

Farklı Basınçlar Altında Solvent Vakumlu Buharlı Kurutma Fırını Tasarımı ve Akış Analizi

Serdar YURDUSEVEN
Ahmet AYDIN
Tahsin ENGİN

ÖZET

Transformatörlerin, birincil enerjiden ikincil enerjiye transferi boyunca yüksek gerilime dayanabilmeleri gerekir. Bu amaç için yalıtım malzemesi gerekmektedir. Transformatör yalıtım malzemesinin kalitesi, transformatör verimi, elektrik direnci, öz direnç, yalıtım malzemesinin dayanıklılığı için önemlidir. Yalıtım malzemesi oda sıcaklığında ağırlığının %8-10'u kadar nem içeren selüloz, higroskopik bir malzeme olduğu için yağ tipi transformatörlerde kullanılır. Bu nedenle yalıtım malzemesinin özelliklerini koruması açısından nemin giderilmesi gerekir. Geleneksel kurutma proseslerinin enerji ve verim açısından kullanışlı olmadığı görülmüştür. Bundan dolayı buhar kurutma prosesi geliştirilmiştir. Bu çalışmada solvent kullanılan verimli buharlı kurutma fırını için farklı basınçlarda termal ampirik hesaplama ve CFD (uygulamalı akışkanlar mekaniği) analizi üzerine çalışılmıştır. Son olarak bu ampirik hesaplamalar CFD ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Solvent Buharlı Kurutma, Transformatör, Kurutma.

1. GİRİŞ

Yağlı tip transformatör üretiminde trafo aktif kısımlarında kullanılan kağıt cinsi yalıtım malzemeleri A sınıfı selülozik yapıda olduğundan dolayı üzerinde yaklaşık %9 nem tutma kapasitesi vardır. Transformatörlerin verimli ve uzun ömürlü çalışabilmesi, bu nem oranının sıfırlanmasıyla mümkündür.

Ülkemizde kullanılan kızgın su buharlı kurutma ve vakumlu hava kurutma sistemlerinde bu nem oranının istenen seviyelere çekilebilmesi için basınç ve sıcaklık değerleriyle oynanarak mekanik problemlerin ortaya çıkmasına sebebiyet verilmektedir. Ayrıca kurutma işlemi pratik olarak oksijensiz ortamda gerçekleştiğinden daha yüksek bir sıcaklık altında uzun bir süreyi kapsaması ve buna bağlı olarak enerji tüketiminin artması geleneksel kurutma fırınlarında karşılaşılan diğer problemlerdir. Selüloz yapıdaki yalıtım malzemelerinin zarar görmemesi için sıcaklık değerlerinin alabileceği maksimum değer, oksijenli ortamda 120 °C oksijensiz ortamda ise 130 °C'dir. Ortaya çıkan bütün bu problem ve kısıtlamalardan dolayı, solvent buharlı vakumlu kurutma sistemleri üzerinde çalışmak gerekmektedir. Su buharı ve hava yerine kullanılan bir hidrokarbon olan solventin kısmi

Abstract:

Transformer is required to withstand high voltages during the process of power transfer from primary to secondary. For this purpose it is required to have adequate insulation. In construction of transformer the quality of transformer insulation materials is important for transformer effectiveness, electric strength, resistivity and accelerates deterioration of solid insulation. Cellulose containing insulation used in Oil filled Transformers, being hygroscopic material, contain 8 to 10% of moisture by weight at ambient temperature. Therefore it is required to remove this moisture from the insulation to maintain its insulating properties. Moisture Removal Process which is deployed conventionally has not remained efficient in terms of energy and effectiveness. Hence vapor drying process has improved the process. In this paper is studied over empirical thermal calculation and CFD (computational fluid Dynamics) being used solvent on this process at different pressures. Finally This empirical calculations have been compared with CFD.

Key Words:

Solvent Vapor Drying, Transformer, Drying.

buhar basıncı ve viskozitesinin düşük, parlama noktasının ise yüksek olması yalıtım malzemesine zarar verilmeden üzerinde bulunan nemin sıfırlanmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca solvent malzemesinin yıkama özelliği olduğundan transformatör üzerinde bulunan toz ve kirlere arındırarak kurutma işleminin kısa zamanda ve güvenli bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır.

Solvent buharlı vakumlu kurutma prosesinin gelişimi üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Robert D. Gham'ın yapmış olduğu araştırmalarda, 1870'lerin başlarında akarsular ile taşınan ağaçların kurutulması için kullanılan bir yöntem olduğu görülmüştür. Buna yakın bir zaman diliminde, günümüzdeki solvent buharlı kurutma prosesi, büyük kerestelerin kurutulması için Mr. Monie Hudson, (1942) tarafından geliştirilmiştir. Mr. Monie Hudson bunun patentini alan ilk kişi olmuş, bu prosesin konvansiyonel kurutma sistemlerine göre birçok avantajını fark etmiştir. Bu avantajlar, kurutma süresindeki azalma, kurutma sonrası yüksek dayanım, kurutma etkinliğinde artış gibi önemli parametreler üzerine olmuştur. 1945 yılında bu kurutma prosesi üzerine ilk ticari tesis, Taylor-Colquitt Company tarafından kurulmuştur. Kudra T., Mujumdar A. yaptığı çalışmalarla bütün kurutma proseslerini kitaplaştırmış ve transformatör kurutma prosesi için en uygun prosesi solvent buharlı kurutma fırını olarak görmüştür. Bu gelişmeler ışığında Feather (1965), selülozik materyallerin kurutulmasında büyük avantajlarının olduğunu ve transformatörlerin yalıtkan malzemesinin ham maddesinin selüloz olduğuna atıfta bulunarak kurutma prosesindeki nem içeriğinin ne kadar düşürülebileceğini araştırmıştır. Bunun yanında yüksek ısı transferi ve uniform sıcaklık dağılımı gibi avantajları da kanıtlamıştır.

Bu bilgiler ışığında selülozik malzemenin kurutma proses süreleri üzerine bir dizi araştırmalar yapılmıştır. Feather bu süre üzerine önemli çalışmalar yapmış ve farklı sıcaklık değerleri ve prosesler için bir grafik oluşturmuştur. Bunun yanında Prof. Ajan Bangar, Prof. Rajan Sharma, Prof. H. P. Tripathi ve Anand Bhanpurkar tarafından yapılan incelemelerde selülozik yalıtkan malzemenin neme bağlı bazı özellikleri-

ni incelemiş ve kurutma süresini ve enerji maliyetini belirlemiştir. Prosesi 4 aşamaya bölmüş ve 4 aşamayı teker teker analiz ederek aşamalarda oluşan transformatör sıcaklığını, ısı taşınım miktarını, basıncı ve su miktarını incelemiştir. Bu süreçlerin sonucunda solvent buharlı kurutma sisteminde kurutma süresinin düştüğünü, yalıtkan malzemenin sıcaklığına ve süreye bağlı olarak yalıtkan malzemenin kalitesinin arttığı ve nem kontrolünün daha kolay sağlandığı kanıtlanmıştır.

Bu çalışmada bu bilgiler ışığında yağlı tip transformatör üretiminde kullanılması amaçlanan solvent vakumlu buharlı kurutma fırını tasarımı gerçekleştirilmiş, kurutma işlem süresi, verimliliği, hava yerine kullanılacak olan solvent malzemesinin uniform dağılımı farklı basınçlar için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri yapılarak incelenmiştir.

2. TASARIM AŞAMASI

2.1. Proses Tanıtımı

Kurutma proseslerinde sistemin güvenli çalışması ile ilgili alınacak önlemlerle beraber işletme fazları 7 ayrı fazdan oluşmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir;

1. Şarj hazırlama
2. Genel ön hazırlık
3. Hazırlık
4. Gerekli ara basınç azaltmaları ile ısıtma
5. Basınç azaltma
6. İnce vakum
7. Havalandırma

2.1.1. Şarj Hazırlama

Bu fazda kurutulacak trafoların aktif kısımları kurutma kazanına yerleştirilmekte ve kurutma için hazırlanmaktadır.

2.1.2. Genel Ön Hazırlık

Bu fazda önce bütün buharlaştırıcı ve yoğunlaştırma sistemi kaçak hava emme pompası üzerinden boşaltılmaktadır. Solvent tankından belirlenen oranda solvent buharlaştırmak üzere buharlaştırıcıya gönderilmektedir.

2.1.3. Hazırlık

Solvent buharlaştırıcı işletme için öngörülen sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Bu sürede kurutma fırınının buharlaştırıcı ile olan bağlantı vanaları kapalıdır ve kurutma fırını içerisindeki basınç kurutulacak ürünler ile birlikte yaklaşık 6 milibara kadar düşürülmektedir.

2.1.4. Ara Basınç Azaltmalar İle Isıtma

Bu aşamada solvent, kurutma fırını içerisine gönderilmektedir. Düşük sıcaklık ve basınçta bulunan fırına besleme hattından gönderilen solvent, fırın içerisinde sıcaklık ve derişiklik farkından dolayı yoğunlaşma sıcaklığına kadar düşmektedir.

Yoğunlaşan solventler bir sevk pompası yardımı ile bir filtre sistemi üzerinden tekrar buharlaştırıcıya geri gönderilmektedir.

Verilen yoğunlaşma ısısı nedeniyle kurutulan nesnelere sıcaklık sürekli yükselmektedir. Sıcaklığın artması ile beraber kurutma fırınındaki yalıtım malzemelerinin içinde nem halinde bulunan suyun buhar basıncı yükselmekte ve suyun buhar basıncı solventin buhar basıncının çok üstünde olduğundan düşük sıcaklıklarda dahi kurutulacak transformatörlerin yalıtım malzemelerindeki nem oranı yüksek kütle transferi ile kurutulmaktadır.

Fırının içerisinde bu aşamada su buharı, kaçak hava ve solvent buharından oluşan bir gaz karışımı meydana gelmektedir. Bu gaz karışımı buhar geri dönüş borusundan yoğunlaştırıcıya gelmekte ve solvent buharı burada taşıyıcı gaz görevi yapmaktadır. Yoğunlaştırıcıda su ve solvent buharı yoğunlaşmakta, kaçak hava ise kaçak hava emme pompası tarafından emilerek egzoz olarak atmosfere atılmaktadır.

Yoğunlaşan su-solvent karışımı toplama kabına akmakta ve burada değişik özgül ağırlıkları nedeni ile birbirinden ayrılmaktadır. Ayrılan solvent suyun üzerinde yüzdüğünden bir taşıma borusu yardımı ile sürekli olarak sevk pompasına gelmekte ve buradan da bir filtre sistemi üzerinden tekrar buharlaştırıcıya geri dönmektedir. Ortalama yalıtım maddelerinin sıcaklığı yaklaşık 80 °C'ı bulduğunda ara basınç azaltması gerçekleştirilmektedir. Bu esnada fırının buhar

giriş vanasını kapatmak sureti ile kurutma fırınındaki basınç 45 milibara indirilmektedir. Böylece kurutulacak objenin çok küçük ara bölme veya katlarında oluşan ve solvent buharının buralara girmesine mani olan iç gazlar emilmek sureti ile ısı alışverişi kolaylaştırılmaktadır.

Diğer ara basınç düşürmeleri gereklilik halinde yapılmaktadır.

2.1.5. Basınç Düşürme

Buhar giriş vanası kapatılmış durumda yapılan bu işlemde, yalıtım maddeleri tarafından emilmiş olan solventin büyük bir kısmı tekrar buharlaştırılmakta ve yoğunlaştırıcıda yoğunlaştırılmak sureti ile buharlaştırıcıya geri gönderilmektedir. Kurutma fırınındaki basınç 26 milibara eriştiğinde basınç düşürme işlemi son bulmaktadır.

2.1.6. İnce Vakum

Basınç düşürme fazının sonunda ince vakum uygulamak yolu ile son kurutma işlemi gerçekleştirilir. İnce vakum fazında yöntem olarak klasik kurutma işlemi uygulanır.

2.1.7. Havalandırma

Bu aşamada fırın içinde solventin trafo yüzeyinden uzaklaştırılması sağlanmaktadır.

2.2. Fırın İçi Termal Hesaplamalar

2.2.1. Solvent ve Suyun Özellikleri

Solventin 25 °C'deki özellikleri Tablo 1'deki gibidir.

Tablo 1. Solvent ve Suyun Özellikleri

Nitelik	Solvent (Shellsol)	Su
ρ	6,54 kg/m ³ (Mükemmel Gaz Şartları Oda Koşullarında)	998,2 kg/m ³
Ma	160 (1)	18
h_{fg}	306.10 ³ j/kg (1)	2265.10 ³ j/kg
c_p	2,09.10 ³ j/kgk (1)	4.182.10 ³ j/kgk

2.2.2. Kütle Yayılım Katsayısının Hesaplanması (DAB)

Düşük basınçlı gaz karışımlarında kütle yayılım katsayısı kinetik teoriden hareketle hesaplanabilir. Bu teoriye göre kütle yayılım katsayısı sıcaklık arttıkça

artma eğilimi, basınç arttıkça azalma eğilimi göstermektedir. Kinetik teoriye göre bulunan aşağıdaki bağıntı yüksek basınçtaki gazlar için geçerli değildir.

$$\frac{PD_{ws}}{(P_{kw}P_{ks})^{1/2}(T_{kw}T_{ks})^{5/12}\left(\left(\frac{1}{M_w}\right) + \left(\frac{1}{M_s}\right)\right)^{1/2}} = a\left(\frac{T}{\sqrt{T_{ks}T_{kw}}}\right)^b \quad (1)$$

Polar olmayan gazlar için $a = 2,745 \cdot 10^{-4}$ $b = 1,823$

Polar gazlar için $a = 3,640 \cdot 10^{-4}$ $b = 2,334$

Solvent yapısı itibariyle bileşke yükleri sıfır olduğundan dolayı polar gazlar dahilinde düşünülür.

[1]'de bulunan Shellsol D40 solventin özelliklerinde yer alan kritik basınç ve sıcaklık değerlerinin White spirit değerlerine benzer olduğu vurgulanmıştır. Buna bağlı olarak FLUENT kütüphanesinden alınan kritik basınç ve sıcaklık değerleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 2. White Spirit Kritik Özellikleri

Nitelik	Değer
Kritik Sıcaklık	701.18 K
Kritik Basınç	65.6 atm

Tablo 2'de verilen değerlerle solvent giriş sıcaklığı olan 130 K için kütle yayılım katsayıları Denklem 1'e göre hesaplanmıştır.

Tablo 3. Solventin Kütle Yayılım Katsayısının Farklı Basınçlar İçin Belirlenmesi

Basınç (kPa)	Dws	Basınç (kPa)	Dws	Basınç (kPa)	Dws
2	0,000717071	3,5	0,000409755	5	0,000286828
2,5	0,000573657	4	0,000358536	5,5	0,000260753
3	0,000478047	4,5	0,000318698	6	0,000239024

Tablo 4. Solvent ve Suyun Basınca Bağlı Yoğunlukları ve Grashorf Hesaplamaları

Basınç	Yoğunluk (kg/m ³)			Grashorf (Gr)	Basınç	Yoğunluk (kg/m ³)			Grashorf (Gr)
	Solvent	Su	Ort			Solvent	Su	Ort	
2	0,096	0,03	0,063	$9,17 \cdot 10^{11}$	8	0,38	0,03	0,206	$1,52 \cdot 10^{12}$
3	0,14	0,03	0,087	$1,16 \cdot 10^{11}$	9	0,43	0,03	0,230	$1,55 \cdot 10^{12}$
4	0,19	0,03	0,111	$1,29 \cdot 10^{12}$	10	0,48	0,03	0,254	$1,57 \cdot 10^{12}$
5	0,24	0,03	0,134	$1,38 \cdot 10^{12}$	11	0,52	0,03	0,278	$1,59 \cdot 10^{12}$
6	0,29	0,03	0,159	$1,44 \cdot 10^{12}$	12	0,57	0,03	0,302	$1,60 \cdot 10^{12}$
7	0,33	0,03	0,182	$1,49 \cdot 10^{12}$	6,5	0,31	0,03	0,111	$1,15 \cdot 10^{12}$

2.2.3. Kütle Transferi Hesaplamaları

Grashof ve Rayleigh bağıntılarının kütle transferine yansımaları referans alınarak kütle transferi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Kütle geçişi yoğunluk farkına bağlı olarak gerçekleştirildiğinden dolayı trafo yüzeyindeki su buharının yoğunluğu Denklem 2'ye bağlı olarak hesaplanmış ve Tablo 4'de verilmiştir.

$$\rho_0 = \frac{P_{h0}}{R_b \cdot T_0} \quad (2)$$

Kütle transferinde sakin ortam için kullanılacak olan Grashof sayısı Denklem 3'de hesaplanmış ve Tablo 4'de verilmiştir.

$$Gr_m = g \cdot (\rho_s \& \rho_w) \cdot \frac{d^3}{v^2 \rho_{ort}} \quad (3)$$

Hız ve derişiklik sınır tabakalarında momentum yayılımının kütsel yayılıma oranını ifade eden Schmidt sayısı ile Rayleigh sayısı sırasıyla Denklem 4 ve Denklem 5'de elde edilen hesaplamalar ışığında hesaplanmış ve Tablo 5'de verilmiştir.

$$S_c = \frac{v}{D_{ws}} \quad (4)$$

$$R_{\alpha_D} = Gr_m \cdot S_c \quad (5) \quad Ra_1 = Gr \cdot Pr \quad (10)$$

Sistemdeki kütle geçişinin sakin ortam durumunda elde edilmesi için Denklem 6'daki Sherwood denklemi kullanılmıştır.

$$Sh = 0,59 \cdot Sc^{1/4} \quad (6) \quad Nu = 0,59 \cdot (Ra)^{1/4} \quad (11)$$

Sherwood sayısını kullanarak kütle geçiş katsayısı Denklem 7'de elde edilmiştir.

$$Sh = h_m \cdot \frac{d}{D_{ws}} \quad (7) \quad Nu = \frac{hD}{k} \quad (12)$$

Bir bobin için buharlaşan nem miktarı Denklem 8'de elde edilmiştir.

$$m_b = h_m A (\rho_{so} \& \rho_{bco}) \quad (8)$$

$$Q_{buh} = m_{buh} h_{sb} \quad (9)$$

2.2.4. Isı Transferi Özellikleri

Uygulamalarda kütle Grashof sayısının ısı transferine bağlı Grashof sayısına eşit kabul edildiği görülmüştür. Bu yoldan hareketle $Gr_m = Gr$ alınabilir (1).

Rayleigh sayısı, Prandtl sayısı için Denklem 10'da hesaplanmıştır. Nusselt sayısı da buna bağlı olarak Denklem 11'de elde edilmiş ve ısı taşınım katsayısı Denklem 12'de hesaplanmıştır.

$$Q_{taş} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (13)$$

Tablo 6. Isı Transferi Hesabı Sonuçları

Basınç [kPa]	Pr	Nu	k [W/m.K]	h [W/m ² .K]	Q [kW]
2	0,088	314,43	0,0454	5,19	28,25
3	0,132	368,75	0,0454	6,09	33,13
4	0,176	407,45	0,0454	6,73	36,61
5	0,220	437,98	0,0454	7,23	39,35
6	0,264	463,43	0,0454	7,65	41,64
7	0,308	485,38	0,0454	8,01	43,61
8	0,352	504,78	0,0454	8,33	45,35
9	0,396	522,21	0,0454	8,62	46,92
10	0,440	538,08	0,0454	8,88	48,35
11	0,484	552,68	0,0454	9,12	49,66
12	0,528	566,22	0,0454	9,34	50,88

Tablo 7'de verilen ortalama hesaplama sonuçları CFD analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak hesaplamaların ne denli deneysel verilere yaklaştığı tespit edilecektir.

Tablo 5. Kütle Transferi Yoluyla Kaybolan Isı Miktarı Hesabı

Basınç	Sc	Rayleigh (Ra)	Shmidt (Sh)	h_m [m/s]	m_b [kg/s]	Q_w [kW]
2	0,023986	2,2. 1010	227,2394	0,059253	0,094592	229,9533
3	0,03598	4,16.1010	266,5002	0,046327	0,073957	179,7887
4	0,047973	6,2. 1010	294,4652	0,038391	0,061288	148,991
5	0,059966	8,28.1010	316,53	0,033014	0,052704	128,1241
6	0,071959	1,04.1011	334,9227	0,029111	0,046472	112,9742
7	0,083953	1,25.1011	350,7916	0,026134	0,041721	101,4232
8	0,095946	1,46.1011	364,81	0,023781	0,037965	92,29172
9	0,107939	1,67.1011	377,4081	0,021869	0,034912	84,8701
10	0,119932	1,89.1011	388,8785	0,02028	0,032375	78,70456
11	0,131926	2,1.1011	399,4294	0,018937	0,030231	73,49086
12	0,143919	2,31.1011	409,2149	0,017784	0,02839	69,01702
6,5	0,047973	6,31. 1011	277,7715	0,044645	0,071272	134,2675

Tablo 7. Ortalama Ampirik Hesaplama Sonuçları

Kütle Transferi Sonuçları		Isı Transferi Sonuçları	
Gr_m		$8,13 \cdot 10^{11}$	
Dws	0,00106		
Sc	0,011	Nu	213
Ra_D	$2,37 \cdot 10^{10}$	h_{tas}	$3,51 \text{ W/m}^2\text{K}$
Sh	212	\dot{Q}_{tas}	20 KW
h_m	0,066 m/s		
\dot{m}_b	0,1036 kg/s		
\dot{Q}_b	310 KW		

3. CFD ÇALIŞMALARI

3.1. Model Detayları

ANSYS Fluent programı ile geliştirilen CFD analizinde, ilk olarak akış alanı, belirlenen yükleme kapasitesine bağlı olarak oluşturulmuştur. Oluşturulan model üzerinden hızlı çözüm alabilmek için tek eksenli simetri alınarak ağ (mesh) sayısı azaltılmıştır.

Tasarımda solventin fırın içi dağılımının ve trafo yüzeyi sıcaklık dağılımının homojenizasyonu için Şekil 1 modeli üzerinde iyileştirmelere gidilmiştir. Solventin gönderildiği kanal boyutları ve konumları değiştirilerek solvent dağılımının homojenizasyonu sağlanmaya çalışılmıştır. Nitekim kanal boyutları aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

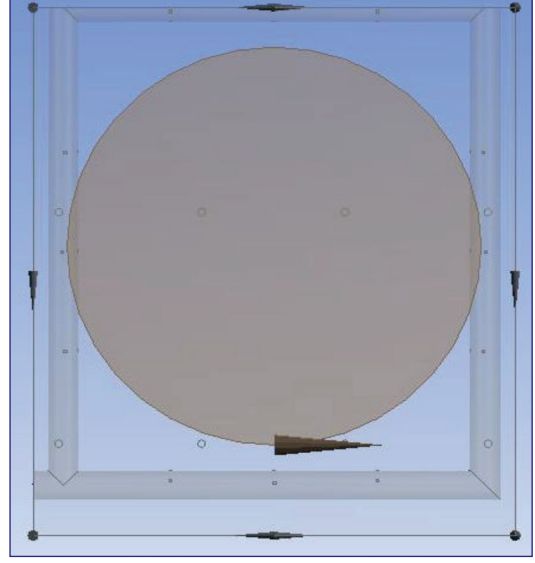
Çoklu nozul üzerinden fırın içine solvent gönderimi düşünülmüştür. Bu tasarımda 2 no'lu kanal için $200 \times 80 \text{ mm}$, 1 ve 3 no'lu kanallar $100 \times 80 \text{ mm}$ belirlenmiştir. Kanalın boru yüzeyine olan mesafesi;

1. no'lu kanal için $101,52 \text{ mm}$

2. no'lu kanal için 60 mm

3. no'lu kanal için $101,52 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.

Ayrıca üst ölü bölgelerin dağıtılması için yatay düzlemde 3 farklı giriş belirlenmiştir.

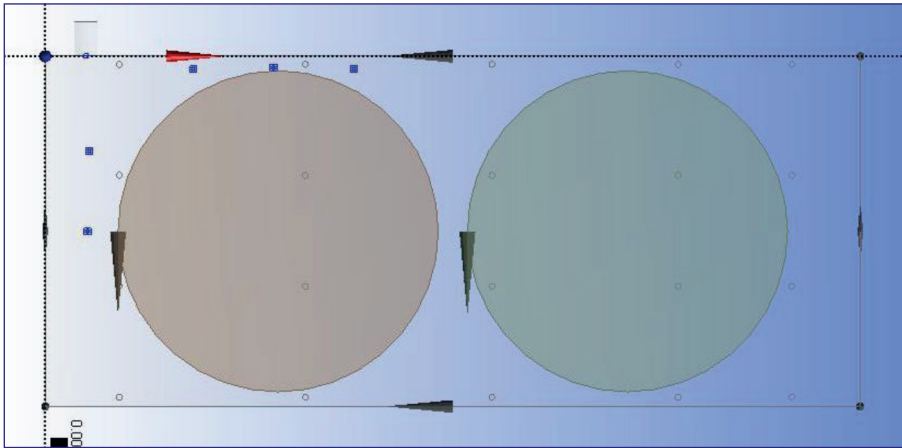


Şekil 1. Çoklu Noktadan Solvent Fırın İçi Giriş Noktalarının Gösterimi

Diğer bir tasarımda solvent fırın içerisine tek bir noktadan gönderilmektedir.

3.2. Çözüm Ağı (Mesh)

Fırında dört yüzeyle (Tetrahedral) elemanlar kullanılmıştır. Trafo yüzeyleri 3 tabaka inflation atılmış ve mesh kalitesinin yükseltilmesi için "sweable mesh" tercih edilmiştir.



Şekil 2. Tek Bir Noktadan Solvent Gönderimi Modellenmesi

3.3. CFD İle Akış Analizi Sonuçları

Fluent içerisinde türbülans modeli olarak “k-ε realizable” girilmiştir. Burada ortam sıcaklığı 298 K’den başlayarak “transient” analiz gerçekleştirilmiştir. Solvent buharı hal değişimi UDF kod ile sağlanmıştır. Fakat yoğuşan sudan dolayı solvent buharından çekilen enerji fırın yüzeyinden gönderilecek olan 200 kW’a denk olduğundan yüzeye enerji girilmemiştir. İçeriye sadece 100 kW enerji geçişini sağlayacak solvent gönderilmiştir. İçeriye gönderilecek solvent $\dot{Q} = \dot{m} * C_p * \Delta T$ den tespit edilmiş olup debisi 1,2 kg/s olarak belirlenmiştir. (1) (7) Burada simetri kullanıldığından debi yarıya düşürülmüştür. Prosesin giriş şartı olan 403 K “inlet” olarak girilmiştir. Bu şartlar dahilinde öncelikle homojen dağılım şartları gözlemlenmiştir.

Solvent dağılımında hesaplamalara ve proses akışına bağlı olarak 12 kPa’a kadar “transient” olarak CFD’de incelenmiş ve yüzey ortalama sıcaklığı proses akış şemasında belirtilen trafo yüzeyi ortalama sıcaklığı 80 °C’ye kadar çıkartılmıştır.

Bunun için solvent giriş noktalarından çıkış kapatılmış ve sadece solventin basınç artışı sonucu izlediği karakteristik gözlemlenmiştir.

Şekil 3’de iki farklı model için trafo yüzeyi sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Şekil 3-a çoklu noktadan solvent gönderilmesi durumunda fırın içi sıcaklık dağılımını gösterirken Şekil 3-b’de tek noktadan solvent gönderimi durumu için fırın için sıcaklık dağılımını göstermektedir.

Şekil 3-a tasarımı trafo yüzeyi sıcaklık dağılımı daha düşük sıcaklık farklarında oluşmasına rağmen tatminkâr bir homojenizasyon sağlanamamıştır.

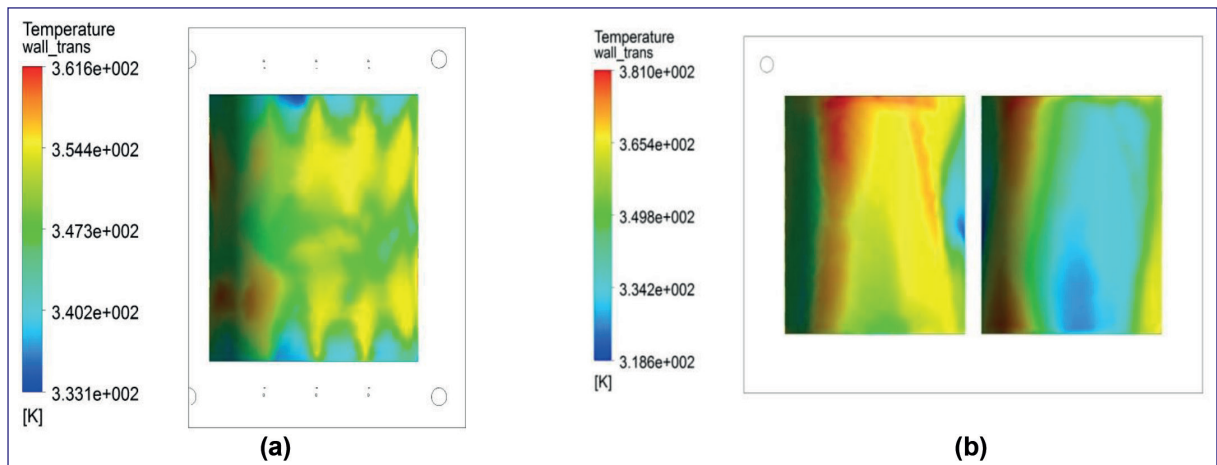
Şekil 3-b tasarımı trafo yüzeyi sıcaklık dağılımı yüksek sıcaklık farklarında oluşmasına rağmen kritik sıcaklık değerlerinin altında kalmıştır. Prosesin basınç azaltma evresinde daha iyi bir homojenizasyon sağlanacağından kullanılabilir durumdadır.

Borulama maliyetleri Şekil 3-b’de oluşmamaktadır. Bu durum ilk yatırım maliyetinde büyük bir avantaj oluşturmaktadır.

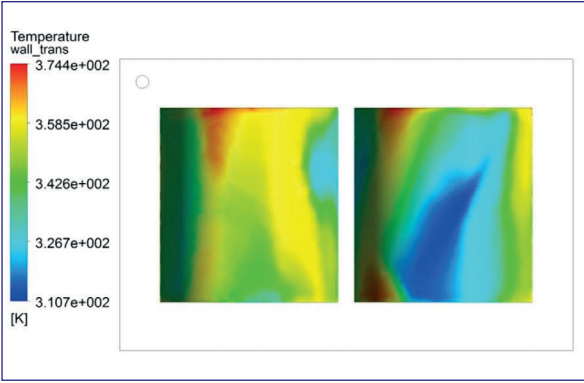
Bu avantajlardan dolayı 7 ayrı fazdan oluşan kurutma prosesinde incelemelere, seçimi yapılan Şekil 3-b üzerinden gidilecektir.

3.3.1. Birinci Isıtma Fazı

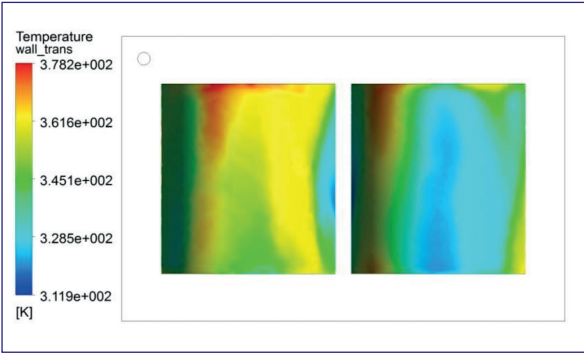
Bu fazda trafo yüzeyi ortalama sıcaklığı 80 °C’ye ulaşana kadar trafo ısıtılmaktadır. Bu aşamada çıkış yüzeyleri “Wall” olarak tanımlanmıştır ve zamana bağlı analizde fırın kontrol hacmine sürekli olarak solvent gönderilmektedir. Şekil 4, 5, 6, ve 7’de fırın içi basınç farklı değerlere ulaştığındaki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Burada trafo yüzeyi sıcaklık dağılımı maksimum 381 K’e çıkmaktadır. Bu sıcaklık trafo yüzeyi emniyet sıcaklığı olan 130 °C’nin altındadır.



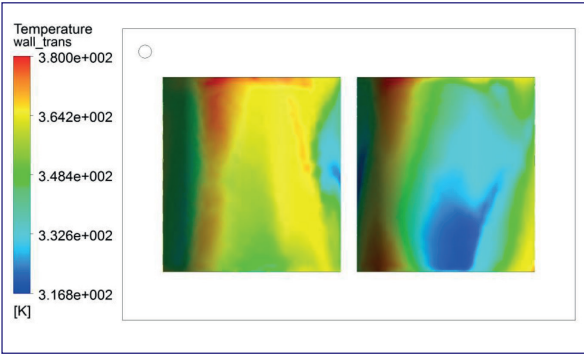
Şekil 3. 12 kPa İçin Trafo Yüzeyleri Sıcaklık Dağılımı



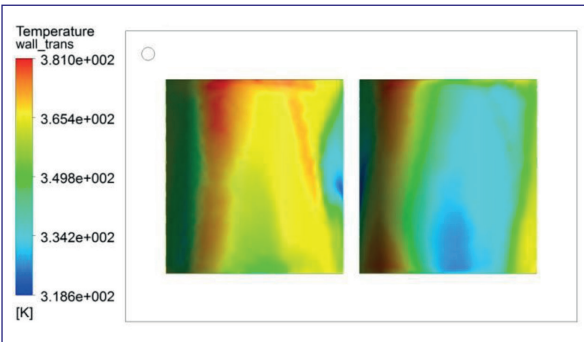
Şekil 4. 3 kPa Basınca Ulaşıldığında Sıcaklık Dağılımı



Şekil 5. 6 kPa Basınca Ulaşıldığında Sıcaklık Dağılımı



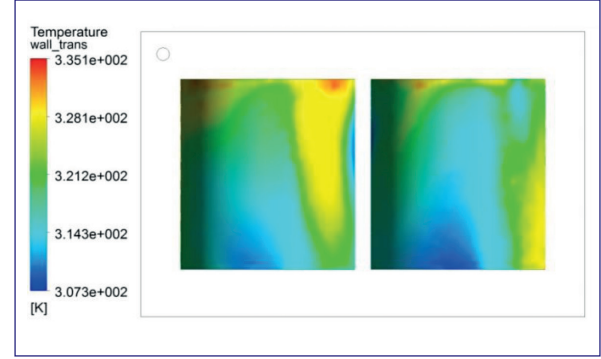
Şekil 6. 9 kPa Basınca Ulaşıldığında Sıcaklık Dağılımı



Şekil 7. 12 kPa Basınca Ulaşıldığında Sıcaklık Dağılımı

3.3.2. Birinci Vakum Fazı

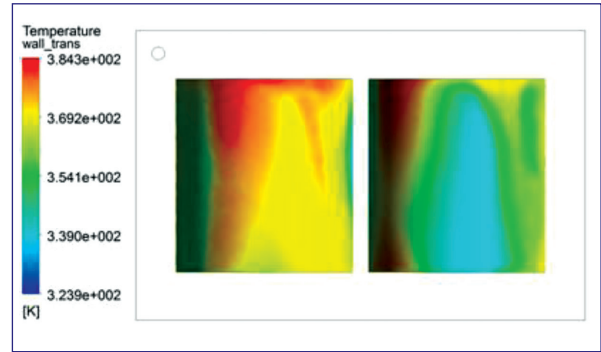
Bu aşamada içerideki nem oranını minimize etmek için basınç 7 kPa'a kadar düşürülerek fırın için solvent buharının fırından çekilmesi sağlanmaktadır. Bu aşamada maksimum sıcaklık 351 K'e kadar düşmektedir. Bu aşamada fırın içi vakum hattı "pressure outlet" olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. 7 kPa Basınca Kadar Solvent Vakum Edildiğinden Trafo Yüzeyi Sıcaklık Dağılımı

3.3.3. İkinci Isıtma Fazı

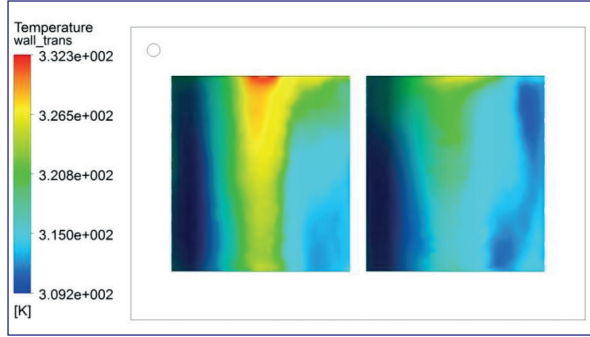
Bu aşamada yüzey sıcaklığı ortalama 90 °C'e çıkana kadar fırın içine solvent gönderimi yapılmaktadır ve bu aşama tamamlandığında basınç 90 kPa'a çıkmaktadır. Bu fazda maksimum yüzey sıcaklığı 385 K'e çıkmaktadır. Burada vakum hattı "Wall" olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 9. 90 kPa Basınca Ulaşıldığında Trafo Yüzeyi Sıcaklık Dağılımı

3.3.4. İkinci Vakum Aşaması

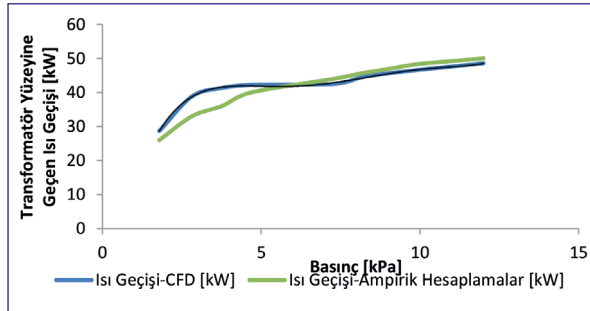
Bu aşamada basınç biriken nemin tahliyesi için 4.5 kPa'a kadar düşürülmektedir.



Şekil 10. 4,5 kPa Basınca Ulaşıldığında Sıcaklık Dağılımı

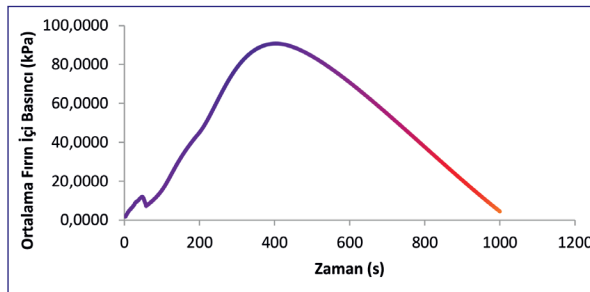
4. SONUÇLAR

Şekil 11'de görüldüğü üzere CFD analiz sonuçları ile yapılan hesaplamalarda büyük oranda uyuma sağlanmıştır. Bu da hesaplamalarımızın deneysel verilere ne denli yaklaştığının bir göstergesidir.



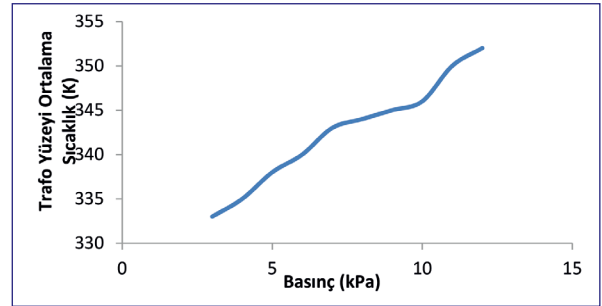
Şekil 11. Basınca Bağlı CFD Analiz Sonuçları İle Ampirik Hesaplamaların Karşılaştırılması

Tablo 10'da basınç dağılımı gözükmemektedir. Bu basınç dağılımı tek bir periyodu içermekte olup, trafo nem oranı %2'nin altına düşene kadar bu periyot devam etmektedir.



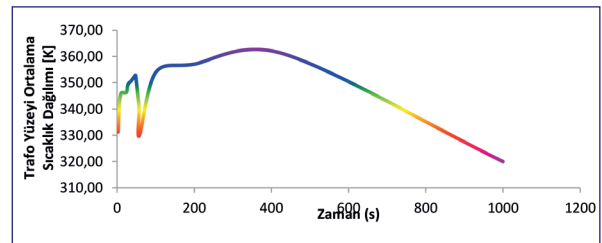
Şekil 12. Zamana Bağlı Basınç Değişimi

Fırın içi sıcaklık değişimi basınca bağlı olarak değişmektedir. Basınç ise zamana bağlı olarak değişmektedir. Her durum için fırın içi hacimsel ortalamaya bağlı sıcaklık dağılımı Şekil 13'te verilmiştir. Zamana bağlı olarak sıcaklık artışı sağlanmış bu durum fırında solvent ile sağlanan ısı enerjisinin yeterli olduğunu kanıtlamaktadır. 300 kW ısıtma kapasitesi seçilmiştir.



Şekil 13. Basınca Bağlı Trafo Yüzeyi Sıcaklık Dağılımı

Tablo 12'de incelenen tüm periyot için sıcaklık değişimi incelenmiştir. Basınç düşüşünün olduğu zaman dilimlerinde trafo yüzeyi sıcaklık dağılımı düşmüş, basıncın stabil olduğu noktalarda sıcaklık stabil kalmıştır.



Şekil 14. Bir Periyot İçin Trafo Yüzeyi Sıcaklık Dağılımının

KAYNAKLAR

- [1] Shellsol D40 Data Sheet 647-42-48-9.
- [2] Graham R. D., "The Vapor Drying Process", Oregon Forest Products Laboratory, Corvallis, Oregon, 1951.
- [3] Prof. Dr. Kemal Onat "Kütle Geçişi Ders Notları", İTÜ Yayını.
- [4] Kudra T., Mujumdar A. S., "Advanced Drying Technologies, Second Edition" Crc. Press, 2009.
- [5] Feather Le. Drying And Oil Impregnation Of Power Transformer Insulation, Proc., 6th Electrical Insulation Conf, New York, Paper 32C3-8, 1965, Pp 65-69.

- [6] Ch. Krause, M. Prevost, D. Woodcock, The Effects On Winding Clamping Pressure Due To Changes In Moisture, Temperature And Insulation Age, Sixtyseventh Annual International Conf. Of Doble Clients, March 2000.
- [7] Bangar A., Sharma R., Tripathi H. P., Bhanpurkar A., "Comparative Analysis Of Moisture Removing Processes From Transformer Which Are Used To Increase Its Efficiency" GJRE Vol 12 Page 1-7, July, 2012.
- [8] Yoshida H., Suzuki T., IEEE Transactions On Electrical Insulation; Volume EI-20 Issue 3, Pages 609-618; "Drying Process Of Insulating Materials Of Transformers", 1985.
- [9] W. W., Guidi, H. P., Fullerton, Mathematical Methods For Prediction Of Moisture Take-Up And Removal In Large Power Transformers, In: Presented At Proceedings Of IE EE Winter Power Meeting, 1974.
- [10] Taner Derbentli, Osman Genceli, "Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri", Çeviri: Literatür Yayıncılık, 1996.
- [11] Yunus Çengel, "Isı ve Kütle Transferi", Çeviren Vedat Tanyıldızı, Güven Kitapevi, 2011.
- [12] R. B., Bird, W. E., Stewart and E. N., Lightfoot, Transport Phenomena, 2nd Ed., John Wiley&Sons, Inc., 2001.