanmaktadır.

Kriyojenik dondurma, ilke olarak küçük ve orta boyutlu ürünlere uygulanır. Çünkü, iri boyutlu materyallerin bizzat kendi içindeki ısı transferi, kriyojenik dondurmada beklenen donma hızının çok yavaşlamasına neden olmaktadır. Kriyojenik dondurmanın önemli bir özelliğini yansıması bakımından, kanatlı hayvan etleriyle, kırmızı etlerin LN<sub>2</sub> ile dondurulmasında bu ürünlerde oluşan değişiklikler gözlemlenmektedir. Buna göre, bu ürünlerin aşırı hızla dondurulması sonucunda yüzeyde kar gibi beyaz bir renk oluşmaktadır. Bu durum, rengin herhangi bir şekilde ağarmasından değil, donma hızının çok yüksek olmasına bağlı olarak yüzey katmanında oluşan çok küçük buz kristallerinin, ışığın reflektansında yaptığı değişiklikten kaynaklanmaktadır.

Yukarıda da değinildiği gibi kriyojenik dondurmada günümüzde sadece sıvı (L) N<sub>2</sub> ve sıvı (L) CO<sub>2</sub> kullanılmaktadır. Bu kriyojenler, basınç altında sıvılaştırılmış halde satın alınmakta ve işletmedeki tanklara nakledilerek özel koşullarda depolanmaktadır. Dondurucuda kullanılan kriyojenler, işlevini tamamladıktan sonra 0 °C ile -50 °C arasında sistemi terk ederek atmosfere karışmaktadır. Geri kazanılıp tekrar kullanılmaları yaygın bir uygulama değildir.

**4.1. Sıvı azot (LN<sub>2</sub>) ve dondurmada uygulanışı:** Sıvı hidrojen, havanın sıkıştırılıp basınç altında sıvılaştırıldıktan sonra, özel bir valften yararlanılarak adeta damıtma benzeri bir işlemle azot gazının oksijenden ayrılması yoluyla üretilmektedir. Bu ayırmada, oksijenin kaynama derecesinin (-183°C), azotun kaynama derecesinden daha düşük olmasından yararlanılmaktadır. Sıvılaştırılmış havadan, daha önce ayrılan azot gazı yeniden sıkıştırılarak sıvılaştırılmaktadır.

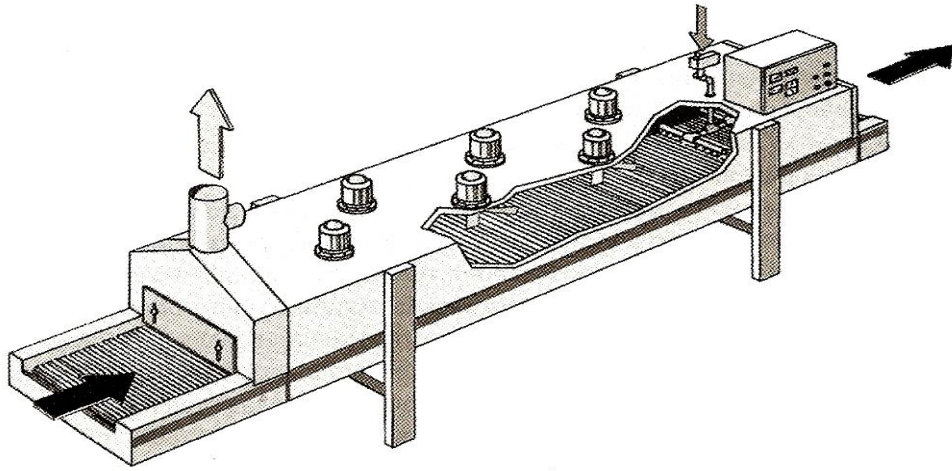
Dondurulan gıdaya kriyojenik sıvının uygulanma yöntemi, kriyojen türüne göre farklılık gösterse de; daldırma, püskürtme (sprey) ve soğuk gazla karşılaştırma olmak üzere başlıca üç şekilde uygulanmaktadır. Dondurmada LN<sub>2</sub> uygulamasında yüksek bir yüzey ısı transfer katsayısına ulaşabilmenin koşulu; bu kriyojenin gıda ile sıvı fazdayken temas etmesinin sağlanmasıdır. Böylece ısı transferi, ‘‘katıdan doğrudan sıvıya’’ şeklinde gerçekleşir. Sıcak materyal LN<sub>2</sub>’ye daldırılınca, materyal çevresinde öyle hızlı bir kaynama gerçekleşir ki, çevresi hemen gazla sarsılır ve ısı transfer katsayısı düşer. LN<sub>2</sub>’nin damlacıklar halinde uygulanmasıyla, ısı transfer katsayısı diğer dondurma yöntemleriyle ulaşamayacak bir düzeye çıkmaktadır.

LN<sub>2</sub>’nin daldırılarak uygulanmasında, dondurulacak gıda doğrudan LN<sub>2</sub>’ye daldırılır. Gıda hangi sıcaklıkta olursa olsun, LN<sub>2</sub> çok düşük derecede olduğundan aralarında büyük bir sıcaklık farkı vardır. Bu fark ısı transferinin itici gücü olduğu için, donma hızlı gerçekleşir. Aynı nedenle dondurulan materyalin dış katmanları ile iç kısımları arasında büyük bir sıcaklık farkı oluşur. Dondurulan materyalin çatlayıp yarılması ve hatta parçalanmasının temel nedeni budur. Kriyojenik dondurmada karşılaşılan bu tip olumsuzlukların sınırlandırılması,



dondurma işleminin kontrol altında tutulmasıyla sağlanabilmektedir. Daldırma yönteminin en önemli olumsuzluklarından birisi ise yukarıda da değinildiği gibi LN<sub>2</sub>'nin çok hızlı kaynaması ve dondurulacak gıdanın bir anda azot gazı ile sarılarak yüzey ısı transfer katsayısının düşmesidir.

Daldırma uygulamasının olumsuzlukları nedeniyle LN<sub>2</sub>, yaygın olarak bir bantta taşınan dondurulacak materyal üzerine sprej halinde uygulanmaktadır. Küçük LN<sub>2</sub> damlacıkları materyal üzerinde buharlaşırken, onu hızla soğutup dondurur. Küçük damlacıkların buharlaşmasında yüzey ısı transfer katsayısı çok yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Çünkü sprej olarak uygulanmış LN<sub>2</sub> damlacıkları, bir önceki damlacıklardan oluşmuş gaz kabarcıklarını süpürüp uzaklaştırmakta ve sıvı-katı teması çok iyi bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Materyal üzerinde buharlaşan LN<sub>2</sub>, soğuk azot gazına dönüşür ve bu gaz fanlar yardımıyla dondurucuya yeni girmiş gıdaya doğru üflenerek gıdanın ön soğutulmasında kullanılır. Aşağıdaki şekilde bir kriyojenik dondurma tüneli görülmektedir.

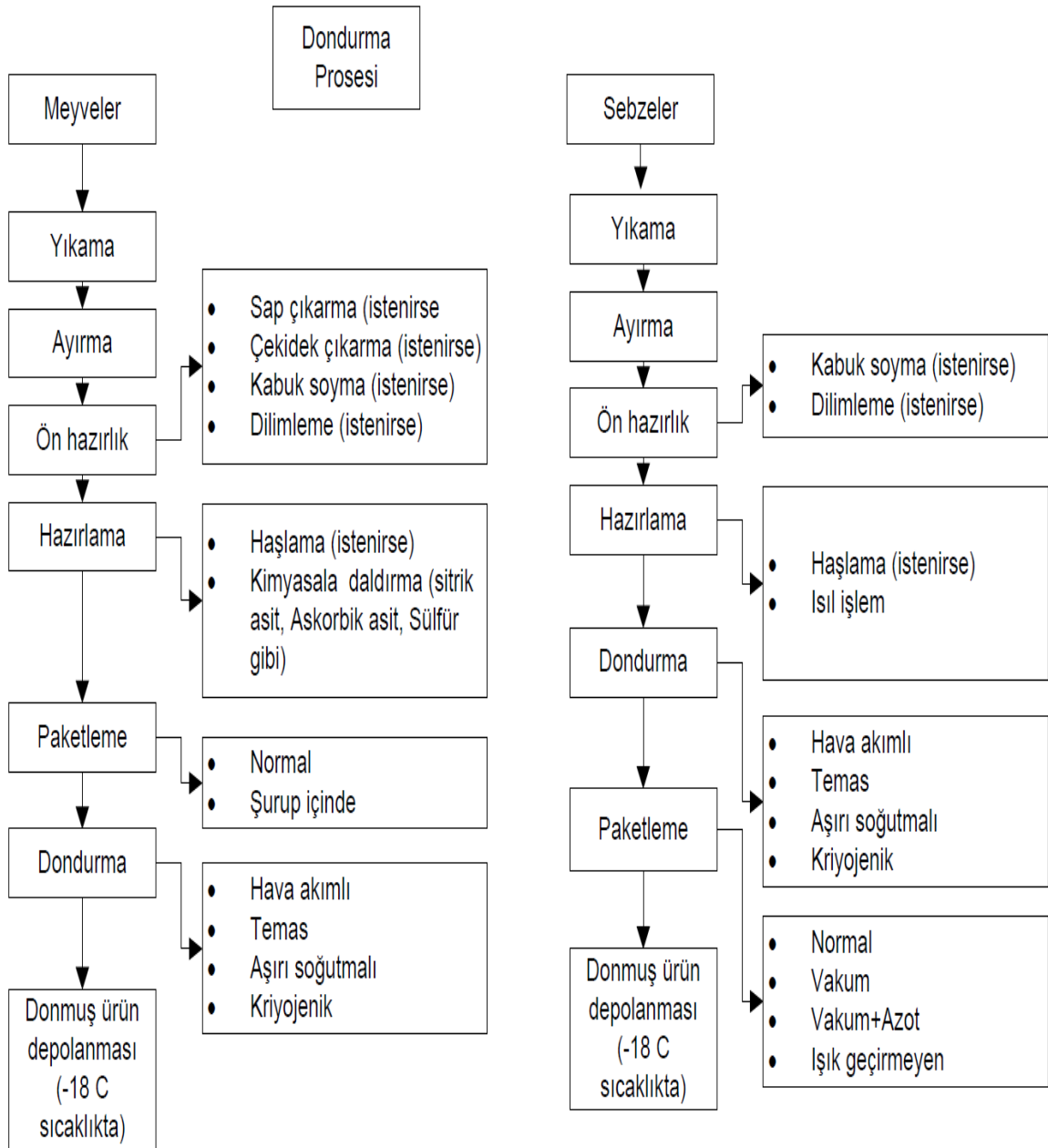
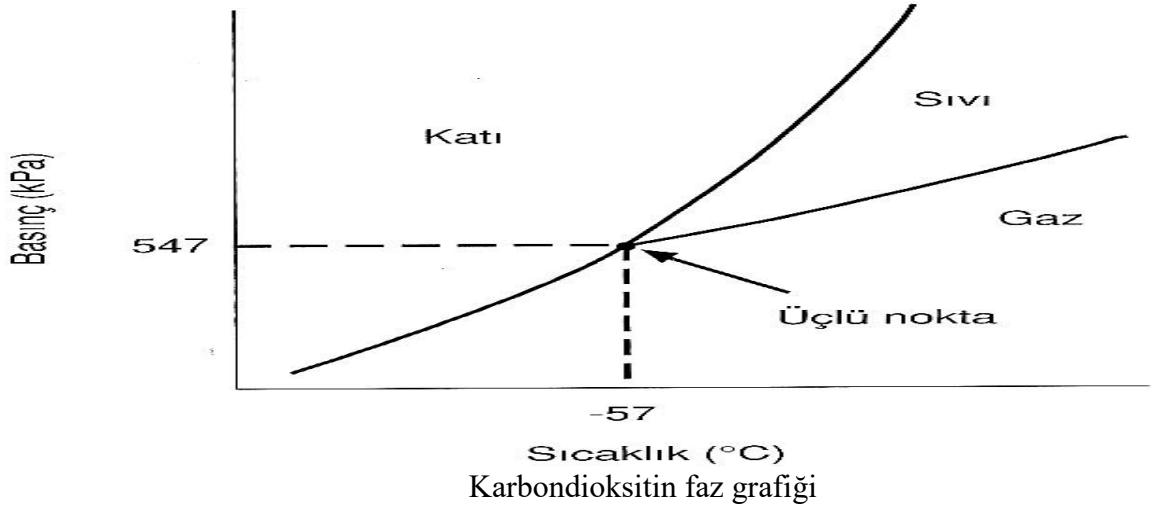


Kriyojenik dondurma tüneli

LN<sub>2</sub>'nin sprej olarak uygulanmasında bant tipi bir dondurucudan yararlanılır. LN<sub>2</sub>, dondurulacak gıdaya bandın çıkış ucuna yakın bir yerden sprej olarak uygulanır. Damlacıkların, gıdanın ısınısını absorbe ederek buhar fazına dönüşmesi ile oluşan soğuk azot gazı, tüneldeki fanlar yardımıyla tünelin besleme ucuna doğru üflenir ve tüneli -18 °C ile -20 °C civarında terk eder. Sıvı azot ile dondurmada, normal bir işlemde materyalin su kaybı yaklaşık % 0.5 düzeyindedir. Kriyojenik soğutma kapasitesinden maksimum düzeyde yararlanılmaya yöneldikçe, bu kayıp artar ve en çok % 1.5-2.0'ye kadar çıkabilir.

**4.2. Sıvı Karbondioksit (LCO<sub>2</sub>) ve dondurmada kullanışı:** Karbondioksitin sıvı fazı sadece üçlü nokta (-56.6 °C, 547 kPa) ile kritik nokta (31.1 °C ve 7250 kPa) arasında bulunur. Atmosferik basınçta ya gaz ya da katı fazda bulunmaktadır. Şekil 8.14'de karbondioksitin faz grafiği verilmiştir.

Gıdaların dondurulmasında LCO<sub>2</sub> aynen LN<sub>2</sub> gibi uygulanmaktadır. Dondurulacak gıda üzerine sprej olarak uygulanan LCO<sub>2</sub>, gıdanın yüzeyinde ince bir toz görünümünde kuru buz katmanına dönüşür. Donma, bu kuru buz katmanının süblimasyonu ile gerçekleşir. Sıvı karbondioksit, LN<sub>2</sub>'ye göre, dondurma bandının giriş ucuna daha yakın olarak uygulanır. Böylece, oluşan kuru buzun, bant sonuna kadar süblimasyonunun gerçekleşmesi için yeterli zaman tanınmaktadır.



## DONDURULAN ÜRÜNLERDE MEYDANA GELEN DEĞİŞİMLER

## 1. Donma Aşamasında Meydana Gelen Değişimler

**Hacim Artışı:** Donma aşamasında gerçekleşen en belirgin değişme dondurulan ürün hacminde meydana gelen artışıdır. Saf su 0°C’de buz hâline dönüşürken hacmi yaklaşık % 8.3 oranında artmaktadır. Sebze ve meyveler donarken bu oranda bir hacim artışı görülmez. Çünkü donma sonucu suyun hacmi artarken ortamdaki katı maddelerin hacmi azalır. Bitkisel dokularda hücreler arası boşluklar da hacim artışı sınırlandırıcı diğer bir etkidir. Bu boşluklar hacim artışı dengelemektedir, özellikle yavaş dondurmada büyük buz kristalleri oluşmasından dolayı mekanik hasarlar meydana gelir.

**Hücre Öz Suyunun Kaybı:** Meyve-sebze ve et gibi bütün doku halindeki gıdaların dondurulmasında, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmekle birlikte, hücre içi suyunu kaybetmesi söz konusudur, özellikle bitkisel dokuların yavaş dondurulmasında karşılaşıldığı gibi, buz kristallerinin hücre dışında oluşması ve hücre içi suyunun hücre dışına taşınarak hücrenin su kaybetmesi sonucunda hücre büzüşmektedir. Hücre içindeki unsurlar bu hacim azalışına ayak uydurmak için konfigürasyon değişimine uğrarlar. Bunun sonucunda hücre duvarı bükülüp çarpılır ve hatta yırtılabilir. Aynı nedenle hücre membranı, hücre duvarından ayrılıp kopar.

**Tekstürde Meydana Gelen Değişimler:** Özellikle taze meyvelerin tekstür kaybında turgor yani hücre içi basıncı önem taşır. Taze meyveler ağızda çiğnenirken meyve dokusunu oluşturan hücrelerin iç basıncı dişlerin basıncına bir direnç gösterir ve bu durum gevreklik denen özelliği oluşturur. Donma sırasında hücre duvarının zedelenip turgorun kaybolması, tekstür kaybının temel nedenidir. Sebzeler de donma sonunda turgor kaybına uğramaktadırlar. Ancak sebzeler, daha sonra pişirilerek tüketilebildiğinden ve pişirme ile zaten aşm bir turgor kaybı gerçekleşeceğinden, donmada meydana gelen tekstürel hasar meyvelerde olduğu kadar önemli değildir. Meyve ve sebzelerin dondurulması sırasında karşılaşılan tekstür hasarı, donma hızının arttırılmasıyla kısmen de olsa kontrol edilebilmektedir.

**Nem Kaybı:** Ürünün su kaybetmesi ağırlık kaybına neden olur. Ürünün su kaybı, hammaddenin dondurucuya girdiği andaki sıcaklığı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle özellikle ambalajlanmadan dondurulacak ürünlerde, neme doymuş soğuk hava ile ön soğutma uygulanması ve dondurucuya soğutulmuş olarak alma bu sorunu önemli ölçüde çözmektedir. Su kaybını önlemenin diğer bir yolu da ambalajsız ürünün önce ıslatılıp sonra ön soğutma bölgesinde hafifçe dondurularak yüzeyde ince bir buz tabakası oluşturulmasıdır. Donma hızı ne kadar yüksekse, evaporasyonla su kaybı o kadar daha azdır. Aynı şekilde dondurulan materyalin kalınlığı ne kadar fazlaysa su kaybı yine o kadar azdır.

**Gıda Bileşenlerinde Meydana Gelen Değişimler:** Donma sonucunda proteinler denatüre olur ve biopolimerler agregat oluştururlar. Nişasta jeli retrogradasyona uğrar ve jel, daha sonra don çözülünce suyunu bırakır. Sineresis denen jelin su bırakması, proteinler ve pektik bileşikler gibi diğer polimerlerin jellerinde de görülen bir durumdur. Jel yapıdaki bu polimerlerin konsantrasyonları, donmayla birlikte yükselince, polimer molekülleri arasında çapraz bağların oluşum potansiyeli artar ve çözünürlük azalır. Böylece su tutma kapasitesi azaldığından, donun çözülmesiyle suyunu bırakır ve geride kaba bir materyal kalır.

**Kimyasal ve Biyokimyasal Değişimler:** Donma sırasında en önemli biyokimyasal değişimler enzimlerin katalize ettiği biyokimyasal reaksiyonlardır. Bu olayların temelinde de donma sonucunda hücre içi unsurlarının birbirlerine karışması, enzim sistemlerinin yer

değiştirmesi yani, doğal selüler organizasyonun bozulması yatar. Nitekim zedelenmemiş bir hücrede enzimlerle, bunların substratları birbirlerinden ayrı konumda olmalarına karşın, hücrenin zedelenmesiyle enzimler ve substratları teması geçebilmektedirler. Donmaya bağlı olarak oluşan bu olayı tümünden önlemek olanaksız olduğuna göre, enzimleri önceden inaktive etmek, başvurulabilecek en önemli yöntemdir.

**Mikroorganizmalarda Meydana Gelen Değişimler:** Donma işleminin mikroorganizmalar üzerine etkisi konusunda birkaç faktör bulunmaktadır. Donmanın mikroorganizmalara verdiği zararlar:

- ☐ Hücreler arasında buz oluşumu,
- ☐ Hücre içinde buz oluşumu,
- ☐ Hücreler arası sıvıda konsantrasyonun artması,
- ☐ Hücre içindeki sıvıda konsantrasyonun artması,
- ☐ Düşük sıcaklıktan kaynaklanmaktadır.

## 2. Depolama Aşamasında Değişimler

### 2.1. Fiziksel Değişimler

**Suyun Hareketi:** Donmuş gıdada, depolama süresince meydana gelen en önemli değişim suyun hareketidir. Katı/sıvı ve özellikle sıvı/kristal dönüşümleri meydana gelir. Donmuş üründe su tamamen hareketsiz değildir ve suyun bu hareketi, hem ürünün nem içeriğinin değişimine hem de rekristalizasyon olarak adlandırılan buz kristallerinin büyüklüğünün değişimine neden olur.

**Su İçeriğinde Değişime Neden olan Su Hareketi:** Kuruma ve Ağırlık kaybı: Soğuk depoculukta gıdalardaki ağırlık kaybı, gıdadaki su kaybı ile olur. Gıdalardaki su kaybı aynı zamanda kalite kaybına da neden olur. Ön soğutma veya şoklama ile soğuk veya donmuş muhafazada gıdalardaki ağırlık kaybı; soğutucu ünitelerde aşın karlama olayı ile soğuk oda havasındaki bağlı nem oranının düşük olmasından ileri gelir. Dondurma teknolojisinde en yaygın olarak kullanılan yöntem, soğuk hava ile dondurma yöntemidir. Ancak bu metodun en olumsuz yönü, ambalajsız ürünlerde nem kaybıdır. Ne kadar soğuk olursa olsun havanın, mutlaka bir kurutma potansiyeli vardır. Soğuk havanın nem düzeyine bağlı olarak ürün, az veya çok su kaybeder. Depodaki sıcaklığın hafif düşmesi, materyalin dış katmanının iç katmanına göre biraz daha soğumasına neden olmaktadır. Böylece iç kısımlardaki buzun su buharı basıncı dış kısımlara göre daha yüksek olacağından; içten dışa doğru bir nem transferi gerçekleşmektedir.

**Don Yanığı:** Aşın derecede su kaybı ve özellikle donmanın gerçekleşmesinden sonra yüzeyden süblimasyon yoluyla oluşan su kaybı; ürün yüzeyinde don yanığı denen lekelerin belirmesine neden olmaktadır. Don yanığı, hem dondurulmuş ürünün görünüşüne ait kalite kriterlerine önemli düzeyde olumsuz etkiye hem de besin değerinin düşmesine neden olmaktadır. Don yanığı, donmuş ürünlerdeki buzun süblimasyonla uzaklaşması yoluyla oluştuğuna göre, geride oksijenin derinlere doğru sızabileceği gözenekli bir yapı kalır ve böylece gıda bileşenleri bu bölgede oksidatif değişmelere elverişli bir hale gelir. Don yanığında, dondurulmuş ürün üzerinde önce parlak, sonra oksidasyon sonucu esmerleşmiş benekler meydana gelir. Don yanığını önlemek amacıyla, çeşitli önlemler alınabilmektedir. Bunların en önemlisi, 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. Dolayısıyla, ambalajlama her zaman uygulanabilir bir önlem değildir. Bir diğer önlem, ürünün donma başlangıcında, nem oranı çok yüksek olan yaklaşık  $-4^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$ 'lerdeki soğuk hava ile soğutulmasıdır. Böylece bu ön soğutma ile su kaybı açısından kritik geçiş aralığı, sorunsuz olarak aşıldığından ikinci aşamada daha soğuk hava ile karşılaşan ürün süratle donar ve donma kısa sürede gerçekleştiğinden nem kaybı azalır.

**Nem Kaybı Olmaksızın Suyun Hareketi ve Rekristalizasyon:** Dondurulmuş gıdadaki suyun katı faza dönüşmesiyle oluşmuş kristallerin daha sonra; sayısında, boyutunda, şeklinde ve hatta yönelişinde oluşan her türlü değişik rekristalizasyon olarak adlandırılır. Dondurulmuş gıdaların depolanması ve taşınması sırasında sıcaklıktaki oynamalar rekristalizasyonun başlıca nedenidir. Bir gıdanın kalitesini yüksek düzeyde tutmak amacıyla hızlı bir dondurma uygulanmış olsa bile, daha sonraki uygun olmayan koşullar nedeniyle oluşan rekristalizasyon sonucu, hızlı dondurmanın sağladığı avantajlar kaybedilebilir. Donmuş gıdalarda en yaygın; izomas, gezgin ve yapışma rekristalizasyonları gerçekleşmektedir.

**Gezgin rekristalizasyon:** Küçük buz kristallerinin birleşerek büyümesidir. Depolama sırasında belli bir sıcaklıkta üründe bulunan buz miktarı sabit kalırken kristal sayısı azalır ve kristallerin boyutu büyür. Soğutma sistemlerinin çalışmalarını daima küçük aralar vermek suretiyle sürdürmesi yüzünden depo sıcaklığı az veya çok fakat mutlaka dalgalanır. Depo sıcaklığı dalgalanırken, sıcaklığın yükselme evresinde küçük kristaller büyüklere göre oransal olarak daha fazla küçülürler. Buna karşın sıcaklığın düşme evresinde büyük kristaller bir önceki evrede küçük kristallerin erimesiyle oluşmuş su moleküllerini kendi üzerlerine çekerek onları katı faza geçirme yeteneği küçük kristallerden daha yüksek olduğundan, küçükler aleyhine büyürler. Bu yolla küçük kristaller kaybolurken büyükler gittikçe irileşirler. Kristallerin büyümesi özellikle dondurulmuş meyve ve sebzelerde doku hasarına neden olarak kalitenin düşmesine yol açmaktadır.

**İzomas rekristalizasyon:** Bir kristal düzensiz bir şekilde ve bu nedenle hacmine göre geniş bir yüzey alanına sahipse, zamanla adeta derlenip toparlanarak daha kompakt bir yapıya dönüşme eğilimindedir. Böylece kendi içinde daha az yüzey alanına sahip bir kristal yapı oluşur. Bu değişime izomas rekristalizasyon denir.

**Yapışma ile rekristalizasyon:** Yan yana gelmiş birbirlerine, değen kristallerin birleşerek, toplam yüzey alanın küçülüp boyutlarının büyümesi ve sayısının azalması olayıdır. Yapışma ile rekristalizasyon özellikle küçük kristaller arasında gerçekleşmektedir.

**Çözünenin Kristalizasyonu:** Donmuş fazda şeker gibi pek çok çözünen süper doymuş solüsyon halindedir. Bu çözünenler, tıpkı dondurmadaki laktoz gibi kristalize olabilirler. Laktoz kristallerindeki büyüme, buz kristallerinin büyümesinden küçük olsa bile, bu durum ağızda kumlu bir tekstür oluşumuna neden olur. Çünkü kristalleşen laktoz ağızda daha geç erir. Aynı durum donmuş tatlıların buzlama veya glaze edilme işleminde de ortaya çıkabilmektedir. Donmuş gıdalarda çözünenin kristalizasyonu invert şeker veya gam kullanımı ile belli ölçüde azaltılabilmektedir. Çözünenin rekristalizasyonu genelde depolama sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda görülür.

**Büzüşme:** Özellikle ambalajlanmadan dondurulmuş ürünlerin depolanması süresince üründen nem kaybı ürün yüzeyinde kuruma ve şekil bozukluklarına neden olmaktadır. Dehidrasyon, ürünün hacminde de belli bir küçülmeye neden olur ve hacimdeki bu küçülme donma

şartlarına da bağlı olarak mekanik sistemlerde %3-6'ya kadar artabilmektedir. Kriyojenik dondurucularda yapılan dondurmada hacim küçülmesinin daha düşük olduğu belirtilmektedir.

**Mekanik Hasarlar:** Rekristalizasyon sonucu büyüyen kristal boyutlarında bu hasarın derecesi de artmaktadır. Hücresel dokular esnedikçe, yeni oluşan bu hacimde buz kristali büyüyebilir ve bu dokunun orijinal şekline geri dönmesini engelleyebilir.

## 2.2.Kimyasal Değişmeler

**Lipit Oksidasyonu:** Depolama süresince, donmuş üründe kaliteyi etkileyen en önemli kimyasal reaksiyon lipit oksidasyonudur. Gıdalardaki lipidler hem enzimatik hem de nonenzimatik olarak okside olabilmektedirler. Lipitlerin oksidatif bozulmasını içeren ana reaksiyon, moleküler oksijenin ile olan otooksidasyondur. Lipit oksidasyonu özellikle yağlı et ürünlerinde meydana gelir ve ürünün depolama süresini kısıtlayan en önemli faktördür. Yüksek derecede doymamış yağ otooksidasyona çok daha yatkındır ve bunların otooksidasyonu sonucu hidroperoksitler oluşur. Hidroperoksitler de daha sonra acı gıda tadının karakteristik bileşikleri olan uçucu bileşiklere parçalanır. Bu olumsuz değişikliklere ilaveten, çoklu doymamış yağ asitlerinin oksidasyonu sonucu ortaya çıkan malonaldehit kanserojen bir madde olduğundan gıda güvenilirliğini de etkilemektedir.

**Protein Denatürasyonu:** Konsantre tuz çözeltileri, organik çözücüler, ısı ve soğuk uygulaması proteinlerin yapılarında değişikliklere neden olmaktadır. Proteinler denatüre oldukları zaman, çözünürlükleri azalır, su bağlama yetenekleri değişir, biyolojik aktiviteleri kaybolur ve proteaz etkisine daha duyarlı hale gelir. Dondurma işlemi, tuz ve organik molekülleri içeren solüsyonları konsantre hale getirir. Donmamış fazda meydana gelen bu değişimler de proteinlerde denatürasyona neden olur.

**Vitamin Kayıpları:** Meyve ve sebzelerde vitamin kaybı denince de çoğu kez C vitamini kaybı kastedilir. Çünkü meyve sebzelerde C vitamini temel vitamindir ve C vitamini kolaylıkla parçalanabilmektedir. C vitamini kayıplarının başlıca nedeni askorbat oksidaz enzimidir. Eğer bu enzim ön işlemler sırasında ve dondurma işlemi sırasında inaktif hale getirilmezse, donmuş ürünlerin depolanmasında da aktif olabilir. Dondurma işlemi sırasında, sıcaklık/süre ilişkisi, meyve ve sebze çeşidi, uygulanan ön işlemler, ambalaj türü ve dondurma yöntemi farklı oranlarda C vitamini kayıplarına neden olabilmektedir. Bu nedenle, donmuş depolama sırasında sıcaklık dalgalanmaları meydana gelirse, yüksek miktarda C vitamini kayıpları olabilmektedir.

**Karbonhidratlarda Meydana Gelen Değişmeler:** Karbonhidratlar donmuş depolama süresince hidrolize duyarlıdır. Şeker hidrolizi gıda matriksinde çözünenlerin mol sayısını artırır ve böylece donma noktası sıcaklığı düşürülür. Bu üründe buz miktarında azalmaya neden olur. Bu durum, bazı fiziksel özellikleri değiştirebilir, örneğin, dondurmanın sertliği hidrolizasyon derecesi ile ters ilişkilidir.

**Renk Değişmeleri:** Yeşil renkli meyve ve sebzelerin dondurulmaları ve donmuş ürünlerin depolanmaları sırasında klorofiller bazı reaksiyonlar sonucu feofitinlere dönüşür ve üründe kahverengimsi bir renk meydana gelir. Klorofil parçalanmasında en önemli faktör enzim aktivitesidir. özellikle peroksidaz ve lipoksigenaz enzimleri dondurulmuş meyve sebze üretiminde dikkat edilmesi gereken enzimlerdir. Bu tür istenmeyen renk değişimlerinin oluşmasını engellemek için haşlama veya inorganik tuz çözeltisi ilavesi yapılabilir. Tuz çözeltisi olarak sodyum klorür ve potasyum klorür ya da sodyum veya potasyum sülfat



kullanılmaktadır. Böylece yeşil renkli meyve ve sebzelerin dondurulması ve donmuş ürünlerin depolanması esnasında doğal yeşil renk korunmuş olur. Meyve ve sebzeler san-kırmızı rengi veren karotenoidlerin başlıca bozulma reaksiyonu izomerizasyondur. Sıcaklığın artmasıyla, ışığın etkisiyle asitlerin katalizör etkisiyle karotenoidlerde izomerizasyon meydana gelmekte ve karotenoidlerin ds formları oluşmaktadır. Cis formlarının ortaya çıkmasıyla karotenoidlerin biyolojik aktiviteleri azalmaktadır. Haşlama gibi ısıl işlemlerle enzimler inaktif hale getirilir ve karotenoidlerdeki izomerizasyon engellenir. Pembe, kırmızı, mor ve mavi renklerdeki meyve ve sebzelerde bulunan antosiyaninler suda çözünabilir renk maddeleri olup bitki hücresinde kofullarda bulunur. Hücre zarının zarar görmesiyle birlikte kofullarda etkilenir. Ve oksidasyon antosiyaninlerin bozulmasındaki en önemli etkidir. Özellikle ışığın katalizör etki ettiği oksidasyon reaksiyonlarında kayıplar daha fazla olmaktadır. Oksidasyonla oluşan peroksitlerin pigmentlerle girdiği reaksiyon sonucu pigmentler parçalanmakta ve et renginde bozulmalar meydana gelmektedir. Ete rengini veren miyogloblin donmuş depolama sırasında okside olarak metmyoglobine dönüşmekte ve ette renk solması meydana gelmektedir.

**Enzimatik Esmerleşme:** Dondurulmuş ürünlerin depolanmaları ve çözünmeleri sırasında geri dönüşümsüz esmerleşme reaksiyonları meydana gelmektedir. Polifenol oksidaz enziminin etkin olduğu esmerleşme reaksiyonları, dondurma işleminden önce ön işlem olarak yapılan sülfite, askorbik asit veya sitrik asit ilavesiyle engellenebilmektedir.

**Tat ve Aroma Değişimleri:** Dondurulmuş ürünlerin depolanmaları süresince meydana gelen oksidasyon sonucu oluşan ve acı tat veren bileşikler tat ve aroma değişimlerinin en büyük nedenidir. Alkoller, esterler, aldehitler, ketonlar, asitler, furanlar ve terpenler gibi bileşikler gıdaların kendilerine has tat ve aromalarını oluşturur. Gıdaların dondurulması ile ürüne has tat ve aroma korunsa da bazı gıdalarda daha fazla olmak üzere dondurarak depolama süresince doğal aromada kayıplar oluşmaktadır.

**Mineral Maddelerde Meydana Gelen Değişimler:** Mineraller ısı, ışık, okside edici maddeler ve pH gibi faktörlerle kolayca tahrip olmazlar. Süzme yada bileşenlerin fiziksel ayrılması ile kayıplar söz konusu olsa da donma ve dondurarak depolama süresince mineral maddelerde fazla bir değişim meydana gelmemektedir.

### 2.3. Tekstürel Değişimler

Dondurularak depolanmış gıdalarda hem oluşan buz kristallerinin hücre üzerine olan etkisi hem de kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlar bir takım tekstürel değişimlere neden olmaktadır. Bitki hücresi duvarının yapısında bulunan pektin, hemiselüloz ve selüloz gibi birleşiklerin parçalanmasından dolayı tectürde önemli değişiklikler oluşur. Donma sırasında oluşan buz kristallerinin boyutları ve hücre içindeki bulunduğu yer hücre duvarı açısından önemlidir. Çünkü buz kristallerinden dolayı meydana gelen enzimatik ve kimyasal reaksiyonlar hücre duvarında mekanik bir zarara neden olur. Donmuş ürünlerin depolanması sırasında meydana gelen rekristalizasyon nedeniyle de tekstürel değişimler meydana gelmektedir.

### 2.4. Mikrobiyal Değişimler

Bunlardan birincisi; gıdaların bozulmasına neden olan serbest suyu buz kristalleri haline getirerek dondurmaktır. İkincisi ise, belirli bir sıcaklık derecesinin altında mikroorganizma faaliyetlerinin tamamını durdurmaktır. Düşük sıcaklıkta mikroorganizmaların ölümü veya hasar görmeleri iki teori izah edilmektedir. Bunlardan birincisi, hücre içindeki çözünmüş maddelerin, donma işlemiinde buzun ayrılması ile konsantrasyonu artması ve hücrenin ölmesi,

İkincisi ise hücre içinde ve dışında oluşan buz kristallerinin hücre zarını parçalayarak çözünmeden sonra hücrenin bütünlüğünü koruyamamasıdır.

Patojen mikroorganizmaların çoğu +4 °C'nin altında çoğalamazlar. Gıda zehirlenmesine neden olan mikroorganizmaların faaliyetleri ise 0 °C'nin altında tam olarak durmaktadır. Mikroorganizmaların ölüm oranı ve gıdanın kalitesini donma hızı önemli ölçüde etkiler. Donma hızı arttıkça ölüm oranı artar. Gıdaların kalitesi açısından hızlı dondurma daha çok tercih edilir. Çünkü mikrobiyal faaliyetin durduğu sıcaklık süresine kısa sürede ulaşılarak gıdanın kalitesinde oluşabilecek olumsuzluklar önlenir. Dondurma işleminin mikroorganizmalar üzerindeki etkisi donma sıcaklığına da bağlıdır. Muhafaza sıcaklığı düştükçe mikroorganizmaların ölüm oranı artar. Dondurarak muhafaza sırasında mikrobiyal ölüm oranını gıdanın pH'sı da etkiler ve pH düştükçe mikrobiyal ölüm oranı artar.

Dondurulmuş ürünleri ve özellikle de balıktan mikrobiyal açıdan steril kabul etmek son derece yanlıştır. Pek çok mikroorganizma dondurma işleminden zarar görmez ve daha sonra dondurulmuş depolama süresince inaktif formda olsalar bile hayatta kalabilmektedirler

Gıdalarda bozulmaya neden olan mikroorganizmalar -5 ile -8 °C'ye kadar, mayalar -10 ile -12 °C'ye kadar ve küfler -12 ile -18 °C'ye kadar biyolojik aktivitelerini sürdürebilirler. -18 °C'de ise mikrobiyal gelişme söz konusu değildir. Dondurulmuş depolama süresince mikroorganizma sayısında bir azalma meydana gelmektedir. Bu azalmanın pratikte fazla bir önemi yoktur. Bu nedenle, hammaddenin mikrobiyal kalitesi ve üretim süresince iyi bir hijyen çok daha önemlidir.

### 3. Çözme Aşamasında Değişmeler

Dondurulmuş ürünler, ya tüketici tarafından çözülüp kullanılır veya bir işletmede çözülüp yeni bir ürüne işlenmektedir. Dondurma ve depolamada oluşan değişmeler, çözülme sırasında da hızlanarak devam eder. Çözülme süresinin büyük bir bölümü, donma noktasının biraz altında ve donma noktası civarında gerçekleşir. Bu bölge ise, donma noktasının altındaki diğer sıcaklıklara, göre; mikroorganizma faaliyetinin, rekristalizasyonun, kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonların daha hızlı gerçekleştiği sıcaklık aralığıdır. Hücre özsuyunun belli oranda hücre dışına sızması, mikroorganizmaların daha iyi üreyebilecekleri ve faaliyet gösterebilecekleri bir ortam oluşturur. Dondurulmuş ve sonra çözülmüş meyve, sebze ve et gibi bütün bir dokunun, dondurulmamış olan eşdeğerine göre daha hızlı bozulduğu çok iyi bilinmektedir.

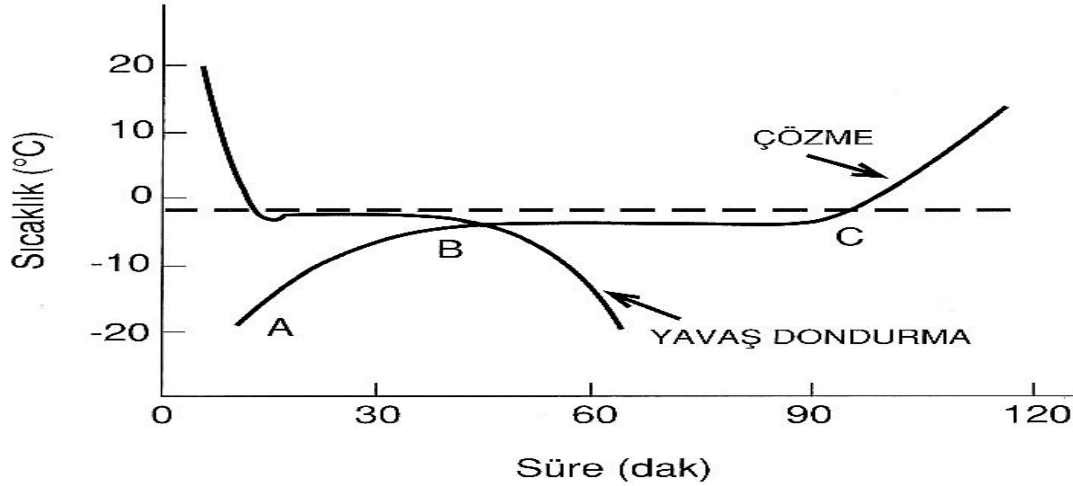
Çözülme sırasında oluşan değişikliklerin en önemli diğer bir nedeni, enzimlerin kataliz ettiği reaksiyonlardır. Donmanın oluşturduğu fiziksel etkilerle hücre içi unsurlarının birbiriyle karışması ve enzimlerin yer değiştirmesi, çözülme ile belirgin bir şekilde ortaya çıktığından, enzimatik reaksiyonlar bu aşamada çok hızlanır. Bu olumsuzluk, haşlanmadığı için enzimleri inaktive edilmeyen meyvelerde daha belirgindir. Özellikle enzimatik esmerleşmeye eğilimi olan açık renkli meyvelerde bu değişim devamlı görülür. Donmuş meyve ve sebzelerin çözülmesi sırasında sadece polifenoloksidaz enzimleri değil, dokudaki diğer enzimlerin de faaliyetleri artmaktadır. Çözme sırasında, dondurma aşamasına göre daha önemli değişmeler meydana gelmektedir. Çözme sırasında oluşan değişimleri sınırlamak için, materyalin uygun bir yöntemle çözülmesi gerekmektedir.

Çözünme sırasında ve çözündükten sonra gıdada mikrobiyal faaliyet başlar. Bu faaliyet çözünme ve çözündükten sonra bekletme şartlarına bağlı olarak değişebilir. Donmuş gıdalar çözündürüldükten sonra oda ısısında bekletildiğinde çabuk bozulur. Bozulmanın nedeni, donma ve çözünme sırasında doku hücrelerinin zarar görmesidir. Bu nedenle de dondurulmuş gıdalar çözündürüldükten sonra hiç bekletilmeden kullanılmalıdır. Küçük parçalar halinde dondurulmuş bazı gıda maddeleri ise hiç çözündürülmeden pişirilmelidir. Gıdayı çözündürmek zorunlu ise mikrobiyal gelişmeye ortam hazırlamayacak koşullarda yapılmalıdır.

## Donmuş Ürünlerin Çözünmesi

### 1. Donma ve Çözünme Olaylarının Kıyaslanması

Bir gıdanın donmasından bahsedilince, içerdiği suyun buz kristallerine dönüşmesi kastedilir. Donan, sadece gıdanın içerdiği sudur. Çözünme denilince, gıdadaki buzun eriyerek sıvı faza yani suya dönüşmesi kastedilir. Eriyen sadece buzdur. Bu açıdan çözünme, fiziksel açıdan donmanın tersine gelişen bir olaydır. En önemlisi çözünmesi tanımlayan “süre-sıcaklık” eğrisinin, donmayı tamamlayan eğrinin tersine gelişen bir eğri niteliğinde olmadığıdır. Bu durum aşağıda verilen “donma-çözünme” eğrilerinde gösterilmiştir.



Donma ve çözünmede zamana göre sıcaklık değişimi

Aynı materyallerin eşit sıcaklık farkında gerçekleştirilen donma veya çözünme olayındaki en önemli farklılık çözünme süresinin donma süresinden çok daha uzun olmasıdır. Donma ve çözünme olayındaki bütün farklılıkların kaynağı, suyun ve buzun bazı fiziksel niteliklerdeki farklılıklar oluşturmaktadır. Örneğin, buzun sıcaklığının suya göre 9 kat hızlı değiştiği saptanmıştır.

### 2. Donmuş Ürünler İçin Çözünme Yöntemleri

Donmuş gıdaların çözünmesi, gerek tüketim yerlerinde, gerekse endüstride daima önemli bir sorun oluşturmaktadır. Çözme işleminde, materyalin aşırı ısınmasından kaçınmak, gıdanın aşırı su kaybını engellemek ve çözme için kısa sürede gerçekleştirmek ve çözme sırasında mikrobiyolojik bir bozulmaya meydan vermemek gibi bazı amaçlar ön planda tutulur. Çözmede kullanılan yöntem, donmuş ürüne ve dondurulma şekline göre farklı olabilmektedir.

Küçük parçacıklar halindeki et, kanatlı etleri ve balık gibi donmuş gıdalar mutfakta doğrudan pişirilme sırasında çözülebilir. Ancak büyük parça etlerin, bu şekilde pişirilirken çözünmesinde bazı sorunlar vardır. Burada, iri parçaların dış yüzeyi çözülüp aşırı pişerek dağılırken iç kısımlar henüz çözülmemiş olabilir. Bu nedenle bu tip donmuş ürünlerin klasik yöntemlerle çözünmesinde, ya buzdolabının normal gözlerinde tutulmaları veya hafif ılık suya daldırılmaları gibi bir uygulama öngörülebilir.

Endüstride ise, donmuş ürünler bir vakum hücrelerinde yoğunlaşan buhar yardımıyla veya sıcaklığı 20 °C'deki sudan yararlanılarak ve donmuş gıda üzerinden ve arasından nemli hava sirkülasyonu uygulayarak çözünmektedir. Bunlar geleneksel çözme yöntemleridir. Ancak endüstride başka bir ürüne işlemek için donmuş ürünleri çözmede dielektrik ve mikrodalga gibi yöntemler de uygulanmaktadır. Mikrodalga ile ısınma ve çözme uzun

süreden beri tüketici mutfaklarında da yer almış bulunmaktadır. Mikrodalga gıda teknolojisinde çeşitli işlemlerde kullanılan bir enerji türüdür. Fırın ürünleri üretiminde, ısıya dayanıklı sıvıları kısmen düşük sıcaklık ve kısa sürede konsantre etmede, yüzeyi ile içi arasında fazla bir fark oluşmadan bir gıdayı pişirmede veya kurutmada, haşlamada, dondurarak kurutmada, pastörizasyon-sterilizasyon gibi ısı işlemlerde donmuş ürünleri çözmede kullanılabilmektedir.

### 3. Çözünme Süresinin Hesaplanması

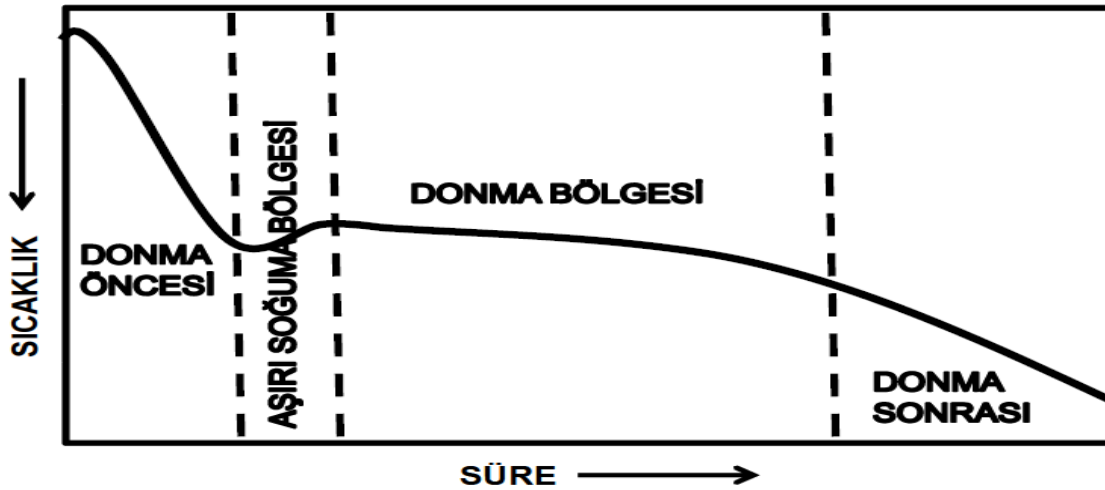
Donma süresinin hesaplanmasında olduğu gibi çözünme süresinin hesaplanmasında da çeşitli eşitlikler önerilmiştir. Plank eşitliğinin çözünme süresinin hesaplanmasında da kullanılabileceği belirtilmektedir. Ancak bu takdirde donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı yerine, donmamış gıdanın ısı iletkenlik katsayısının kullanılması gerekmektedir. Çünkü ısı, çözünme sırasında donma halinin aksine, materyalin çözünmüş cephesinden buz cephesine doğru transfer olmaktadır.

#### DONMA OLAYI 3 AŞAMADA GERÇEKLEŞMEKTEDİR:

**Ön soğutma (Precooling):** Gıda maddesinin başlangıçta sahip olduğu ilk sıcaklık derecesinden, donma noktası anına kadar soğutulduğu ve faz değişiminin oluşmadığı devredir. Bu devrede uzaklaştırılan ısı, gıdanın sıcaklığında düşüş şeklinde kendisini gösterdiğinden, “hissedilir ısı” olarak adlandırılmaktadır

**Donma (Freezing):** Gıdanın içerdiği serbest suyun buz haline dönüştüğü devredir. Bu devrede uzaklaştırılan ısı gıdada sıcaklık düşüşüne neden olmadığı için “latent ısı (gizli ısı)” olarak adlandırılmaktadır (~%75’inin donması-Termal Donma Periyodu)

**Son soğutma (Tempering):** Gıda içerisindeki suyun çoğunluğu donduktan sonra sıcaklığın düşürülmeye devam edildiği devredir. Gıdada bulunan donabilir nitelikteki suyun hemen hemen tamamının donduğu aşamadır.



### Özetle,

#### TİCARİ AMAÇLI DONDURULAN GIDALAR

Meyveler	Çilek, vişne, kayısı, ahududu, vb.
Sebzeler	Bezelye, yeşil fasulye, mısır, ıspanak, patates
Deniz Ürünleri	Balıklar ve kabuklular
Etler	Taze kırmızı ve beyaz etler
Unlu Mamuller	Hamur, kek ve ekmek
Hazır Yiyecekler	Pizza, tatlılar, dondurma, etli yemekler, sebzeli yemekler vb.

## **Dondurulamayan Gıdalar**

- 1) Jel veya emülsiyon halindeki gıdalar.
- 2) Süt: Sütün yapısı bozulur, yağı ayrılır, proteinler koagüle olur ve emülsiyonu bozulur.
- 3) Yoğurt: Jel yapısı bozulur, su salma görülür.
- 4) Beyaz Peynir vb.: Yapı dağılır, parçalanır, ufalanır ve kumsu yapı oluşur.
- 5) Reçel ve marmelat: Jel yapısı bozulur, suyunu salar ve kristaller oluşur.
- 6) Nişasta Jeli içeren gıdalar: Puding, çorba ve nişastalı tatlılar. Sineresis görülür

## **Donma Hızı**

Bir materyalin donma süresi onun donma hızı hakkında bir fikir vermez. Donma hızı termal merkez sıcaklığının  $T_1$  gibi bir sıcaklıktan  $T_2$  gibi bir sıcaklığa düşmesi için geçen süre olarak belirlenmiştir. Donma hızı dondurulan materyalin termal merkezinin yüzeye olan en yakın mesafesinin donma süresine oranı olarak tanımlanır. Donma hızı gerçekte sabit değildir. Donma süresi boyunca hızlanarak artar.

## **Dondurma Yanığı**

Ambalajsız gıdaların dondurulması sırasında yüzeyde sublimasyonla nem kaybı sonucu oluşan renk değişimine denir. Suda çözünen maddeler yüzeye su ile taşınır ancak suyun buharlaşması sonucu renk kararmaları meydana gelir. Bu tür gıdalarda dondurucu yanığının önlenmesi için ürünün yüzeyinin ince bir buz tabakası ile kaplanması sağlanır. Bu işleme Glazing denir.

## **Don Çatlağı**

Gıdaların hızlı dondurulmasının birçok olumlu yönleri bulunmasına karşın belki de tek olumsuz yönü bazı gıdalarda belli koşullar altında çatlamalar ve parçalanmaların meydana gelmesidir.

## **Camsı Geçiş Sıcaklığı**

Dondurarak kurutma esnasında ürünün sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığının altında olmalıdır. Aksi takdirde ürünün yapısı bozulur. Camsılaşma denilen olay bir maddenin soğutulduğunda katılaşmasıdır. Maddelerin camsı geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklardaki yapısı sert ve kırılgan, üstündeki sıcaklıklarda ise yumuşak ve esnektir. Bu sıcaklık erime sıcaklığından her zaman daha düşüktür. Her maddenin kendine özgü bir camsılaşma sıcaklığı bulunur.

## **Gıda ve Dondurma Yöntemi Seçimi**

Meyve suları ve konsantreleri gibi akışkan nitelikli gıdalar en iyi kazıyıcı dondurucularda dondurulur.

Bezelye, çilek, vişne gibi küçük boyutlu meyve ve sebzeler ile doğranmış meyve ve sebzeler için akışkan yatak dondurucular kullanılır.

Ekonomik değeri yüksek ürünler (istakoz, karides, midye vb.) için kriyojenik dondurma yöntemi kullanılır.

Büyük parça etler, kırmızı et, tavuk, hindi karkasları, porsiyone etler, balıklar veya parçalanmış halleri için hava akımlı dondurucular kullanılır.

Belli bir şekle sahip ürünler (hamburger köftesi, köfte, kıyma, püre ürünler) için plakalı dondurucular kullanılır.

## **Donma Hızı**



$$V = \frac{L}{t}$$

- $V = \text{Donma hızı (cm/h)}$
- $L = \text{Termal merkezin yüzeye en yakın mesafesi (cm)}$
- $t = \text{Dondurulan gıdanın merkez noktasının } 0^{\circ}\text{C'den } -15^{\circ}\text{C'ye düşmesi için geçen süre (Nominal donma süresi)}$
- Not: (Süre saat cinsinden, L eğer çap verilirse yarıçap olarak hesaplama yapılır.)

**Soru:** 2,6 cm çapında orta irilikteki çilekler akışkan yatak dondurucuda dondurulmaktadır. Çileklerin merkez sıcaklığının  $0^{\circ}\text{C}$  'den  $-15^{\circ}\text{C}$  'ye erişmesi için geçen süre 12 dakikadır. Donma hızını hesaplayınız.

$$V = \frac{L}{t} = \frac{2,6/2}{12/60} = 6,5 \text{ cm/h}$$

<i><b>Donma Hızları</b></i>	<i><b>Donma Hızı (cm/h)</b></i>	<i><b>Tipi</b></i>
<i>Yavaş Dondurma</i>	0,2 ' ye kadar	Durgun havada dondurma
<i>Çabuk Dondurma</i>	0,3 – 0,5	Hava dolaşımli dondurma – Plakalı dondurma
<i>Hızlı Dondurma</i>	0,5 – 1,0	Akışkan yatak dondurma
<i>Aşırı Hızlı Dondurma</i>	>1,0 üzeri	Kriyojenik dondurma (CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> )

### **Donma Süresinin Hesaplanması (Plank Eşitlikleri)**

#### **Plank eşitliklerindeki varsayımlar**

- Materyalin donma başlangıç sıcaklığına eriştiği andan sonra geçen süreyi kapsamaktadır. Ön soğutma süresi hesaplama dışında kalmaktadır.
- Donma sonunda materyalin hangi sıcaklığa inmiş olduğu belirsizdir.
- Dondurulan materyaldeki suyun tümünün donma noktasında katı toza dönüştüğü kabul edilmektedir.
- Dondurulan gıdanın yoğunluk ve ısıl iletkenlik katsayısının donma süresince sabit kaldığı varsayılmaktadır.
- Dondurulan materyalin donma gizli ısısı materyaldeki suyun kütle fraksiyonu ile suyun donma gizli ısısının (335 kJ/kg) çarpımıyla elde edilen değer olarak kabul edilmektedir.
- Ambalajlı gıdalarda donma süresinin hesaplanmasında ambalaj içindeki gıda sanki bir blokmuş gibi kabul edilmektedir.

#### **Ambalajsız Ürün**

$$t_F = \frac{\rho \cdot H_L}{T_F - T_{\infty}} \left( \frac{P \cdot L}{h_c} + \frac{R \cdot L^2}{\lambda_d} \right)$$

#### **Ambalajlı Ürün**

$$t_F = \frac{\rho \cdot H_L}{T_F - T_\infty} \left[ P \cdot L \left( \frac{1}{h_c} + \frac{L_1}{\lambda_1} \right) + \frac{R \cdot L^2}{\lambda_d} \right]$$

Ambalajlı ürünlerde birden çok ambalaj malzemesi varsa eşitlikte  $\left( L \left( \frac{1}{h_c} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3} + \dots \right) \right)$  ambalajların kalınlığı ve ambalajların ısı iletkenlik katsayıları ilave yapılarak işlem yapılmalıdır.

- $t_F$  = Donma süresi (saniye)
- $\rho$  = Donmuş gıdanın yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
- $H_L$  = Gıdanın gizli ısısındaki değişim ( $kJ/kg$ )
- $T_F$  = Donma sıcaklığı başlangıcı
- $T_\infty$  = Donma havasının sıcaklığı
- $h_c$  = Materyalin yüzeyindeki ısı aktarım kat sayısı ( $w/m^2 \cdot ^\circ C$ )
- $L$  = Cismin kalınlığı (m)
- $\lambda_d$  = Donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı ( $w/m^2 \cdot ^\circ C$ )
- $L_1$  = Ambalajın kalınlığı (m)
- $P$  ve  $R$  = Dondurulan gıdanın geometrik şekline bağlı katsayılar
- $\lambda_1$  = Ambalajın ısı iletkenlik katsayısı
- Sonsuz dilim için  $P = 1/2$        $R = 1/8$
- Sonsuz silindir için  $P = 1/4$        $R = 1/6$
- Küre ve küp için  $P = 1/6$        $R = 1/24$