PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLARINDA SOĞUTMA SİSTEMİ TASARIMI

Mustafa GÖKTAŞ[1], Abdulmecit GÜLDAŞ[2]

Öz: Günümüzde plastik malzemeler sağladıkları avantajlar ve sahip oldukları üstün özelliklerinden dolayı çok geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Çevre üzerinde bazı olumsuz etkilerinin ortaya çıkmasına rağmen vazgeçilmez bir endüstriyel malzeme olmalarının yanında kullanım alanları da sürekli genişlemektedir. Plastik malzemelerin birçoğu ısı ile şekillendirilmektedirler. En çok kullanılan ısı ile şekillendirme yöntemlerinden birisi de plastik enjeksiyon kalıplama tekniğidir. Bu yöntemle üretilen plastik ürünler; şekil, boyut, renk ve yüzey özellikleri açısından genellikle son halini almış duruma gelirler. Genellikle nitelikli çelik alaşımlardan üretilen kalıplar üzerinde plastik ürüne uygun boşluklar bulunaktadır. Boşluğa dolan ergiyik plastik katılaştıktan sonra kalıp yarımları ayrılır ve çıkarma sistemi ürünü kalıp dışına çıkarır. Yeni parça üretimi için süreç tekrarlanın ve kalıplama işlemi döngüsel olarak devam eder. Plastik enjeksiyon kalıplama ısıtma ve soğutma etkileri altında gerçekleşen bir üretim metodu olmasından dolayı bu sürecin kontrollü bir biçimde yapılması ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir. Isıtma esnasında plastik malzeme granül halde bulunduğu için kaliteyi asıl etkileyen süreç plastik malzemenin şeklini aldığı soğutma safhası adımıdır. Plastik malzemenin soğuması olayı aslında kalıplama çevriminin safhaları olan dolum, ütüleme, soğutma ve çıkarma adımlarının tümünde devam eder. Bu nedenle soğutma sistemi tasarımında tüm adımlarda sıcaklığın etki göz önünde bulundurulmalıdır. Plastik enjeksiyon kalıplama, kalıp

1 Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Ankara / Türkiye, e-mail: mustafagoktas@gazi.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-8742-9114

2 Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara / Türkiye, e-mail: aguldas@gazi.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-1865-2272

içerisine ergiyik plastikle gelen ısının soğutma kanallarındaki su ile kalıptan uzaklaştırılması biçiminde işleyen bir ısı transferi sürecidir. Kalıp üzerindeki soğutma sistemi bu ısı aktarımını etkili ve verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlamakla görevlidir. Etkili bir soğutma sistemi soğutma hızını arttırarak toplam çevrim süresini kısaltır. Soğutma esnasında eş sıcaklık dağılımının sağlanması ise ürün kalitesi açısından son derece önemlidir. Plastik parça üzerindeki çökme, çarpılma, boşluk ve çapak gibi kusurların oluşumunun önlenmesi için soğutma sisteminin tasarımı iyi belirlenmelidir. Plastik enjeksiyon kalıpları plastik enjeksiyon makinesine bağlanarak kalıplama işlemi gerçekleştirilmektedir. Kalıbın açılıp kapatılması, kalıba ergiyik plastiğin basımı, itici sistemi ile plastik ürünün dışarı atılması plastik enjeksiyon makinesi tarafından geçekleştirilir. Soğutma kanalları, bağlantı rakor ve hortumları, kalıp şartlandırıcı ve chiller soğutma ünitesi soğutma sistemi elemanlarıdır ve genellikle enjeksiyon makinesinde bağımsız çalışmaktadır. Soğutma sisteminde kanalların boyutları, yerleşimi, dağılım sıklığı, kanal uzunluğu ısı aktarımı ve dağılımını doğrudan etkilemektedir. Soğutma suyu sıcaklığı ve debisi, kalıp malzemesinin ısıl iletkenliği gibi parametreler soğutma sistemi tasarımında belirleyici rol oynamaktadır. Soğutma kanalları kalıp plakaları üzerinde matkap ile delikler delinerek oluşturulmaktadır. Doğrusal delikler eğimli hatlara sahip kalıp boşluklarının düzgün bir şekilde soğutulmasını sağlayamayacağından kalıp boşluğunu uyumlu olarak belirli bir mesafeden takip eden şekil uyumlu soğutma kanallarına ihtiyaç duyulmaktadır. Gelişen imalat teknikleri ile şekil uyumlu soğutma kanallarının üretimi mümkün hale gelmektedir. Eklemeli imalat, katmanlı sert lehimleme gibi imalat yöntemleri ile şekil uyumlu kanallar başarılı bir şekilde üretilebilmektedir. Şekil uyumlu soğutma kanalları kullanımı ile çevrim süresinin kısalırken parça üzerindeki çarpılmaların azaldığı birçok çalışma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plastik Enjeksiyon Kalıplamada Soğutma Sistemi Tasarımı, Sıcaklık Kontrolü, Çevrim Süresi, Şekil Uyumlu Soğutma Kanalları

GİRİŞ

Plastikler, petrolün enerji amaçlı kullanımının gittikçe yaygınlaştığı dönemlerde, rafine edildikten sonra atık olarak yok edilmeye çalışılan değersiz bir madde olarak görülmekteydi. 19. yüzyılın ikinci yarısından sonra içine eklenen katkı maddeleriyle ürüne dönüştürülebilir bir mal-

zeme olduğu keşfedilmiştir. Plastik malzemeler sağladığı önemli avantajlar sayesinde geleneksel malzemeler olan ahşap, seramik ve metallerin yanında yerini almıştır. Ucuzluğu, hafifliği, seri üretime uygunluğu, yalıtkan oluşu, kimyasal kararlılığı gibi birçok özelliği sayesinde plastik malzemeler, günümüzün vaz geçilmez üretim malzemesi haline gelmiştir ve günlük hayatın hemen her alanında kullanılmaktadır. Plastik malzemelerin varlığı, kullanıldığı otomotiv, medikal, ambalaj, elektronik, uzay ve havacılık gibi pek çok alanın da gelişmesine hız kazandırmıştır.

Plastik malzemelerin ürüne dönüştürülmesi için çok sayıda üretim yöntemi geliştirilmiştir. Plastik malzemeler ısı karşısında yumuşayarak ergiyik haline gelebilmektedirler. Kullanılan üretim yöntemlerinde plastik malzemelerin bu özelliğinden faydalanılmaktadır. Enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon kalıplama, şişirme, vakum kalıplama, dönel kalıplama; plastik malzemelerin ürüne dönüştürülmesinde en yaygın kullanılan yöntemler arasındadır.

Plastik malzemeler günlük hayatın hemen her alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Ucuz ve kolay işlenebilir olmaları, yoğunluklarının düşük olması, ısıl ve elektriksel iletkenliklerinin düşük olması, şeffaflık, geniş renk seçenekleri, korozyon direnci ve tekrar işlenebilir olmaları gibi birçok avantajlı özelliğe sahiptirler.

Plastik malzemeler ısı etkisi ile sertliklerini kaybedip akışkan hale gelirler. Bu durum plastik malzemelerle seri bir şekilde üretim yapma kolaylığı sağlar. Plastik malzemelerin seri üretim teknikleri; plastik enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon kalıplama, şişirme kalıplama, vakum kalıplama ve döner kalıplama vb. şeklinde sayılabilir.

Plastik malzemelerin şekillendirilerek ürün haline getirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden birisi de plastik enjeksiyon kalıplama yöntemidir. Bu yöntem ile üretilen plastik ürünler genellikle ikincil bir işleme ihtiyaç duyulmadan nihai haline gelmiş olurlar. Farklı boyut ve geometriye sahip plastik ürünlerin özdeş ve seri olarak üretilmesini sağlayan bu yöntem üretim maliyetlerinde de avantaj sağlamaktadır.

Kalıplama işlemi, plastik enjeksiyon makinesine bağlanarak çalıştırılan kalıp sayesinde gerçekleştirilir. Kalıplama esnasında sıcaklık, basınç, zaman ve hız para metreleri kontrol edilerek en uygun şartlar

oluşturulmaya çalışılır. Kalıp, genellikle iki yarımdan oluşur ve seri bir şekilde kapanıp açılabilir.

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi; dolum, ütüleme, soğutma, kalıptan çıkarma gibi temel safhalardan oluşur. Isıtılarak ergiyik haline getirilmiş olan plastik malzeme, çelik plakalar üzerine işlenmiş, ürün geometrisine uyumlu kalıp boşluklarına basınç ile enjekte edilir. Kalıp içine dolan plastik malzeme soğumaya başlar. İstenen katılaşma seviyesine ulaşıncaya kadar kalıp doldurulmaya çalışılarak basınç altında tutulur. Ergiyik plastiğin soğuyarak katılaşmasıyla plastik ürün kalıptan çıkarılır. Bu işlemlerin arka arkaya tekrarı ile seri üretim gerçekleştirilmiş olur. Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi döngüler halinde gerçekleşir. Üretim çevrimi için geçen süre üretim hızını belirler.

Plastik enjeksiyon kalıplamada bir çevrim süresi içinde en fazla zaman alan safha, soğutma işlemidir (Qiao, 2006). Kalıp içindeki ergiyik plastiğin katılaşması için soğutmaya ihtiyaç duyulur. Soğutma işlemi ise kalıp üzerinde bulunan soğutma sistemi ile kontrollü ve hızlı bir şekilde yapılır. Soğutma süresi, üretim hızını doğrudan etkilediği için bu işlemin mümkün olduğunca kısa sürede gerçekleşmesi istenir. Soğutma işlemi, çevrim süresini etkilediği gibi plastik ürünün kalitesini de önemli ölçüde etkiler. Plastik malzeme soğurken parça üzerinde oluşacak çarpılmalar, parça için beklenen boyutsal ve geometrik toleransların aşılmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle plastik enjeksiyon kalıpları üzerinde bulunan soğutma sistemlerinden kısa sürede soğutabilme yeteneğinin yanında kaliteli soğutmanın gerçekleştirebilmesi de istenmektedir.

Plastik enjeksiyon kalıplarının hızlı ve kontrollü bir şekilde soğutulabilmesi için kalıp plakalarına matkap ile delmek suretiyle açılan soğutma kanallarından soğuk su akışı gerçekleştirilmektedir. Bu sayede ergiyik plastik üzerindeki ısı kalıba aktarılmaktadır. Kalıp üzerindeki ısı ise soğutma suyu ile uzaklaştırılmaktadır. Plastik enjeksiyon kalıplarına soğutma kanalları açılırken kanalların kalıp boşluklarına yakın olan bölgeler tercih edilir. Ancak doğrusal hatlara sahip olmayan, karmaşık formlu plastik ürünler kalıplanmak istendiğinde doğrusal soğutma kanalları kalıp boşluklarına uyumlu olacak şekilde yanaşamamaktadır. Soğutma kanalları bazı bölgelerde kalıp boşluğuna yaklaşırken bazı bölgelerde ise uzaklaşmaktadır. Bunun sonucu olarak ergiyik plastik mal-

zemenin bazı bölgeleri daha erken soğuyup katılaşırken diğer bölgeler daha geç katılaşmaktadır. Plastik parça üzerindeki farklı katılaşma bölgelerinde farklı çekme oranlarından dolayı plastik parçalar çapılmaya maruz kalmaktadır. Bu durum ise plastik parça kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir.

Kalıp boşluğuna dolan ergiyik plastiğin daha eş sıcaklık dağılımı ile soğutulabilmesi için plastik parçanın geometrisine uyumlu soğutma kanallarına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil uyumlu soğutma kanalları plastik malzemenin daha düzgün ve hızlı soğutulabilmesini sağlamaktadır. Bunun yanında karmaşık formlu soğutma kanallarına sahip kalıpların nasıl üretileceği ise kalıp üreticileri için çözülmesi gereken bir problem haline gelmektedir. Ayrıca karmaşık formlu soğutma kanallarının nasıl tasarlanacağı da açıklığa kavuşturulması gereken ayrı bir sorunu teşkil etmektedir.

Plastik enjeksiyon kalıbı içerisindeki ergiyik plastiğin ürün kalitesi ve üretim verimliliği açısından en uygun biçimde soğutulabilmesi için gerekli soğutma sisteminin nasıl tasarlanması gerektiği konusunda birçok çalışma yapılmış ve yeni çalışmalar da devam etmektedir. Yapılan çalışmalar deneysel, sayısal, tasarım algoritması geliştirme ve üretim yöntemi gibi birçok yönden ele alınabilir.

Yapılan bu çalışmada plastik enjeksiyon kalıplarında etkili ve erimli bir soğutmanın yapılabilmesi için gerekli soğutma sisteminin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken prensipler genel olarak sunulmaya çalışılmıştır.

PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA

Plastik Malzemeler

Günlük yaşamın hemen her alanında yaygın olarak kullanılan plastikler geleneksel malzemeler olan ahşap, seramik ve metal malzemeler yanında yerini almıştır. Sahip oldukları avantajlar sayesinde büyük bir kullanım yaygınlığına kavuşmuş ve özellikleri de sürekli olarak geliştirilmektedir. Plastik malzemelerin tercih edilmesini sağlayan önemli özellikler arasında; düşük yoğunluklu olmaları, kolay işlenebilir olmaları, ısı ve elektriğe karşı yalıtkan olmaları, şeffaf olmaları, korozyon

direnci, ucuz olmaları ve tekrar işlenebilir olmaları sayılabilir (Akyüz, 1998).

Polimerler, "mer" adı verilen, tekrarlanabilir birimlerden oluşurlar. Polimerler yüksek molekül ağırlığına sahip ve uzun zincirimsi bir yapıdadır. Örneğin polietilen polimeri, etilen molekülünün zincir şeklinde arka arkaya defalarca birleşerek oluşturduğu bir zincirdir. Polimerlere eklenen katkı maddeleri ile plastik malzemeler elde edilir. Mekanik yapının düzenlenmesi için plastikleştiriciler, ergiyik akışkanlığı iyileştirmek için yağlayıcılar, dolgu maddeleri, antioksidantlar, UV ve ısı dayanımı arttırıcılar gibi katkı maddeleri polimerlerin özelliklerini iyileştirerek endüstriyel olarak kullanılmalarını sağlarlar (Savaşçı vd., 2008).

Plastik malzemeler Termoplastikler, Termoset plastikler ve Elastomerler olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar. Termoplastiklere ısı verildiğinde polimer zincirlerindeki hareketlilikler artmaya başlar. Polimer zincirlerinin birbiri üzerinde kaymaya başlamasıyla katı haldeki plastik malzeme ergiyerek akışkan hale gelir. Bu sayede termoplastik malzemeler şekillendirilerilebilir ve soğuma ile birlikte tekrar katılaşıp şekillerini korurlar. Termoplastikler için ısı ile ergime ve katılaşma tekrarlanabilir bir süreçtir. Bu tür malzemeden üretilen plastik ürünleri geri dönüşümü mümkündür (Malloy, 2010).

Termoset malzemeler ısı altında bir defa şekillendikten sonra dallanmış polimer zincirleri birbirleri içine geçerek daha mukavim bir yapı oluştururlar. Bu dallanmış yapının varlığı nedeniyle termoset malzemeler tekrar ısıtıldıklarında yumuşamazlar ve ergiyik haline gelmezler. Isı uygulanmaya devam edilmesi durumunda ise polimer zincirler tersinmez halde bozunurlar. Bu tür malzemelerden üretilen plastik ürünlerin geri dönüşümü söz konusu değildir. Elastomer malzemeler şekillendirildikten sonra pişirilerek polimer dalları arasında çapraz bağlar oluşturulur. Oda sıcaklığındayken esnek bir yapıya sahip oldukları için şişirilebilir özelliktedirler. Tekrar ısıya maruz kaldıklarında termoset plastiklerde olduğu gibi ergiyerek akışkan hale gelmezler. Termoplastik malzemeler polimer zincirlerinin dizilimine göre Amorf ve yarı-kristalin olmak üzere iki guruba ayrılabilir. Amorf yapıda polimer zincirleri tamamen düzensiz bir yapıdadır. Bu amorf yapı pişmiş spagettiye benzetilmiştir. Amorf yapılı plastik malzemeler şeffaftırlar. Bu tür malze-

melere ısı uygulandığında polimer zincirler arasındaki mesafeler artar ve malzeme ergiyerek akışkan hale gelir (Savaşçı vd., 2008).

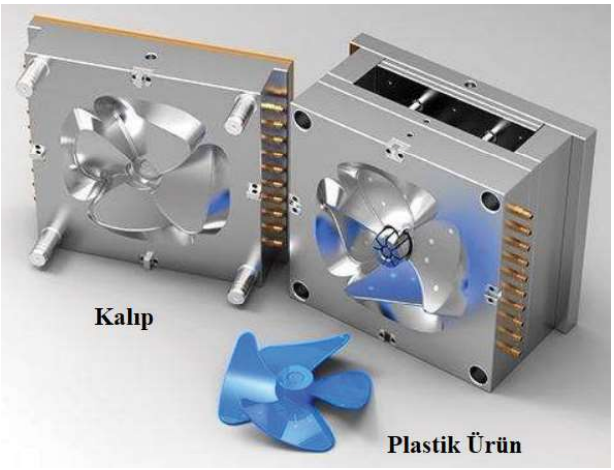
Plastik Enjeksiyon Kalıplama

Plastik malzemelerin ısı etkisi ile yumuşamaları ve akışkan hale gelmeleri seri bir şekilde üretim yapma kolaylığı sağlar. Plastik malzemelerin bu özelliği sayesinde kullanılan üretim yöntemleri arasında ekstrüzyon kalıplama, döner kalıplama, vakum kalıplama, şişirme kalıplama ve plastik enjeksiyon kalıplama sayılabilir. Enjeksiyon kalıplama yöntemi plastik malzemelerin en yaygın kullanılan işleme yöntemlerinden birisidir.

Plastik Enjeksiyon Kalıbı

Plastik enjeksiyon kalıplama yönteminin gerçekleşmesinin sağlandığı ana eleman enjeksiyon kalıbıdır. Enjeksiyon kalıpları genellikle alaşımlı çelik malzemelerden üretilirler (Şekil 1). Kalıp içerisinde ürün geometrisine uygun bir boşluk bulunmaktadır. Ergiyik haldeki plastik akışkanlığı sayesinde bu boşluğa enjeksiyon yapılarak doldurulur. Sonrasında plastik malzeme soğuyarak katılaşır ve plastik ürün kalıptan çıkarılır. Ergiyik plastiğin kalıp boşluğuna ulaştırılması, ürün geometrisinin oluşturulması, soğutulması ve dışarı çıkarılması işlemleri plastik enjeksiyon kalıbının görevleridir. Plastik enjeksiyon kalıbı birçok işlemin aynı anda, seri ve hassas bir şekilde gerçekleştirildiği karmaşık bir sistemdir. Bir plastik enjeksiyon kalıbı genel anlamda iki yarımdan oluşsa da ana bölümleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Ekersular, 2007).

- *Yolluk sistemi*
- *Kalıp boşluğu ve maça sistemi*
- *Soğutma sistemi*
- *Çıkarma sistemi*



Şekil 1. Enjeksiyon Kalıbı ve Plastik Ürün[3]

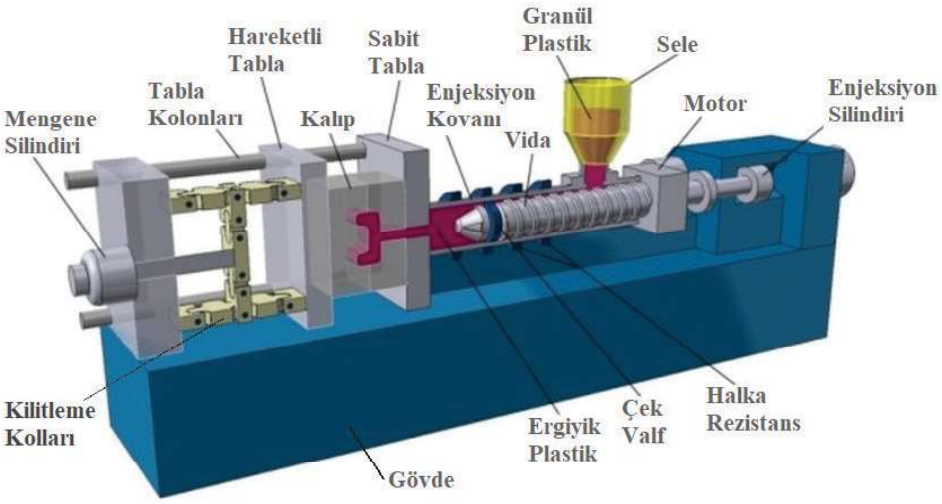
Plastik Enjeksiyon Makinesi

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi plastik enjeksiyon tezgâhı ile gerçekleştirilir (Şekil 2). Plastik ürün için hazırlanan kalıp yarımları enjeksiyon tezgâhının sabit ve hareketli tablalarına bağlanarak kalıbın açılması ve kapatılması sağlanır. Enjeksiyon ünitesinde bulunan vidalı milin dönmesi ile sele içinde bulunan granül haldeki plastik malzeme kovan içerisine taşınır. Kovanın dışında bulunan rezistanslar kovanı ısıtır ve katı haldeki plastik malzeme ergiyik hale gelir. Vidalı milin dönme hareketi ile ergimiş plastik kovanın ön bölümündeki hazneye dolar ve enjeksiyon için hazır duruma gelmiş olur.

Plastik enjeksiyon tezgâhı kalıplama işleminin tüm safhalarının kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Plastik enjeksiyon kalıbı iki ana yarımdan oluşur. Kalıbın seri olarak açılıp kapanması için kalıp enjeksiyon tezgâhının sabit ve hareketli tablalarına bağlanır. Mengene ünitesi kalıbın basınç karşısında açılmasını önleyerek kapalı konumda tutulmasını sağlar. Sele içindeki granül haldeki plastik malzeme aşağı doğru akarak vidalı milin helezon boşluklarına dolar. Vidalı milin dönmesi ile plastik malzeme kovan içerisinde ileriye doğru taşınır. Enjeksi-

3 The Basics Of Injection Molding Service

yon kovanının dışına sarılmış rezistansların ürettiği ısı ile kovan içindeki plastik malzeme ergiyerek akışkan hale gelir. Ergimiş plastik, kovanın ön bölümündeki hazneye dolar ve enjeksiyon için hazır duruma gelmiş olur. Enjeksiyon silindirinin vidalı mili ileri doğru itmesi ile çek valf kapanır ve ergiyik plastiğin geri kaçmasını önler. Haznedeki ergiyik malzeme kalıp içerisine basılarak kalıp boşluğu doldurulur.



Şekil 2. Plastik Enjeksiyon Makinesi[4]

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi döngüsel olarak devam eden dört ana safhadan oluşmaktadır (Şekil 3). Seri üretim boyunca bu dört adım otomatik olarak tekrarlanır. Bunlar; dolum, ütüleme, soğutma ve çıkarma safhalarıdır (Kazmer, 2007). Dolum adımında ileri itilen vidalı mil kovan haznesindeki ergiyik plastiği kalıp içine enjekte eder. Kalıp içindeki hava kalıp ayırma yüzeyinden dışarı doğru atılır. Kalıp boşluğundaki hava yerine akışkan haldeki plastik malzeme dolar. Kalıp içindeki plastik malzeme soğumaya başladığı için çekerek büzülmeye meydana gelir. Enjeksiyon makinesinde mengene ünitesinin kilit konumda bulunması kalıbın açılmasını önler.

Enjeksiyon kovanın ön bölümündeki haznede ergiyik plastik hazır halde beklemektedir. Dolum safhasında vidalı milin eksenel hareketi ile

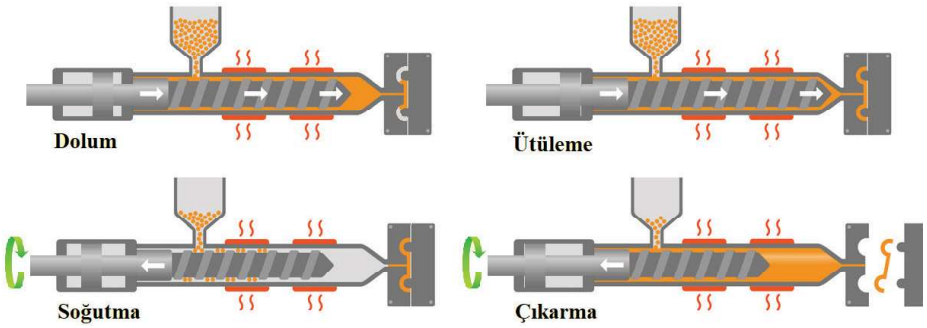
4 Introduction to Injection Molding for Mass Production of Custom Plastic Parts

kovan haznesindeki ergiyik malzeme kalıp içerisine enjekte edilir. Kalıp boşluğu tamamen dolarken kalıp içerisindeki hava kalıp ayırma hattından dışarıya itilir. Kalıp içerisine yüksek basınçla dolan ergiyik plastik kalıbı açmaya zorlar. Kalıbın kapalı tutulması için gereken kuvvet mengene ünitesi ile sağlanır.

Ütüleme adımında çekme etkisiyle boşluk oluşmaması kalıp basınç altında tutularak dolmaya zorlanır. Kalıbın dolumuyla birlikte soğuma süreci başlar ve kalıp içerisindeki plastik malzemenin sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığının altına ininceye kadar devam eder. Bu esnada soğuyan plastik malzeme çekerek hacmi küçüldüğü için kalıp içerisine ergiyik basımı devam eder.

Soğutma aşamasında kalıp içerisindeki plastik malzemenin tamamen katılaşması için çıkarma sıcaklığına düşünceye kadar soğutma işlemi gerçekleştirilir. Soğuma safhası ergiyik malzeme kalıbın içerisine ilk giriş anından itibaren başlar ve kalıp açılana kadar devam eder. Kalıp sıcaklığının ergiyik sıcaklığından düşük olması nedeniyle ergiyik malzeme üzerindeki ısı sürekli olarak kalıba transfer olur. Soğuyarak çıkarma sıcaklığına ulaşan plastik malzeme şeklini koruyabilecek ürün haline gelir.

Plastik ürün yeterince soğuduktan sonra çıkarma safhasına geçilir. Çıkarma adımında kalıp açılır ve çıkarma sıcaklığına erişen plastik parça iticilerle itilerek dışarıya çıkarılır. Mengene ünitesi kalıbı açarak kalıp yarımlarını birbirinden uzaklaştırır. Sonraki üretim çevrimi için kalıp tekrar kapatılır. Gerçekleştirilen tüm hareketler için gerekli kuvvetler hidrolik sistem ile sağlanır.



Şekil 3. Plastik Enjeksiyon Kalıplama Adımları

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi sırasında kullanılacak tüm üretim parametreleri kontrol paneli ile kontrol edilir. Bu parametreler ergiyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, ütüleme basıncı, dolum hızı, soğutma süresidir.

Soğutma Sisteminin Gerekliliği

Plastik enjeksiyon kalıplama işleminde ergitilen plastik malzemenin şekillendirildikten sonra tekrar soğutulması gerekmektedir. Bu amaçla oluşturulan soğutma sistemi, soğutma işleminin kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Ergiyik plastiğin kalıp içerisine dolması ile kalıp sıcaklığı sürekli olarak yükselir. Kalıp sıcaklığının yüksekliği plastik malzemenin soğuyarak katılaşması için gereken süreyi önemli ölçüde artıracaktır. Kalıp sıcaklığının soğuk olması durumunda ise ergiyik plastik malzemenin kalıp içine dolumu sırasında soğuyarak katılaşacak ve kalıp boşluğunun tamamen dolmamasına neden olacaktır. İstenmeyen bu durum plastik ürünün eksik olması anlamına gelmektedir. Ergiyik plastiğin donmadan kalıbın tamamını doldurması için kalıp sıcaklığının belirli bir değerde olması gerekmektedir. Yaygın kullanılan bazı plastik malzemeler için uygun kalıp sıcaklıkları Tablo 1'de gösterilmiştir. Plastik malzeme camsı geçiş sıcaklığının altında yeterince katılaşır ve şeklini koruyabilir.

Kalıp boşluğundaki plastik malzemenin sıcaklığının camsı geçiş sıcaklığının altına inmesi plastik ürünün kalıptan çıkarılabilmesi için gereklidir. Ancak plastik parça kalıptan çıkarıldıktan sonra da soğumaya devam eder. Bu esnada parça soğumanın etkisiyle çekerek küçülecektir. Herhangi bir mekanik etki ya da dengesiz çekme nedeniyle parça geometrisinin bozulmaması için uygun bir çıkarma sıcaklığı belirlenmelidir. Tablo 1'de yaygın kullanılan bazı plastikler için uygun çıkarma sıcaklıkları görülmektedir.

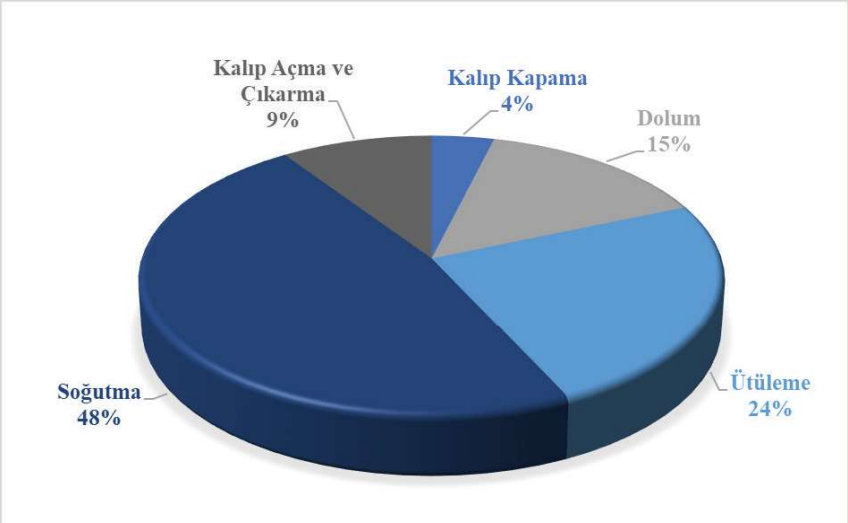
Tablo 1. Bazı Plastikler için Uygun Kalıp ve Çıkarma Sıcaklıkları (Menges vd., 2013)

Plastik Malzeme	Kalıp Sıcaklığı (℃)	Çıkarma Sıcaklığı (℃)
ABS	50-80	60-100
PP	20-100	60-100
POM	40-120	90-150
LDPE	20-60	50-90
HDPE	40-60	60-110
PVC-Yumuşak	20-55	60-100
PVC-Sert	20-70	60-100
PS	10-80	60-100
PA6	60-95	70-110
PA66	60-90	80-140
PMMA	10-80	70-110
PC	85-120	90-140

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi çevrimler halinde sürekli olarak tekrar eder. Kalıbın kapanması, ergiyik malzemenin kalıp boşluğunu doldurması, basınç altında tutma, plastiğin soğuması, kalıbın açılması ve parçanın kalıptan çıkarılması bir çevrim boyunca gerçekleştirilen işlemlerdir. Birim parça adedi için gerekli üretim süresi çevrim süresi ile belirlenir. Üretim hızını belirleyen en önemli parametre çevrim süresidir (Dimla vd., 2005). Şekil 4'de bir çevrim süresindeki zaman aralıkları gösterilmiştir. Çevrim süresini etkileyen en büyük etken soğutma süresi olduğu görülmektedir. Soğutma sisteminin performansı bu sürenin kısalmasını sağlamaktadır.

Plastik enjeksiyon kalıplamada bir çevrim süresi içinde en fazla zaman alan safha, soğutma işlemidir (Dimla vd., 2005). Kalıp içindeki ergiyik plastiğin katılaşması için soğutmaya ihtiyaç duyulur. Soğutma işlemi ise kalıp üzerinde bulunan soğutma sistemi ile kontrollü ve hızlı bir şekilde yapılır. Soğutma süresi, üretim hızını doğrudan etkilediği için bu işlemin mümkün olduğunca kısa sürede gerçekleşmesi istenir. Soğutma

işlemi, çevrim süresini etkilediği gibi plastik ürünün kalitesini de önemli ölçüde etkiler. Plastik malzeme soğurken parça üzerinde oluşacak çarpılmalar, parça için beklenen boyutsal ve geometrik toleransların aşılmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle plastik enjeksiyon kalıpları üzerinde bulunan soğutma sistemlerinden kısa sürede soğutabilme yeteneğinin yanında kaliteli soğutmanın gerçekleştirebilmesi de istenmektedir.



Şekil 4. Çevrim Süresinde İşlemlerin Zaman Aralıkları (Dimla vd., 2005)

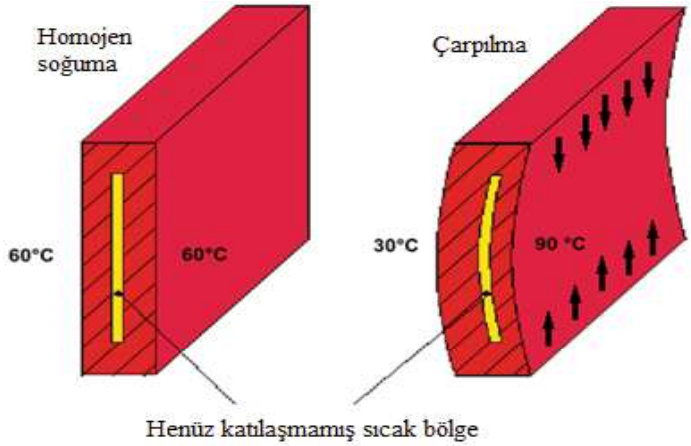
Plastik enjeksiyon kalıplarının hızlı ve kontrollü bir şekilde soğutulabilmesi için kalıp plakalarına matkap ile delmek suretiyle açılan soğutma kanallarından soğuk su akışı gerçekleştirilmektedir. Bu sayede ergiyik plastik üzerindeki ısı kalıba aktarılmaktadır. Kalıp üzerindeki ısı ise soğutma suyu ile uzaklaştırılmaktadır.

Plastik enjeksiyon kalıplarına soğutma kanalları açılırken kanalların kalıp boşluklarına yakın olan bölgeler tercih edilir. Ancak doğrusal hatlara sahip olmayan, karmaşık formlu plastik ürünler kalıplanmak istendiğinde doğrusal soğutma kanalları kalıp boşluklarına uyumlu olacak şekilde yanaşamamaktadır. Soğutma kanalları bazı bölgelerde kalıp boşluğuna yaklaşırken bazı bölgelerde ise uzaklaşmaktadır. Bunun sonucu olarak ergiyik plastik malzemenin bazı bölgeleri daha erken soğuyup katılaşırken diğer bölgeler daha geç katılaşmaktadır. Plastik parça

üzerindeki farklı katılaşma bölgelerinde farklı çekme oranlarından dolayı plastik parçalar çapılmaya maruz kalmaktadır. Bu durum ise plastik parça kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir.

Plastik enjeksiyon kalıplamada soğutma süresinin kısa olmasının önemi yanında plastik ürün kalitesi açısından düzgün bir sıcaklık dağılımının da sağlanması kritik öneme sahiptir. Isınarak ergiyik hale gelen plastik malzeme genleşir. Kalıp içine basılan malzeme soğurken tekrar büzülerek çekmeye başlar. Plastik malzemenin çekme oranlarına etki eden çok sayıda parametre vardır. Bunlar; malzeme cinsi, ergiyik sıcaklığı, basınç dağılımı, moleküler yönlenme, kristalleşme oranı, nem, katkı maddeleri ve soğutma hızıdır.

Soğuma ile birlikte plastik parça üzerindeki çekme dağılımının düzensiz olması parça geometrisinin bozulmasına neden olmaktadır. Polimer zincirlerinin kontrolsüz yönlenmesi, basınç ve sıcaklık dağılımının homojen olmaması parça üzerindeki çekmenin de düzgün dağılmasına engel olur. Kalıp üzerindeki soğutma sisteminden beklenen bir özellikte parçanın tüm bölgelerinin eşit hızda soğutulmasını sağlamasıdır. Aksi halde erken soğuyan bölgelerdeki çekme işlemi sona ermişken sıcak bölgeler çekmeye devam eder plastik parça çarpılır. Şekil 5'de farklı sıcaklık dağılımı nedeniyle plastik parça üzerindeki çarpılmanın oluşumu görülmektedir (Mayer, 2005).



Şekil 5. Yüzey Sıcaklık Farkı Nedeniyle Çarpılmanın Oluşumu (Mayer, 2005)

Plastik enjeksiyon kalıplama işleminin seri olarak yapılabilmesi ve plastik parça kalitesinin sağlanabilmesi için uygun bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulur. Soğutma sisteminin tasarımında kanal boyutları, kanalların konumu, soğutma suyu sıcaklığı ve debisi, soğutma üniteleri ve sıcaklık düzenleyiciler önemli rol oynamaktadır. Etkili bir soğutma sistemi için tasarım parametreleri uygun bir şekilde seçilmelidir.

Kalıp boşluğuna dolan ergiyik plastiğin daha eş sıcaklık dağılımı ile soğutulabilmesi için plastik parçanın geometrisine uyumlu soğutma kanallarına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil uyumlu soğutma kanalları plastik malzemenin daha düzgün ve hızlı soğutulabilmesini sağlamaktadır. Bunun yanında karmaşık formlu soğutma kanallarına sahip kalıpların nasıl üretileceği ise kalıp üreticileri için çözülmesi gereken bir problem haline gelmektedir. Ayrıca karmaşık formlu soğutma kanallarının nasıl tasarlanacağı da açıklığa kavuşturulması gereken ayrı bir sorunu teşkil etmektedir.

KALIPTA SICAKLIK KONTROLÜ

Plastik enjeksiyon kalıbı ergiyik plastiğin kalıba dolması ve soğutma suyunun kalıpta dolaşarak uzaklaşması ile bir ısı değiştiricisi gibi çalışmaktadır. Plastik malzeme üzerindeki ısı suya aktarılarak kalıptan uzaklaştırılmaktadır. Kalıp üzerindeki sıcaklığın kontrol edilerek enjeksiyon kalıplama sürecinin kaliteli ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Kalıpta sıcaklık kontrolü ile ısı iletimi verimliliği artışı, çevrim süresinin kısalması, kalıp gözleri arasındaki farklılıkların önlenmesi, homojen kalıp sıcaklık dağılımı ve çarpılma etkilerinin azaltılması gibi amaçlar hedeflenmektedir.

Kalıpta Isı Transferi

Plastik enjeksiyon kalıplamada sabit kalınlıklı ve kabuk formlu parçaların üretimi yapıldığı için kalıplama esnasında plastik malzeme üzerindeki ısının soğutma suyuna aktarımı tek boyutlu ısı iletim denklemi ile ifade edilebilir (Eşitlik 1). "$\dot{Q}_{iletim}$" ısı akısını gösterir ve plastik malzemeden suya geçen ısı akıdır. "k" kalıp çeliğinin ısıl iletkenliğini gösterir. "ΔT" plastik malzeme ile soğutma suyunun sıcaklık farkıdır. "Δx"

soğutma kanalı ile kalıp boşluğu arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. " *A* " birim alanı göstermektedir. Yüzey alanı plastik parçanın geometrisi ile ilgilidir. Yüzey alanına müdahale etmek mümkün olmadığı için bu parametre sabit bir etkiye sahiptir.

$$\dot{Q}_{iletim} = k.A\frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Soğutma işleminin etkinliğini arttırmak için ısı akısının arttırılması hedeflenmektedir. Isıl iletkenlik kullanılacak kalıp malzemesine göre değişiklik göstermektedir. Tablo 2'de bazı kalıp malzemelerinin ısıl iletkenlikleri gösterilmektedir. Kalıp malzemesinin ısıl iletkenliği ne kadar iyi olursa kalıptaki ısı transferi iyileşecek ve kalıp üzerindeki sıcaklık farkı azalacaktır. Çevrim toplam süresi düşerken daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilecektir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre P-20 çelik yerine C18000 kullanılarak üretilen kalıpla yapılan baskılarda çevrim süresi %34 oranında kısalmıştır (Raus vd., 2017).

Tablo 2. Kalıp Malzemelerinin Isıl İletkenlikleri (Raus vd., 2017)

Malzeme	Isıl İletkenlik (W/mK)
DIN 1.2311 (P-20)	35
DIN 1.1738	33
DIN 1.0503	46
C18000-BeCu	225
Saf Bakır	401

Soğutma kanallarının iç yüzeyinde zamanla oluşabilecek kireçlenme vb. durumlar sebebiyle kalıbın ısıl iletkenliği düşebilmektedir. Bu da çevrim süresini önemli oranda artmasına neden olabilmektedir. Kireçsiz soğutma suyunun kullanımı ile benzeri olumsuzluklar için tedbir alınmalıdır.

Soğutma Süresi Hesabı

Bir plastik parçanın çıkarma sıcaklığına ulaşabilmesi gerekli minimum soğutma süresi Eşitlik 2 ile hesaplanabilir (Rao ve Schumacher, 2004). Bu hesaplama yönteminde kalıp yüzeyinin sıcaklığı sabit kabul

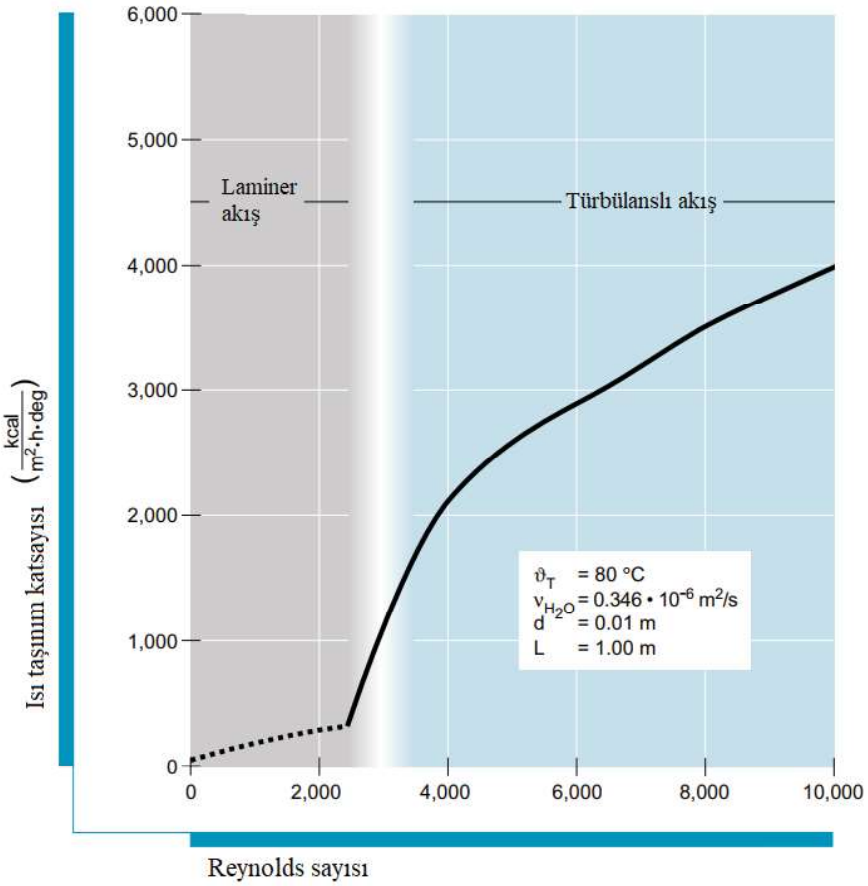
edilmiş olsa da gerçekte ergiyik malzeme kalıp sıcaklığının yükselmesine neden olur. Bu da gerçek soğutma süresinin daha uzun olacağını göstermektedir. Daha doğru bir sonuç için ısı taşınım katsayısı dikkate alınmalıdır (Yu ve Sunderland, 1992).

$$t_s = \frac{h^2}{\pi^2 \alpha} ln\left(\frac{4}{\pi}\frac{T_{ergiyik} - T_{su}}{T_{çıkarma} - T_{su}}\right) \quad (2)$$

Eşitlik 2'de *h*, plastik parça kalınlığını göstermektedir. Zamanı hesaplanacak sıcaklık, plastik ürünün kalıptan çıkarılması için uygun olan çıkarma sıcaklığıdır. Bu sıcaklıkta plastik malzeme kendi şeklini koruyabilecek seviyede katılaşmıştır. Çıkarma sıcaklığı her plastik malzeme için özel olup ASTM D648 standart testlerinden ısıl eğilme sıcaklığı ve yük altında eğilme sıcaklığı testlerinin yapılması ile tespit edilebilir. Soğutma süresi parça et kalınlığının karesi ile doğru orantılıdır. Plastik endüstrisinde soğutma süresinin pratik olarak hesaplanması için Eşitlik 3'te gösterilen denklem kullanılabilir (Kazmer, 2007).

$$t_s = 2{,}08h^2 \quad (3)$$

Kalıp ve soğutma suyu arasındaki ısı taşınımının iyileştirilmesi için soğutma kanallarından uygun debide akışkanın geçmesi gerekmektedir. Şekil 6'da ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi görülmektedir. Soğutma kanalı içindeki akışkan hızının artması ile akış türbülanslı hale geçmiştir. Reynolds sayısının yaklaşık olarak 2400 seviyesinin üzerine çıkması ile çalkantılı akış başlamış ve ısı taşınım katsayısını artırmıştır. Kalıbın soğutulmasında ısı aktarımının iyileştirilmesi için soğutma kanalı içinde türbülanslı akışın sağlanacağı uygun hız için yeterli debi sağlanmalıdır. Türbülanslı akışın sağlanabilmesi için gerekli debiler Tablo 3'te gösterilmiştir. Ayrıca soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklık farkı 2-3°C'yigeçmemesi için debi ayarlanmalı ya da soğutma kanalları paralel hale getirilmelidir.



Şekil 6. Isı Taşınım Katsayısının Reynolds Sayısı ile İlişkisi[5]

Tablo 3. Türbülanslı Akış için Gerekli Minimum Debi Değerleri (Litre/Dakika)

Su Sıcaklığı, °C	Boru Çapı, mm				
	8	10	15	20	25
10	1,96	2,45	3,68	4,9	6,13
15	1,71	2,14	3,21	4,29	5,36

5 Engineering Polymers, Part and Mold Design, Thermoplatics, A Design Guide, Bayer Corporation. 2000

20	1,51	1,89	2,83	3,78	4,72
25	1,34	1,68	2,52	3,36	4,2
30	1,2	1,5	2,26	3,01	3,76
35	1,08	1,36	2,03	2,71	3,39
40	0,98	1,23	1,84	2,46	3,07
45	0,9	1,12	1,68	2,24	2,8
55	0,76	0,94	1,42	1,89	2,36
65	0,65	0,81	1,22	1,62	2,03
80	0,53	0,66	0,99	1,32	1,66
95	0,44	0,56	0,83	1,11	1,39

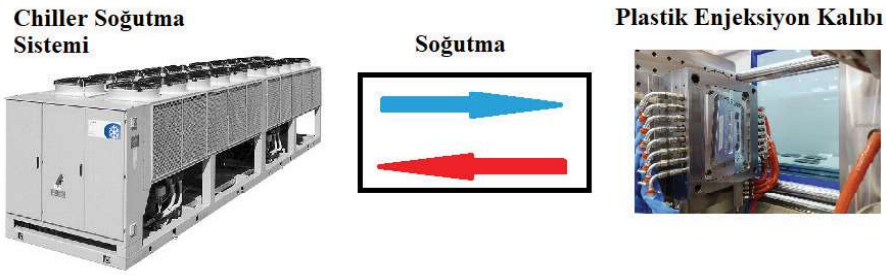
Soğutma Sistemi Elemanları

Kalıp içerisine dolan sıcak ergiyik malzemenin kontrollü bir şekilde soğutulabilmesi için soğutma sistemi kullanılır. Soğutma sistemi; kalıp içerisindeki soğutma kanalları, kalıp dışına uzanan bağlantı girişleri, chiller ve kalıp şartlandırıcısından oluşur. Soğutma sistemi kalıp içerisindeki soğutma kanallarından soğuk su dolaşması sağlanarak kalıp üzerindeki ısının uzaklaştırılmasını sağlar. Bu sayede hem plastik parçanın soğuma süresi kısalır hem de dengeli bir soğutma gerçekleştirilir. Üretim hızı ve parça kalitesi için soğutma sistemi büyük bir öneme sahiptir.

Plastik enjeksiyon kalıplamada soğutma işlemi kalıp içerisindeki soğutma kanallarından uygun sıcaklıktaki suyun dolaştırılarak kalıp sıcaklığının düzenlenmesi şeklinde yapılmaktadır. Bu sistem kapalı bir su devresi şeklinde çalışmaktadır. Soğutma işleminin gerçekleştirilmesi için gerekli olan soğutma sistemi elemanları; su soğutma ünitesi (chiller), harici sıcaklık kontrol ünitesi (kalıp şartlandırıcı), rakor ve hortumlar, soğutma kanalları ve sudur.

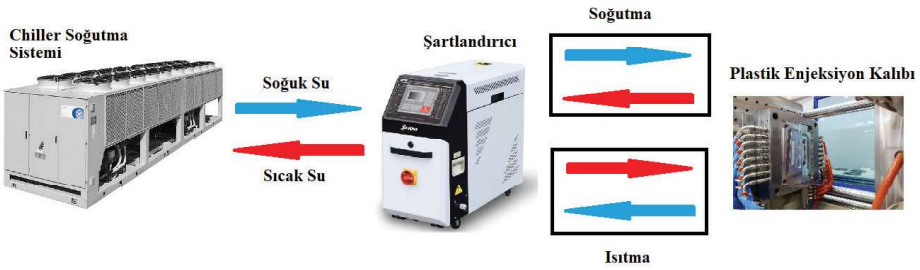
Kalıp soğutulurken kalıp üzerindeki ısı soğutma kanallarında dolaşan suya aktarılır. Soğutma veriminin düşmemesi için su tekrar kalıp içerisine gönderilmeden önce tekrar uygun sıcaklığa getirilmelidir. Soğutma suyu üzerindeki fazla ısının atılarak tekrar çalışma sıcaklığına

getirilmesi için chiller adı verilen su soğutma ünitesi kullanılır (Amran vd., 2014).



Şekil 7. Chiller Soğutma Ünitesi ve Kalıp Soğutma

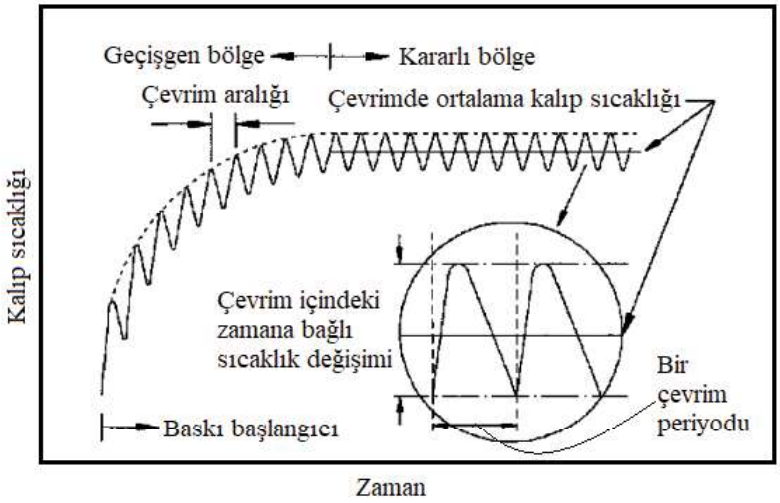
Kalıbın uygun sıcaklıkta tutulması, soğutma suyu sıcaklığının ve debisinin kontrol edilmesi için kalıp şartlandırıcı adı verilen harici bir sıcaklık kontrol ünitesi kullanılır. Şartlandırıcı kalıp ve su sıcaklığını sürekli olarak ölçmektedir. Suyun çalışma sıcaklığının düşük olması durumunda suyu ısıtarak uygun çalışma sıcaklığına yükseltir. Su sıcaklığının gerekenden daha yüksek olması durumunda chiller ünitesini devreye alarak su sıcaklığının soğutulmasını sağlar. Bu sayede kalıp içerisine giren suyun sıcaklığı sabit kalmış olur.



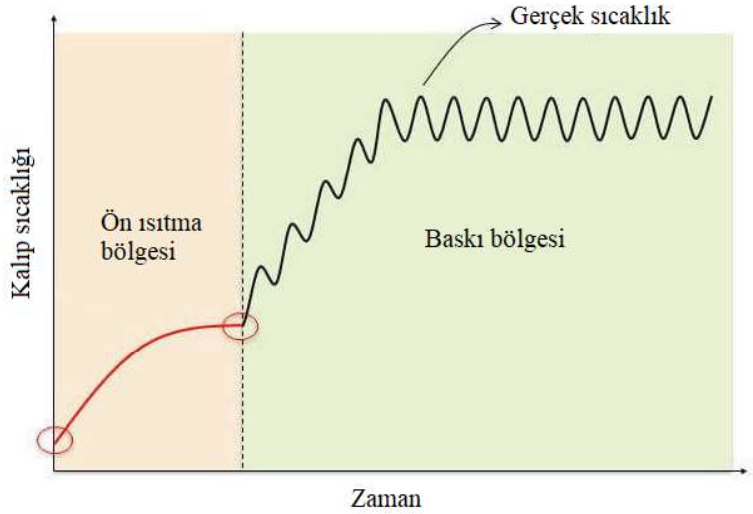
Şekil 8. Kalıp Şartlandırıcı ile Kalıbın Isıtılması ve Soğutulması

Şekil 9'de kalıp sıcaklığının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Kalıp sıcaklığı dalgalanmalar halinde yükselerek belirli bir süre sonra kararlı hale gelmektedir. Plastik enjeksiyon kalıplamada kalıp sıcaklığı dengeye gelene kadar bir miktar ön baskı yapılmalıdır. Dengelenme öncesi yapılan baskılar uygun şartlarda gerçekleşmediği için plastik ürünler hatalı olarak üretilir. Bu kayıplar başlangıç maliyetlerinin artmasına

neden olur. Kalıp şartlandırıcı kullanımıyla kalıpta ön ısıtma yapılarak çok daha düşük sayıdaki baskı adedi ile kalıp sıcaklığında dengelenme sağlanır (Şekil 10).



Şekil 9. Kalıp Sıcaklığın Zamanla Değişimi (Zhou ve Li, 2005)

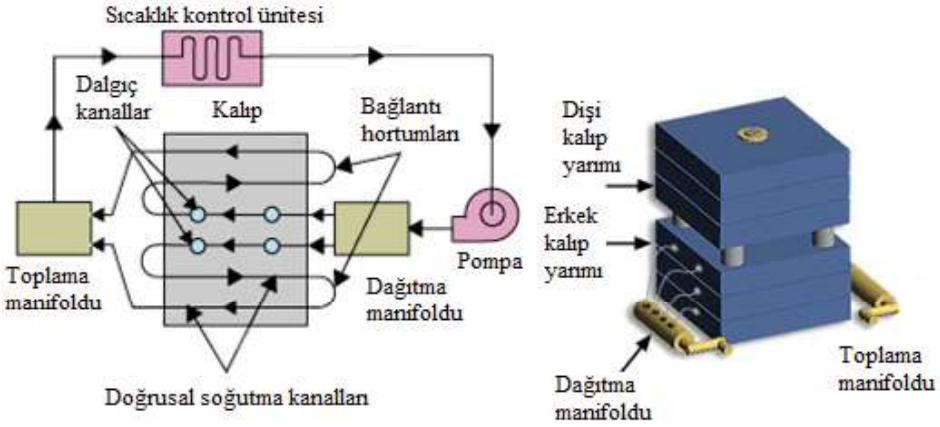


Şekil 10. Kalıp Şartlandırıcı ile Yapılan Ön Isıtma[6]

6 Moldex3D Provides Mold Preheat Analysis to Enhance Mold Temperature Management. 2015

Soğutma Kanallarının Tasarımı

Plastik enjeksiyon kalıplarının soğutulması işlemi, kalıp boşluğu çevresinden geçen kanallardan soğuk su geçirilerek kalıp üzerindeki ısının uzaklaştırılması yolu ile yapılmaktadır (Şekil 11). Soğutma kanalları genellikle matkap ile delerek oluşturulduğu için dairesel bir kesite sahiptir. Kanal çapı, kanalın kalıp boşluğuna uzaklığı ve kanalların birbirine uzaklıkları belirlenirken kalıplanan plastik parçanın cidar kalınlığı dikkate alınmaktadır (Tang vd., 1997). Tablo 4'te parça kalınlığına bağlı soğutma kanalı boyutları gösterilmiştir.

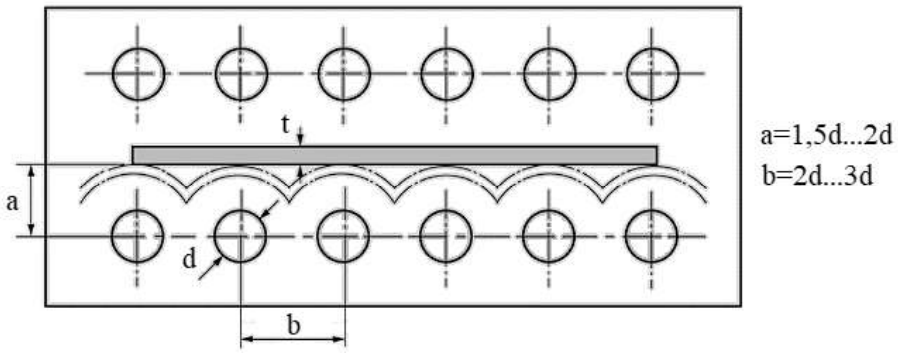


Şekil 11. Plastik Enjeksiyon Kalıplamada Soğutma Sistemi (Göktaş, 2021)

Tablo 4. Parça Cidar Kalınlığına Göre Soğutma Kanalı Boyutları (Güneş, 2005)

Cidar Kalınlığı, mm	Kanal Çapı, mm
0-2	8-10
2-4	10-12
4-6	12-15

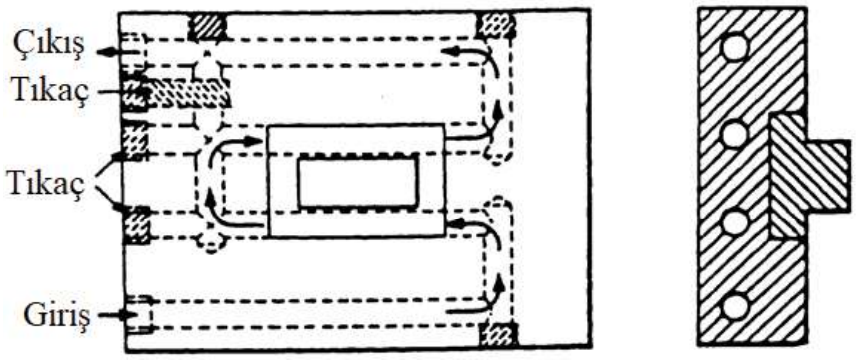
Kalıp boşluğu yüzeyinde düzgün bir sıcaklık dağılımının elde edilebilmesi için Şekil 12'da belirtildiği gibi soğutma kanallarının kalıp boşluğuna olan uzaklığı kanal çapının 1,5-2 katı ve kanalların birbirlerine olan uzaklıkları kanal çapının 2-3 katı olacak şekilde seçilmelidir (Mayer, 2005).



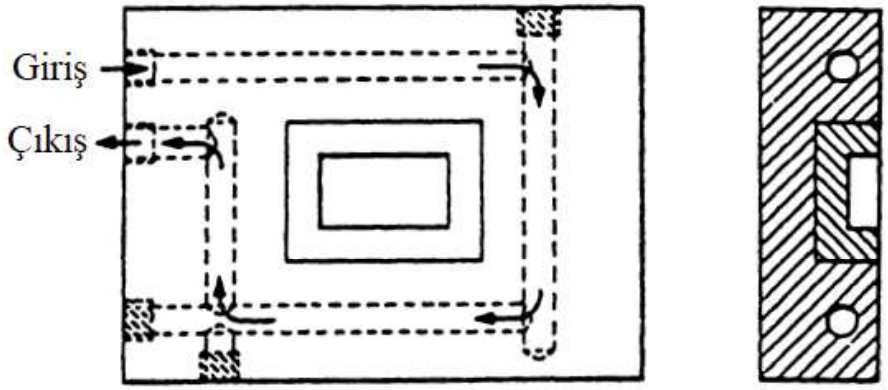
Şekil 12. Soğutma Kanallarının Konumları
(a: Kanal-Kalıp Arası Mesafe, a: Kanallar Arası Mesafe)

Kalıp Parçalarının Soğutulması

Kalıp plakalarının soğutulması için yaygın olarak kullanılan yöntem kalıp plakalarının kapalı bir su devresi oluşturacak şekilde matkap delinmesidir. Bu yöntem ucuz ve pratik olduğu için tercih edilir. Delerek oluşturulan kanallar kalıp boşluğunun çevresinden dolaşmaktadır. Delme işleminden sonra gerekli olmayan delik çıkışları tıkaçlar vasıtası ile kapatılır. Dişi ve erkek kalıp yarımlarında ayrı ayrı soğutma devreleri oluşturulur. Şekil 13 ve Şekil 14'de dişi ve erkek kalıp yarımlarının soğutma kanalları gösterilmiştir (Turaçlı, 2000).



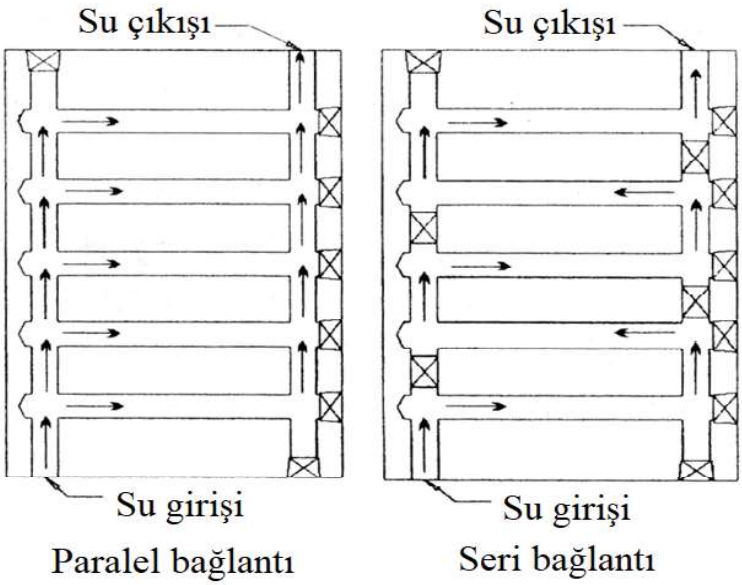
Şekil 13. Erkek kalıp plakasının soğutulması (Turaçlı, 2000).



Şekil 14. Dişi kalıp plakasının soğutulması (Turaçlı, 2000).

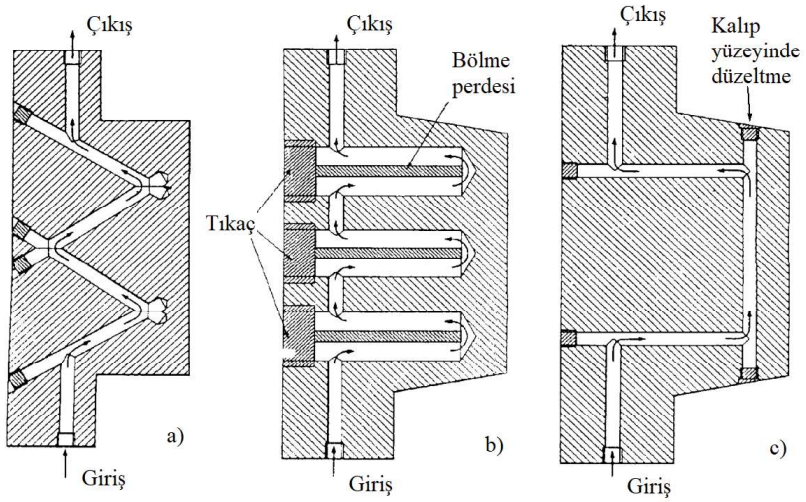
Düzlemsel kalıp plakalarının soğutulmasında kullanılan soğutma kanallarının iki tip bağlantı yöntemi söz konusudur (Şekil 15). Seri bağlantıda tek girişten giren su çıkışa kadar tek akış yolunu takip etmektedir. Seri bağlantı tipinde tek akış hattı olduğu için soğutma kanalının tüm bölgelerinde eşit debi sağlanabileceğinden akış hızı kolaylıkla kontrol edilebilir. Buna karşın bağlantı tipinde toplam akış yolunun uzaması nedeniyle basınç kayıpları artmaktadır. Ayrıca soğutma suyu nispeten daha uzun bir yol boyunca dolaşırken ısınmasından dolayı giriş ve çıkış sıcaklıklarının farklı olmasına neden olacaktır. Bu durumun düzgün sıcaklık dağılımını olumsu etkileyecektir.

Paralel bağlantı tipinde tek girişten giren su, kanallar içerisinde birden fazla akış dallarına ayrılmaktadır. Paralel bağlantı tipinde akış boyunca basınç kayıpları daha düşüktür. Farklı akış dallarından geçen suyun sıcaklığı giriş sıcaklığından çok farklı olmasa da soğutma suyu en düşük akış direncini bulunduğu yolu tercih edeceğinden tüm akış dallarındaki debi ve hızların kontrol edilmesi zordur.



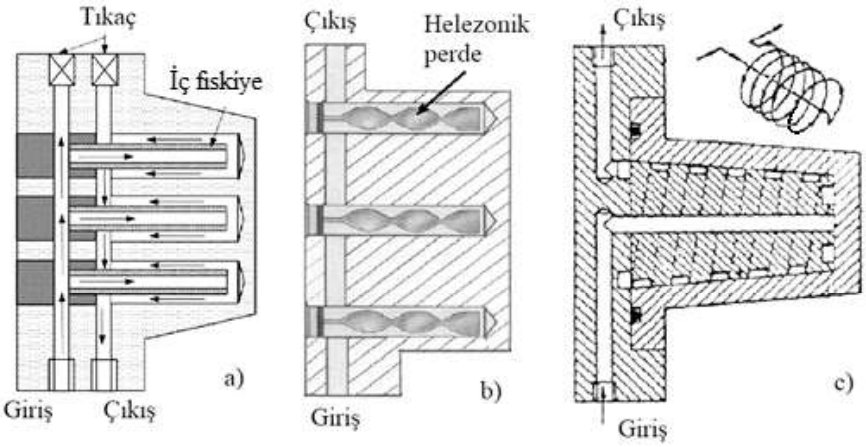
Şekil 15. Seri ve Paralel Bağlantı Tipleri

Erkek çekirdek maçaların iç bölgelerine doğru uzanan soğutma kanalları ile soğutma verimliliği artırılmaktadır. Şekil 16'de erkek çekirdeklerin soğutulması için tasarlanan soğutma kanalları görülmektedir. Şekil 16 (a)'da açılı delikler ile kalıp çekirdeğinin içine doğru uzanan kanallar oluşturulmuştur. Bu kanal tipinde soğutulması gereken yüzeylere yeterince yaklaşılamadığı görülmektedir. Şekil 16 (b)'de oluşturulan kanal tasarımında çekirdek içine doğru uzanan delik içerisine bir bölme perdesi yerleştirilerek gidiş dönüş hatları oluşturulmuştur. Bu tasarım tipinde soğutma yüzeylerine daha iyi yaklaşılmış ancak oluşan akış bölmelerinde hızların kontrolü zordur. Şekil 16 (c)'de ise kalıp boşluğu yüzeyinden delme işlemi uygulanmıştır. Bu yöntemin kalıp yüzeyinde ek bir düzeltme işlemi gerektirme bir dezavantaj olarak ön plana çıkmaktadır.



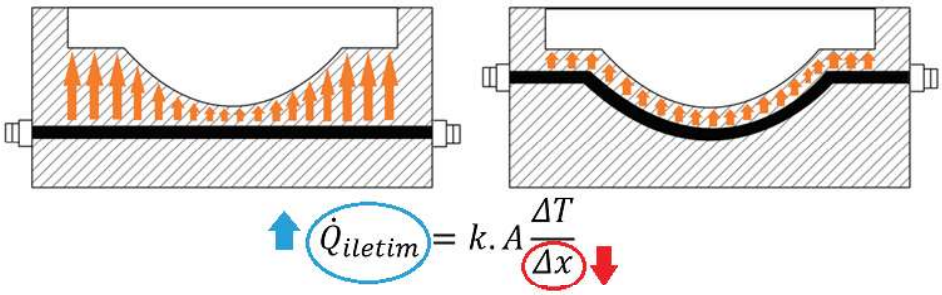
Şekil 16. a) Açılı Delinmiş Kanallar, b) Bölmeli (Baffle) Kanal, c) Kalıp Yüzeyinden Delinen Kanal

Şekil 17'da erkek kalıp çekirdeklerinin soğutulması amacıyla tasarlanmış üç farklı yöntem görülmektedir. Şekil 17 (a)'da kalıp çekirdeğine açılan delik içine bir fıskiye yerleştirilmiştir. Fıskiye içerisinden gelen soğutma suyu fıskiye çevresinden tekrar geri dönmektedir. Bu yöntemin tasarımında fıskiye borusunun iç kesit alanı ile dış kesit alanı eşit olacak şekilde boyutlandırılır. Fıskiyeli tasarımda tüm kesit bölgelerinde akışkan hızını kontrol etmenin zorluğu yanında yer çekiminin etkisi ile bazı bölgelerde hava boşluğu kalma ihtimali bulunmaktadır. Şekil 17 (b)'de soğutma deliği helezonik bir perde ile bölünerek gidiş dönüş hatları oluşturulmuştur. Akış yolunun uzaması nedeniyle düz perdeye nispeten daha iyi soğuma sağlar. Şekil 17 (c) kalıp çekirdeğine üzerinde helis bir kanal bulunan lokma yerleştirilmiştir. Soğutulacak yüzeye daha uyumlu ve sabit akış kesitine sahip bir soğutma hattı oluşturulmuştur. Bu kanal tipinde tüm akış yolu boyunca hızların kontrol edilmesi daha kolaydır.



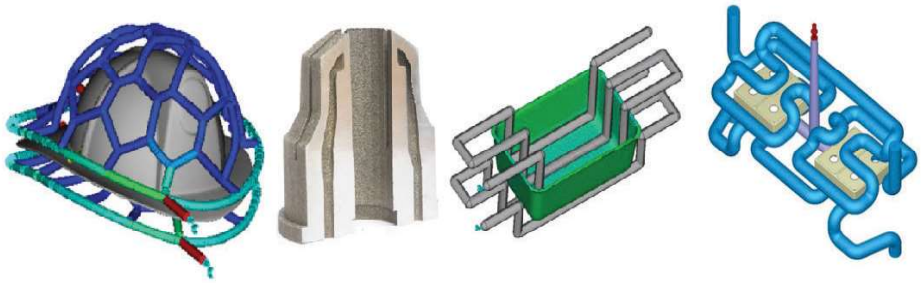
Şekil 17. a) İç Fıskiyeli (Bubbler) Kanal, b) Helezonik Bölmeli (Baffle) Kanal, c) Lokmalı Helis Kanal

Geleneksel olarak kullanılan doğrusal soğutma kanalları, doğrusal kalıp boşluğu yüzeyleri için uygun olsa da eğimli yüzeylere sahip kalıp boşluğu yüzeylerinin dengeli soğutulması tam olarak sağlayamamaktadır. Kalıp boşluğu ile soğutma kanalı arasındaki mesafenin bölgelere göre değişiyor olması ısı aktarımının da farklı bölgelerde farklı olmasına neden olmaktadır (Şekil 18). Eşit yüzey alanına rağmen ortalama iletim mesafesinin daha kısa olması soğutma süresini kısaltmıştır. Soğutma veriminin artırılması için soğutma kanallarının kalıp boşluğu yüzeyini uyumlu olarak takip ettiği şekil uyumlu soğutma kanalları tercih edilen bir başka kanal tipidir.



Şekil 18. a) Doğrusal Soğutma Kanalı, b) Şekil uyumlu Soğutma Kanalı

Şekil uyumlu soğutma kanalları ile kalıp boşluğu arasındaki mesafe düzgün bir şekilde korunduğu için tüm bölgelerdeki ısı aktarımı eşit olmakta ve kalıp yüzeyinde daha düzgün bir sıcaklık dağılımı elde edilebilmektedir. Gelişen imalat teknolojileri sayesinde karmaşık formlu parçalar için şekil uyumlu soğutma kanallarının üretimi mümkündür. Şekil 19'de şekil uyumlu soğutma kanalları ile yapılmış çeşit uygulama örnekleri görülmektedir.

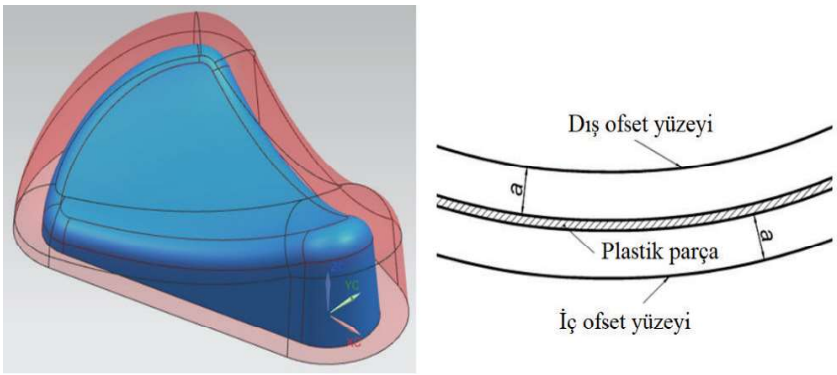


Şekil 19. Şekil Uyumlu Soğutma Uygulamaları [Khan vd., 2014, Park vd., 2020, Wang vd., 2011, Kitayama vd., 2018]

Şekil Uyumlu Soğutma Kanallarının Tasarımı

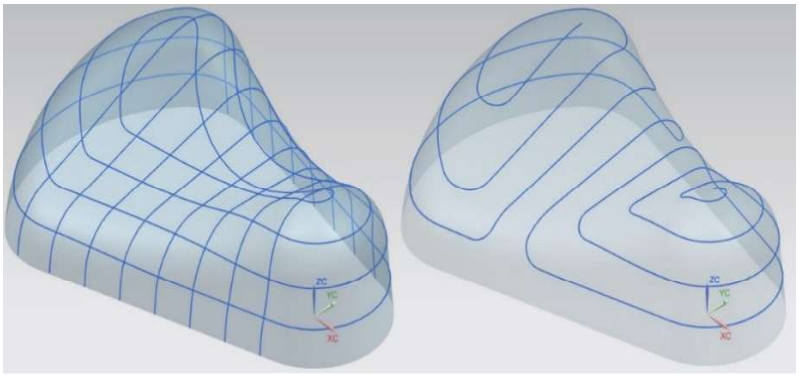
Plastik enjeksiyon kalıplamada kalıbın, eş sıcaklık dağılımı ve etkin bir şekilde soğutulabilmesi için soğutma kanallarının kalıp içerisinde en uygun biçimde konumlandırılması kritik öneme sahiptir. Soğutma kanallarının kalıp boşluğuna uzaklığı, ergiyik plastik malzeme üzerindeki ısının soğutma suyuna transfer hızı üzerinde önemli bir role sahiptir. Plastik parçanın tüm bölgelerinde eşit bir soğutma hızının sağlanabilmesi soğutma kanalı ile kalıp boşluğu arasındaki mesafenin sürekli olarak sabit tutulmasına bağlıdır. Soğutulmak istenen geometrinin şekline uygun bir soğutma sistemi ile yapılan soğutma şekil uyumlu soğutma olarak anılmaktadır. Şekil uyumlu soğutma kanallarında kanal kalıp boşluğu arası mesafenin sabit bir değerde tutulması gibi soğutma kanallarının birbirlerine olan mesafenin de sabit olarak korunması gerekmektedir. Soğutma kanallarının birbirlerine yaklaştığı bölgelerde soğuma hızlanırken kanallar arası mesafenin açılması o bölgedeki soğuma hızını düşürecektir. Bu sayede plastik parçanın tüm bölgelerini eşit sıklıkta saran soğutma kanalları oluşturulabilir.

Soğutma kanallarının kalıp boşluğuna sabit bir uzaklıktaki konumda yer alması için plastik parçanın hem iç hem de dış yüzeyleri belirlenen mesafe kadar ofsetlenmiştir. İki ayrı ofset yüzeyi oluşturulmuştur (Şekil 20). Şekil uyumlu soğutma kanalının merkezi bu yüzeyler üzerinde yer almaktadır.



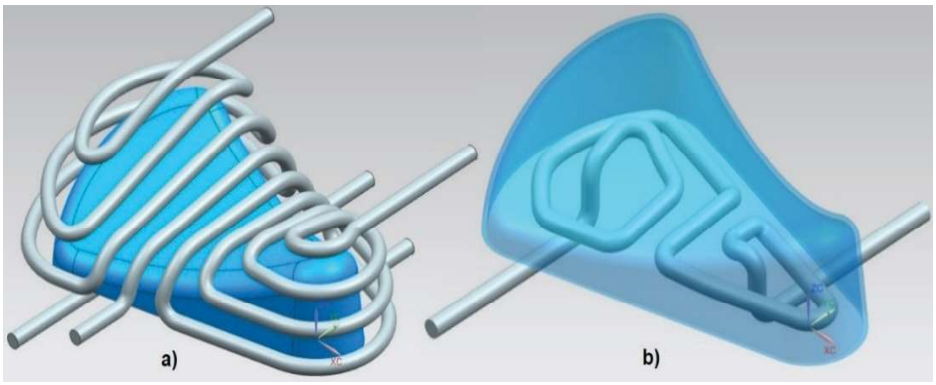
Şekil 20. Ofsetlenerek Elde Edilen Referans Yüzeyler (Göktaş vd., 2016)

Ara kesit eğrilerinin tek bir devre oluşturacak şekilde birleştirilebilmesi için bağlantı eğrileri oluşturulur. Kullanıcı tarafından soğutma kanalının başlangıç noktası belirlenir. Bağlantı eğrileri arakesit eğrilerini çember yarıçapı aralığında bölen eğrilerdir. Elde edilmek istenen soğutma hattının şekline göre eğriler budanır ve birleşim köşeleri yuvarlatılır (Şekil 21).



Şekil 21. Bağlantı Eğrilerinin Eklenmesi, Kırpma ve Yuvarlatma (Göktaş vd., 2016)

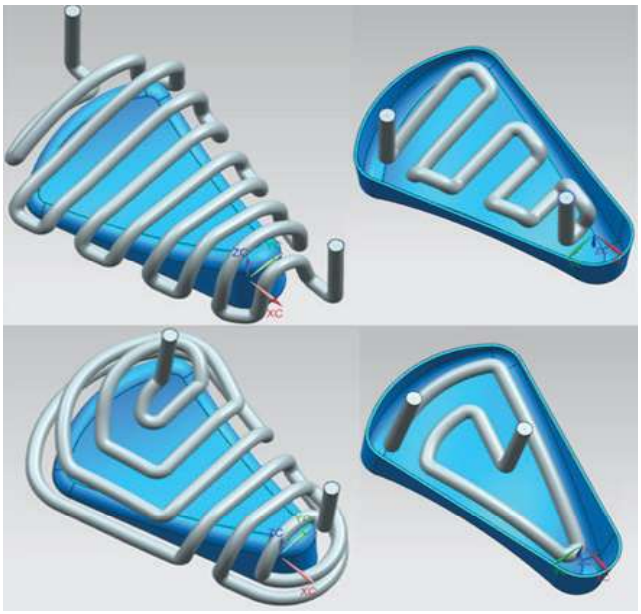
Elde edilen hatlara bağlantı uzantıları eklenerek kanal kesit profili soğutma hattı boyunca süpürülerek soğutma kanalına dönüştürülür (Şekil 22). Böylece kalıp boşluğunu sabit bir uzaklıkta, uyumlu bir şekilde takip eden soğutma kanalları elde edilmiş olur. Kalıbın her iki yarımı için aynı metot kullanılarak şekil uyumlu soğutma kanalları tasarlanabilir. Soğutma kanalının uzunluğuna göre gerekli yerlerde kanallar bölünerek soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında oluşabilecek yüksek farklar giderilebilir.



Şekil 22. a) Dişi ve b) Erkek kalıp yarımında soğutma kanallarının elde edilmesi (Göktaş vd., 2016)

Geliştirilen tasarım yöntemi ile spiral, zikzak ve paralel akış stratejilerine sahip şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarlanması mümkündür. Şekil 23'de spiral ve zikzak soğutma kanalları görülmektedir.

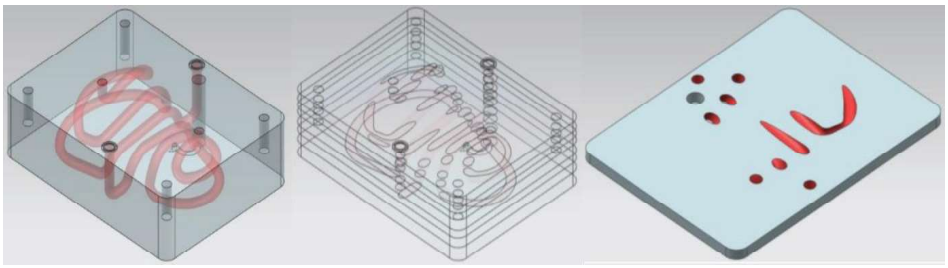
Plastik enjeksiyon kalıplarında soğutma kanallarının oluşturulması için en yaygın ve sit yöntem kalıp plakalarının matkapla delinerek tıkaçlarla kaplı bir akış devresi oluşturulması yöntemidir. Şekil uyumlu soğutma kanallarının üretiminde ise bu yöntem kullanılamamaktadır. Eklemeli imalat tekniklerini gelişmesi ile birlikte şekil uyumlu soğutma kanallarının üretimi mümkün hale gelmeye başlamıştır. Özellikle SLS (Selective Laser Sintering) yöntemi ile içinde şekil uyumlu kanallar bulunan kalıp çekirdekleri üretilmektedir. Yöntemin sağladığı bu avantaj yanında kalıp malzemesinin yeterli kalıp ömrünü sağlama konusunda istenen mekanik dayanımları henüz sağlayamamaktadır.



Şekil 23. Zikzak ve Spiral Şekil Uyumlu Soğutma Kanalları (Göktaş, 2021)

Şekil uyumlu soğutma kanallarının üretimi için kullanılan bir diğer yöntem kalıp çekirdeklerinin lokmalı parçalar halinde üretilip birleştirilmesidir. Lokmalar arasında kanal boşlukları frezeleme ile işlenerek oluşturulmaktadır. Çok karmaşık şekilli kanallarını işlenmesinin zorluğu, montaj ve sızdırmazlık problemleri yöntemin sınırlılıkları arasındadır.

Katmanlı sert lehimleme yöntemi ile de şekil uyumlu soğutma kanalları üretilebilmektedir. Kalıp çekirdekleri katmanlara bölünerek öncelikle katman plakalarına kanal boşlukları talaşlı imalat yöntemi ile işlenmektedir. Sonrasında katman plakaları sert lehimleme ile birleştirilerek kalıp çekirdekleri oluşturulmaktadır (Şekil 24). Bu yöntem karmaşık formlu kanalların üretilebilmesi ve dayanıklı kalıp çeliği malzemelerinin kullanılması açısından avantajlara sahiptir.



Şekil 24. Şekil Uyumlu Soğutma Kanallarının Katmanlı Sert Lehimleme Yöntemi ile Üretimi (Göktaş ve Güldaş, 2020)

SONUÇ

Plastik parçaların en çok kullanılan üretim metotlarından birisi plastik enjeksiyon kalıplama yöntemidir. Termoplastik sınıfındaki plastiklerin ısı karşısında ergiyebilme özelliği sayesinde akışkan haldeki plastik malzeme kalıp boşluğuna doldurularak şekillendirilmektedir. Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi; dolum, ütüleme, soğutma ve çıkarma adımlarından oluşmaktadır. Bunlar arasındaki en kritik safha soğutma sürecidir. Hem üretim hızının hem de ürün kalitesinin belirlenmesinde soğutma işlemi etkin bir rol oynamaktadır.

Uygun soğutmanın yapılabilmesi, ergiyik haldeki plastik malzemenin tekrar katılaşması esnasında çekmenin tüm bölgelerde eşit bir şekilde gerçekleşmesi için çok önemlidir. Düzgün dağılımlı bir çekeme ancak parçanın tüm bölgelerinde eşit bir soğuma ile elde edilebilmektedir. Aksi takdirde sıcaklık dağılımındaki düzensizlik çekmenin de dengesiz olmasına neden olacaktır. Bu durum plastik parçanın ölçü ve geometrik özelliklerini bozarak ürün kalitesini düşürecektir. Bu ek olarak plastik parça üzerinde oluşacak kalıntı gerilmeler nedeniyle plastik parçanın mekanik dayanımı da düşecektir.

Plastik malzeme üzerindeki ısının mümkün olan en kısa sürede uzaklaştırılması kalıplamadaki çevrim süresini de kısaltacaktır. Bu durum üretim hızı ve üretim maliyetlerinin verimliliği açısından oldukça ehemmiyetlidir.

Plastik enjeksiyon kalıplamada ekin ve verimli bir soğutmanın sağlanabilmesi için soğutma sistemi tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır. Plastik enjeksiyon kalıplarında soğutma, kalıp plakalarına delinen soğutma kanallarından soğuk su akışı ile sağlanmaktadır. Kanal içerisinden akan soğuksu, temas ettiği kanal yüzeyinden ısı alarak kalıp dışına taşımaktadır. Kalıplama işleminde dolum safhasında plastik malzemenin katılaşmadan kalıp boşluğuna dolabilmesi kalıp sıcaklığının belirli değerlerde olması ile mümkündür. Yani soğutma sistemi kalıp sıcaklığını bu verimli çalışma sıcaklığında tutabilmelidir.

Soğutma kanalları kalıp bloğu içinde kalıp boşluğuna mümkün olduğunca yakın mesafelerden geçmelidir. Böylece plastik malzeme üzerindeki ısının soğutma suyuna geçişi kolaylaşacaktır. Ayrıca kalıp malzemesinin ısıl iletkenliği de ısı transfer hızını ve sıcaklık dağılımını iyileştireceğinden ısıl iletkenliği yüksek kalıp malzemeleri tercih edilmelidir.

Soğutma kanallarının boyutları ve mesafeleri, kalıp üzerinde eş sıcaklık dağılımını sağlayacak şekilde belirlenmelidir. Kanal boyutlarının belirlenmesinde en önemli kriterlerden birisi plastik parçanın et kalınlığıdır. Et kalınlığına göre uyun boyutlar kullanılarak kanal tasarımı yapılmalıdır.

Kanal içindeki su akışının türbülanslı olması ısı transferini iyileştirmektedir. Kanal içerisinde türbülanslı akış için uygun akış hızını sağlayacak debiler ayarlanmalıdır. Uygun çalışma debisi ayrıca su giriş ve çıkış sıcaklık farkının 2-3°C'yi geçmemesi için de önemlidir.

Eğimli ve karmaşık formlu plastik parçaların kalıplanmasında kalıp üzerindeki eş sıcaklık dağılımının elde edilebilmesi için kalıp boşluğunu düzgün bir şekilde saran şekil uyumlu soğutma kanalları kullanılmalıdır.

Kalıp çalışma sıcaklığının ve su akış kontrolünün hassas bir şekilde denetlenebilmesi için kalıp şartlandırıcı kullanılmalıdır. Şartlandırıcı kullanımı hazırlık süreçlerini de kısaltacağından üretim hızının artmasını sağlayacaktır.

Bilgisayar ortamında plastik enjeksiyon kalıplama için yapılacak akış ve soğuma analizleri ile tasarım hataları düzeltilmeli, etlin ve verimli soğutmanın gerçekleştirilmesi sağlanmalıdır.

KAYNAKÇA

Akyüz, Ö.F., (1998). *Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş*. İstanbul: Pagev Yayınları.

A Raus, A., Wahab, M. S., Ibrahim, M., Kamarudin, K., Ahmed, A., & Sa'ude, N. (2017). *A Comparative Study of Mould Base Tool Materials in Plastic Injection Moulding to Improve Cycle Time and Warpage Using Statistical Method*. Journal of Mechanical Engineering (JMechE), (1), 1-17.

Amran, M., Salmah, S., Marjom, Z., Al-Amani, U., Izamshah, R., Hadzley, M., Abdullah, Z., and Sanusi, M. (2014). *Warpage analysis verification between simulation and experimental of dumbbell plastic part in the injection moulding process*. International Symposium on Research in Innovation and Sustainability 2014 (ISORIS '14). Malacca, Malaysia.

Ekersular, M. (2007). *Plastik Enjeksiyon Kalıpçılığında Soğutma Kanallarının En Uygun Konumunun Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

Goktas, M., Guldas, A., and Bayraktar, O. (2016). *Cooling of Plastic Injection Moulds Using Conformal Cooling Canals*. International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS 2016), Sarajevo, 1(1), 1987-1993.

Güldaş A. and Göktaş M. (2020). "Production of Plastic Injection Molds with Conformal Cooling Channels by Laminated Brazing Method", *Gazi University Journal of Science*, 33(3): 780-789. https://doi.org/10.35378/gujs.621930

Göktaş, M. (2021). *Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Tabakalı Obje İmalatı Yöntemi ile Şekil Uyumlu Soğutma Kanalı Üretimi ve Deneysel İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara

Güneş, A.T., (2005). *Plastik Enjeksiyon Kalıpları*, Ankara: Makine Mühendisleri Odası.

Kazmer, D.O., (2007). *Injection Mold Design Engineering*. Munich: Hanser

Kitayama, S., Tamada, K., Takano, M., and Aiba, S. (2018). *Numerical Optimization of Process Parameters in Plastic Injection Molding for Minimizing Weldlines and Clamping Force Using Conformal Cooling Channel*. Journal of Manufacturing Processes, 32, 782-790. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.04.007

Khan, M., Afaq, S.K., Khan, N.U., and Ahmad, S. (2014). *Cycle Time Reduction in Injection Molding Process by Selection of Robust Cooling Channel Design*. International Scholarly Research Notices, 2014,

Malloy, R.A., (2010). *Plastic Part Design for Injection Molding*. Munich: Hanser.

Mayer, S. (2005). *Optimised Mould Temperature Control Procedure Using DMLS*. EOS Whitepaper, EOS GmbH Ltd, 1-10.

Park, H.S., Dang, X.P., Nguyen, D.S., and Kumar, S. (2020). *Design of Advanced Injection Mold to Increase Cooling Efficiency*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 7(2), 319-328. https://doi.org/10.1007/s40684-019-00041-4

Qiao, H. (2006). *A Systematic Computer-Aided Approach to Cooling System Optimal Design in Plastic Injection Molding*. International Journal of Mechanical Sciences, 48(4), 430-439. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.11.001

Rao, N. S. and Schumacher, G. (2004). *Design Formulas for Plastics Engineers*. 2nd ed., Hanser Verlag, pp. 51-52.

Savaşçı, Ö.T., Uyanık, N., Akovalı, G., (2008). *Ana Hatları ile Plastikler ve Plastik Teknolojisi*. İstanbul: Pagev Yayınları.

Tang, L.Q., Chassapis, C., and Manoochehri, S. (1997). *Optimal cooling system design for multi-cavity injection molding. Finite Elements in Analysis and Design*, 26(3), 229-251. https://doi.org/10.1016/S0168-874X(96)00083-2

Turaçlı, H., (2000). *Enjeksiyon Kalıpları İmalatı*, İstanbul: Pagev Yayınları.

Wang, Y., Yu, K.M., Wang, C.C., and Zhang, Y. (2011). *Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling*. Computer-Aided Design, 43(8), 1001-1010. https://doi.org/10.1016/j.cad.2011.04.011

Zhou, H. and Li, D. (2005). *Mold Cooling Simulation of The Pressing Process in Tv Panel Production*. Simulation Modelling Practice and Theory, 13(3), 273-285. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2004.11.006

İNTERNET KAYNAKLARI

Engineering Polymers, Part and Mold Design, Thermoplatics, A Design Guide, Bayer Corporation. 2000. https://studylib.es/doc/9089563/1.a-design-guide---part-and-mold-design---bayer, (E.T.17.12.2022).

Introduction to Injection Molding for Mass Production of Custom Plastic Parts. https://predictabledesigns.com/introduction-to-injection-molding/, (E.T.17.12.2022).

Moldex3D Provides Mold Preheat Analysis to Enhance Mold Temperature Management. https://www.moldex3d.com/en/blog/tips-and-tricks/moldex3d-provides-mold-preheat-analysis-to-enhance-mold-temperature-management/.(E.T.17.12.2022).

The Basics Of Injection Molding Service. https://facfox.com/service/injection-molding-service/, (E.T.17.12.2022).