

**T.C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ULTRASONİK YÖNTEMLE ENDÜSTRİYEL MALZEMELERİN
TEMİZLENMESİNDE SICAKLIK PARAMETRE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

EDA DERELİ GÜLER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. BEDRİ YÜKSEL**

İSTANBUL, 2020

Eda Dereli Güler tarafından hazırlanan “Ultrasonik Yöntemle Endüstriyel Malzemelerin Temizlenmesinde Sıcaklık Parametresinin İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İstanbul Gelişim Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANSTEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Bedri YÜKSEL

Mekatronik Mühendisliği, İstanbul Gelişim Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu
onaylıyorum /onaylamıyorum

Başkan: Doç. Dr. Armağan Fatih KARAMANLI

Mekatronik Mühendisliği, İstanbul Bahçeşehir Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu
onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye: Dr.Öğr.Üyesi Cansu NOBERİ

Uçak Gövde-Motor Bakım Bölümü, İstanbul Gelişim Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu
onaylıyorum/onaylamıyorum

Tez Teslim Tarihi:/...../.....

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

ETİK BEYAN

İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

ULTRASONİK YÖNTEMLE TEMİZLEMEDE SICAKLIK PARAMETRESİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Eda DERELİ GÜLER

İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2020

ÖZET

Dünya nüfusunun ve sanayileşmenin hızla artmasıyla birlikte doğal yaşamında dengesi olumsuz bir şekilde etkilenmeye başlamıştır. Artan kirliliği önlemek veya azaltmak amacıyla temizlemek için doğal bir kaynak olan suya bazı kimyasal maddeler eklenerek daha etkili temizlik yöntemleri uygulanmaya konulmaya çalışılmaktadır. Suyu katılan bu kimyasal maddeler çevre kirliliğini tetikleyen ve doğal dengeyi bozan, önemli tehlikeli maddeleri içermektedir. Sanayileşmenin artmasıyla üretilen makine parçalarının farklılığı ve dayanımı göz önünde bulundurulduğunda temizlik konusundaki beklentiler de genişlemektedir.

Temizlik her canlının da ihtiyaç duyduğu bir kavramdır ve teknolojinin hızla gelişmesiyle farklı temizlik yöntemleri kullanılmaya ve araştırılmaya başlanmıştır. Kimyasal temizliğin zararlarını fark eden bilim insanlarının çalışmalarıyla ses dalgaları ile temizlik keşfedilmiştir. Ses tekniği ile yani ultrasonik ile temizlik, genellikle yüksek hassasiyete temizlik isteyen makine parçalarında ve temizlemede ulaşılması zor noktaların hassasiyetle temizlenmesi amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Ultrasonik temizlik diğer temizlik yöntemlerine kıyasla az maliyetli, güvenli ve kaliteli bir temizleme yöntemidir.

Ultrasonik temizleme işlemini gerçekleştirecek bir sistem 5 ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki paslanmaz malzemedan imal edilmiş temizleme tankı (kabı), tankın duvar ve/veya zemin bölgelerine özel bir yapıştırıcı (örn: epoksi) ile yapıştırılmış dönüştürücü veya dönüştürücüler, ultrasonik güç devresi, ısıtıcı ve termostattır.

Bu çalışmada, ultrasonik yöntemle temizleme işleminde sıcaklık değişimlerinin temizleme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Güç kartı tasarlanmış ve çalışma prensibi açıklanmıştır. Temizlenecek aynı tip yüzeylerde sabit frekans ve farklı sıvı sıcaklıkları uygulanarak temizleme yönteminde sıcaklığın etkileri folyo ve çelik malzeme örnekleri kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan deneylerde en etkili temizleme 60°C sıcaklık, 25-30 kHz frekans değerlerinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Ultrasonik, kavitasyon, ultrasonik yıkama, metal temizleme,
piezoelektrik, transdüser
Sayfa Adedi : 97
Danışman : Prof. Dr. Bedri YÜKSEL



INVESTIGATION OF TEMPERATURE PARAMETER FOR ULTRASONIC CLEANING

(M. Sc. Thesis)

Eda DERELİ GÜLER

GELİŞİM UNIVERSITY

GRADUATE EDUCATION INSTITUTE

August 2020

ABSTRACT

With the rapid increase of the world's population, the balance of natural life has started to be affected negatively. In order to prevent increased pollution, more effective cleaning methods are tried to be applied by adding some chemical substances to water, which is a natural source for cleaning. These chemicals are a big and dangerous factor that triggers environmental pollution and disrupts natural balance. With the increase in industrialization, considering the difference and strength of the parts produced, the expectations for cleaning are expanding.

Cleaning is a term that every living thing needs, and with the rapid development of technology, different cleaning methods have begun to be found. Cleaning by sound waves was discovered by scientists who realized the damages of chemical cleaning. Cleaning by sound technique, ie ultrasonic, has been started to be used in parts with high sensitivity and difficult to reach for cleaning. Ultrasonic cleaning is a low cost, safe and quality method compared to other cleaning methods.

5 main substances are needed to perform the ultrasonic cleaning process. The first one is the "cleaning tank" made of stainless material. The transducer or transducers affixed with a special adhesive (epoxy) to the wall or floor areas of the tank are the ultrasonic power circuit, the heater and the cleaning fluid.

This, the effects of detecting changes in the ultrasonic cleaning process has been studied. Power board teaching and working principle is explained. By applying constant frequency and hot liquid temperatures on the same type of surfaces to be cleaned, an example of effective foil and steel material in the cleaning method The most effective cleaning was obtained at 60°C temperature, 25-30 kHz frequency values.

Keywords : Ultrasonic, cavitation, ultrasonic washing, metal cleaning,
piezoelectric, transducer
Number of Pages : 97
Supervisor : Prof. Dr. Bedri YÜKSEL



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında fikirleriyle ve değerli mühendislik tecrübeleriyle yanımda olan sevgili hocam Sn. Prof. Dr. Bedri YÜKSEL'e teőekkürü borç bilirim.

Ayrıca, deney çalışmaları sırasındaki ilgisi ve yardımlarından dolayı Sn. Dr. Cansu NOBERİ'ye teşekkür ederim.

Ultrasonik ile tanışmamı sağlayan rahmetli Mehmet TURGUTLUGİL'e, tez dönemim boyunca araőtırmalarımaya katkı sağlayan Sema TURGUTLUGİL'e ve çalışma boyunca desteğini ve bilgisini benimle paylaşan arkadaőım Gürkan AKAY'a teşekkür ederim.

Son olarak ve en önemlisi, hayattaki her koőulda bana destek verdikleri için annem Kadriye DERELİ, babam Hasan DERELİ, ablam Elif DERELİ ve eőim Caner GÜLER'e çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1.GİRİŞ.....	1
2. ULTRASONİK DALGALAR.....	3
2.1. Ultrasonik Ses Dalgalarının Üretimi ve Algılanması.....	3
2.2. Ultrasonik Ses Dalgası ve Ortamdaki Etkisi.....	5
2.3.Ultrasonik Dalga Türleri.....	7
2.3.1. Boyuna dalgalar.....	7
2.3.2. Kayma Dalgaları.....	8
2.3.3. Yüzey Dalgaları.....	8
2.4. Ultrasonik Dalganın Bir Engelden Yansıması.....	8
2.5. Ultrasonik Dalga Hareketi ve Hızları	9
2.5.1.Ultrasonikte Ses Hızına Etki Eden Faktörler	9
2.6. Ultrasonik Dalgaların Dönüşümü.....	12
2.6.1. Ultrasonik Dalgaların Açısız Aktarımı	13
2.7. Frekans ve Ultrasonik Dalga Boyu	13
3.1. Kavitasyon	15
3.1.1. Kavitasyon Çekirdeği	18
3.1.2. Kavitasyon Gürültüsü	18
3.1.3. Basınçlandırmanın Kavitasyona Etkisi.....	18
3.1.4. Kavitasyon Şiddeti Ve Erozyon	18
3.1.5. Kavitasyon Oluşumunda Temizleme Sıvısı.....	19
4. ULTRASONİK KULLANIM İÇİN KRİSTALLER	21
4.1. Kristal Türleri.....	21
4.1.1.Kuvars Kristali	22
4.1.2. Kuvars Kristali Kesimi ile Titreşim İlişkisi	23
4.2. Ultrasonik Aktivite için Kristalleri Test Etme	26
5. ULTRASONİK ÜRETİMİ VE ÜRETİME ETKİ EDEN FAKTÖRLER	28

5.1. Ultrasonik Üretimi.....	28
5.1.1. Piezoelektrik Etkisi.....	28
5.1.2. Manyetostriktif Etkisi	30
5.2. Rezonans ve Antirezonans.....	31
5.3. Çember Diyagramı	32
5.4. Sıvı Ortamda Sıcaklığın Ultrasonik Üzerinde Etkileri	33
5.5. Frekans Değişkenliğinin Ultrasonik Üzerindeki Etkileri	35
5.6. Dönüştürücülerin Tank Yerleşimi	36
6. DENEYLERDE KULLANILAN ULTRASONİK TEMİZLEME SİSTEMİNİN TASARIMI.....	38
6.1. Ultrasonik ile Makine Parçası Yıkama Sisteminin Genel Tasarımı.....	38
6.1.1. Kristal Çalışma Frekansı Analizi	40
6.1.2. Güç Devresi Kartı Tasarımı	43
6.1.3. Ultrasonik Güç Kartı Frekans Testi.....	45
6.1.4. Kristal ve Transdüser (Dönüştürücü) Montajı	47
6.1.5. Uygulama Tankı ve Transdüserlerin Montajı	50
6.1.5.1. Uygulama Tankı İç Sepet.....	52
6.1.6. Tank ve Sıvının Isıtılması	53
6.1.7. Termostat Montajı	55
7. FOLYO TESTLERİ	57
7.1. Sıcaklığın Temizliğe Etkisinin Folyo Testleri ile İncelenmesi.....	57
7.3. Metal Malzeme Üzerinde Yapılan Temizleme Testi ve Sonuçları	63
7.4. Paslanmaz Sac Parçaları Üzerinde Ultrasonik Temizlik Etkisinin İncelenmesi.....	65
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	72

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Ultrasoniğin uygulama alanları [11].....	2
Çizelge 2.1. Sesin çeşitli ortamlardaki hızı(m/s).....	6
Çizelge 2.2 Çeşitli ortamlardaki akustik hızlar[11].....	11
Çizelge 5.1 Farklı su çeşitlerinde ultrasonik etkilerinin ölçümü[27].....	35
Çizelge 8.1. Ultrasonik temizlemede sıcaklığın folyo üzerindeki kavitasyon etkisi	76



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir cisme çarpan dalğanın yansıması ve absorbe edilmesi[1]	4
Şekil 2.2. Frekans-periyot ilişkisi	4
Şekil 2.3. Yankının oluşumu	6
Şekil 2.4. Boyuna dalgaların hareketi[23]	7
Şekil 2.5. Kayma dalgaların hareketi[23].....	8
Şekil 2.6. Yüzey dalgaların hareketi[23]	8
Şekil 2.7. Bir ortamda dalga türlerinin dönüşümü	12
Şekil 2.8. Ses dalgaları için frekans, hız ve dalga boyunu veren bir abak[11]	14
Şekil 3.1. Kabarcık patlama oluşumu[10]	15
Şekil 3.2. Kavitasyon oluşumu ve tekrarlanması.....	17
Şekil 3.3. Kavitasyon erozyonunun metal malzeme üzerindeki etkisi.....	19
Şekil 4.1. Piezoelektrik kristalin X-Y eksenleri	23
Şekil 4.2. Kuvars kristal örnekleri	23
Şekil 4.3. Kuvars kristali ve eksenleri.....	24
Şekil 4.4. Kuvars kristali x ve y kesim örneği	25
Şekil 4.5. Kristale doğrudan voltaj uygulaması	25
Şekil 4.6. Kristalin kesim yönüne göre hareketi	26
Şekil 4.7. Kristal testi uygulaması	27
Şekil 5.1. Piezoelektrik etkisi	29
Şekil 5.2. Piezoelektrik dönüştürücünün yapısı ve montajı[6]	30
Şekil 5.3. Bir kristalin eşdeğer devresi[1]	31
Şekil 5.4. Seri - paralel rezonans frekans eğrisi.....	32
Şekil 5.5. Çember diyagramları, R, L, C seri halinde; giriş ve empedans birlikte	33
Şekil 5.6. Buhar basıncı ve sıcaklık	34
Şekil 5.7. Sıcaklığın musluk suyunda kavitasyona etkisi ve histerezis etkisi	35
Şekil 5.8. Frekans değişiminin kavitasyon üzerindeki etkileri	36
Şekil 5.9. Transdüserlerin tank yerleşimi [7].....	37
Şekil 6.1. Ultrasonik sistemin genel yapısı	38
Şekil 6.2. Frekans ölçüm cihazıyla kristalin analizi.....	41
Şekil 6.3. A=21 kHz B=70 kHz değerleri gösterilmektedir	41
Şekil 6.4. A=27 kHz B=83 kHz değerleri gösterilmektedir	42
Şekil 6.5. Kullanılan temizleme sisteminin güç devresi	43

Şekil	Sayfa
Şekil 6.6. Üretilen güç devresi.....	44
Şekil 6.7. Enerji metre ölçüm cihazı	45
Şekil 6.8. Enerji metre cihazı kHz ölçümü-1	46
Şekil 6.9. Enerji metre cihazı kHz ölçümü-2.....	47
Şekil 6.10. Enerji metre cihazı kHz ölçümü-3.....	47
Şekil 6.11. Kristallerin elektrot malzemeye montajı.....	48
Şekil 6.12. Transdüseri oluşturan elemanların montajı	49
Şekil 6.13. Dört kristalli transdüser montajı.....	49
Şekil 6.14. Ultrasonik temizleme yapılacak tankın yan görünüşü.....	50
Şekil 6.15. Ultrasonik temizleme yapılacak tankın iç görünüşü.....	51
Şekil 6.16. Ultrasonik temizleme yapılacak tankın alt görünüşü ve epoksi ile transdüser montajı.....	51
Şekil 6.17. Ultrasonik temizleme yapılan tankın sıvı tahliye vanası	52
Şekil 6.18. Temizlenecek parçanın yerleştirileceği tank içi parça tutucu sepet	53
Şekil 6.19. Tank içi parça tutucu sepet yan görünüş.....	53
Şekil 6.20. Bant rezistansın bağlantısı.....	54
Şekil 6.21. Bant rezistansın ultrasonik temizleme yapılacak tank üzerine sabitlenmesi	55
Şekil 6.22. Termostat ve bant rezistans bağlantısı	56
Şekil 6.23. Termostat ucu tank üzeri montajı	56
Şekil 7.1. Ultrasonik temizleme tankı içerisine koyulan su ile folyo testinin gerçekleştirilmesi	58
Şekil 7.2. Sıcaklığı 20°C olan suda, 25-30 kHz aralığında 3 dakika süre ile temizlenen alüminyum folyonun görünümü.....	59
Şekil 7.3. Sıcaklığı 40°C olan suda, 25-30 kHz aralığında 3 dakika süre ile temizlenen alüminyum folyonun görünümü.....	59
Şekil 7.4. Sıcaklığı 50°C olan suda, 25-30 kHz aralığında 3 dakika süre ile temizlenen alüminyum folyonun görünümü.....	60
Şekil 7.5. Sıcaklığı 50°C olan suda, 25-30 kHz aralığında 3 dakika süre ile temizlenen alüminyum folyonun görünümü.....	61
Şekil 7.6. Sıcaklığı 70°C olan suda, 25-30 kHz aralığında 3 dakika süre ile temizlenen alüminyum folyonun görünümü.....	61
Şekil 7.7. Sıcaklığı 70°C olan suda bulunan folyo üzerinde meydana gelen yüksek erozyon etkisi	62
Şekil 7.8. S Sıcaklığı 80°C olan suda bulunan folyoya 25-30 kHz aralığındaki frekansın 3 dakika boyunca yarattığı etkinin milimetreye oranla gözle kontrolü.....	62

Şekil	Sayfa
Şekil 7.9. Ultrasonik temizleme tankına girmeden önce gres yağı kalıntılarının bulunduğu kirli metal malzeme.....	64
Şekil 7.10. Ultrasonik tank içerisine yerleştirilen tel sepet yardımıyla temizlenen metal malzeme.....	64
Şekil 7.11. Sıcaklığı 70°C olan suda 3 dakika boyunca ultrasonik temizlik yapılan gres yağı kalıntılarında arındırılmış metal malzeme yüzey görünümü.....	65
Şekil 7.12. Boyutu 18.60 mm olan paslanmaz sacın üzerindeki çizikler ve ezilmeler ...	66
Şekil 7.13. Şekil 7.12'deki paslanmaz sacın markalama boyası ile tüm yüzeyinin kaplanması.....	66
Şekil 7.14. Paslanmaz sac parçasının 3 dakika süre ile 70°C sıcaklıktaki ultrasonik temizleme uygulamasından sonra 10X büyüme ile 10000µm skalasında mikroskop altında görüntüsü.....	67
Şekil 7.15. Boyutu 43.74 mm olan çizilmiş paslanmaz sacın markalama boyası ile kaplanması.....	67
Şekil 7.16. Boyutu 3.74 mm olan, marka boyasıyla boyanmış paslanmaz sacın ultrasonik temizleme tank içerisinde işleme uğrama görüntüleri.....	68
Şekil 7.17. Paslanmaz sac parçasının 3 dakika 70°C ultrasonik temizleme yapılmasından sonra 10X büyüme ile 10000µm skalasında mikroskop görüntüsü.....	68
Şekil 7.18. Boyutu 40.11 mm olan paslanmaz sactan yapılan montaj parçasının üzerindeki çizikler ve ezilmeler.....	69
Şekil 7.19. Boyutu 40.11mm olan paslanmaz sactan yapılan montaj parçasının gres yağı ile kaplanması.....	69
Şekil 7.20. Boyutu 40.11mm olan paslanmaz sactan yapılan montaj parçasının ultrasonik temizleme tankı içerisinde gres yağıdan temizlenmesi işlemi.....	70
Şekil 7.21. Paslanmaz sac montaj parçasının parçasının 3 dakika 70°C ultrasonik temizleme yapılmasından sonra 20X büyüme ile 5000µm skalasında mikroskop görüntüsü.....	70
Şekil 7.22. Paslanmaz sac montaj parçasının parçasının 3 dakika 70°C ultrasonik temizleme yapılmasından sonra 20X büyüme ile 5000µm skalasında mikroskop görüntüsü.....	71
Şekil 8.1. Sıcaklığı 20°C olan suda, 3 dakika boyunca bekletilen folyonun üzerindeki kavite etkisinin 50 X büyütme ile 200 µm skalasında ölçümü.....	72
Şekil 8.2. Sıcaklığı 40°C olan suda, 3 dakika boyunca bekletilen folyonun üzerindeki kavite etkisinin 50 X büyütme ile 200 µm skalasında ölçümü.....	73
Şekil 8.3. Sıcaklığı 50°C olan suda, 3 dakika boyunca bekletilen folyonun üzerindeki kavite etkisinin 50 X büyütme ile 200 µm skalasında ölçümü.....	73
Şekil 8.4. Sıcaklığı 60°C olan suda, 3 dakika boyunca bekletilen folyonun üzerindeki kavite etkisinin 50 X büyütme ile 200 µm skalasında ölçümü.....	74

Şekil**Sayfa**

Şekil 8.5. Sıcaklığı 70°C olan suda, 3 dakika boyunca bekletilen folyonun üzerindeki kavitasyon etkisinin 50 X büyütme ile 200 µm skalasında ölçümü..... 74

Şekil 8.6. Sıcaklığı 80°C olan suda, 3 dakika boyunca bekletilen folyonun üzerindeki kavitasyon etkisinin 50 X büyütme ile 200 µm skalasında ölçümü..... 75



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Hz	Hertz
kHz	Kilo Hertz
MHz	Mega Hertz
mm	Milimetre
cm	Santimetre
cm/sn	Santimetre/saniye
m/s	Metre/saniye
N/cm	Newton / santimetre
esu/kg	Elektrostatik yük / kilogram
kPa	Kilopascal
W	Watt
kW	Kilowatt
kcall	Kilokalori
V	Volt
AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
°C	Celsius Derece
°F	Fahrenheit Derece
µm	Mikrometre

1.GİRİŞ

Temizlik hayatımızın her alanında yer alan bir terimdir. Endüstride temizlik için kullanılan çok çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlere, yüksek basınçta su ve hava ile temizleme, sprey temizleme, buharlı temizleme, kimyasal bazlı temizleme gibi örnekler verilebilir. Temizlikte istenilen sonucu en kısa sürede almak ve kullanılan yönteme göre çevreye en az zarar vermek çalışmaların temel esasıdır.

Ultrasonik temizleme, alışılmış yöntemlere göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Ultrasonik temizleme; ses dalgaları yardımıyla yapılan temizleme yöntemidir. Ultrasonik dalgalar sıvı ortamlarda kavitasyon patlamaları üretir ve patlama sonucu oluşan etki eşit olarak dağılır. Serbest bırakılan enerjiler çatlaklara, kör deliklere ve diğer temizleme yöntemleriyle erişilemeyen alanlara ulaşır ve derinlere nüfuz eder. Kirletici maddelerin temizlenmesi, temizlenen parçanın karmaşıklığı ve geometrisine bakılmaksızın tutarlı ve muntazamdır. Bu yöntem diğer yöntemlere göre daha kolay, daha hızlı, güvenli ve daha çevrecidir.

Mikroskobik fırçalama olarak da tanımlanan ultrasonik temizlik, suyun ses dalgaları ile belirli bir hızla gidip gelmesi olayı olarak bilinmektedir. Normal temizlikte fırçalar ya da yalnızca su bazen tüm yüzeylere ulaşamaz, ulaşsa bile istenilen temizleme sonucu veremez. Ses dalgalarının yarattığı titreşim etkisi adeta yüksek hızla yapılan darbeleri andırmaktadır. Ultrasonik dalgaların etkisiyle sıvıda çok hızlı basınç artış ve azalmaları meydana gelir. Basıncındaki ani azalmalar ile suda gaz kabarcıkları oluşur ve basıncın yükselmesi ile birlikte oluşan kabarcıklar büyür ve patlar. Patlama etkisiyle kabarcığın içerisindeki enerji açığa çıkar. İşte gaz kabarcıklarının suda yarattığı bu hareketlenmeye “kavitasyon etkisi” denilmektedir [18].

Bu temizleme yöntemi sağlık, otomotiv endüstrisi, mücevherat temizleme gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bundan dolayı ultrasonik yöntemle temizleme, başta otomotiv ve otomotiv yan sanayi ve makine, tesis imalatında kullanılır. Armatür ve sağlık tesisatı endüstrisi, optik, hassas mekanik işler, saat endüstrisi, galvanik, elektronik, mikroteknoloji, fotovoltaiik yani güneş pilleri ya da dizinleri sayesinde ışık kaynağından, çoğu zaman güneşten elektrik elde etme yönteminde, yarı iletken sanayi, koruyucu bakım ve bakım işleri olmak üzere pek çok alanda tercih edilen bir yöntemdir [1].

Çizelge 1.1.Ultrasoniğin frekans aralıklarına göre uygulama alanları [11]

Frekans (kHz)	Uygulama Alanı
3-10	Gaz üretme, köpük söndürme, delme,gazsızlaştırma, kaynak
1-100	Metallurjik etkiler
20	Hırsız alarmı
20-100	Depolimerizasyon
20-40	Endüstriyel temizleme
300	Rezonans testi
100-500	Fotoemisyon ve emülsiyon
150	Su yağ karıştırma
300	Fiziksel ve biyolojik etkiler
330	Virüs muamelesi
450	Civanın bastırılması
500-15000	Puls testi, katılaştırken çinko üzerine etkileri
200-200	Halojen – gümüş üzerine etkileri
1.000.000	Ulaşılabilen en yüksek frekans

Ultrasonik temizleme sistemi, ultrasonik güç devresi, transdüser, temizleme sıvısının konulduğu tank, temizleme sıvısı ve ısıtıcı olarak kullanılan rezistans ile birlikte 5 ana sistemden oluşur.

Ultrasonik temizleme sistemin özellikleri:

- 1) Hızlı bir temizleme yöntemidir. Parça kirliliğine göre değişiklik gösterebilir ancak temizlik genellikle 1 ila 3 dakika içinde tamamlanır.
- 2) Geleneksel temizlik yöntemlerine göre çok fazla zaman ve iş gücü tasarrufu sağlar.
- 3) Temizleme yönteminde gerekli ve uygun görülen temizliği arttırıcı maddelerde kullanılabilir.

Bu çalışmada, ultrasonik temizleme işlemleri bölümlere ayrılarak anlatılacaktır. Son bölümde ultrasonik temizleme deneylerinde temizlemede uygun sıcaklık derecesi belirlenecektir.

2. ULTRASONİK DALGALAR

Ses dalgalarından oluşan bir enerjidir. Sesin oluşması için hava, su ya da gaz ortamında titreşimin oluşması gerekir. Titreşen parçacıklar denge konumu etrafında gidip-gelme hareketi yaparlar. Bu hareket zaman ekseninde açılarak bir dalga halinde resmedilir. Dalga hareketi, titreşen parçacığın zamana göre titreşim genliğinin bir maksimum ile minimum arasında salınımını yani zamanla değişimini gösterir [12].

2.1. Ultrasonik Ses Dalgalarının Üretimi ve Algılanması

İnsan işitmesi için duyulabilir menzilin ötesinde bir ses dalgası, ultrasonik işlemin başladığı noktadır. Ses, canlıların işitme duyuları tarafından duyulabilen periyodik bir basınç değişimi olarak nitelendirilebilir. Sesin frekansı, hızı, boyu ve periyodu bulunmaktadır. Sesin birim zamandaki titreşim sayısına "frekans" denir. Birimi ise Hertz (Hz)'dir. Ses frekansı 3 bölüme ayrılarak tanımlanır. 20 Hz'den az olan seslere infrasonik sesler denir. İnsanlar 20 Hz ve aşağısında olan sesleri duyamazlar. Ancak, çeşitli hayvanlar ya da canlılar bu ses seviyesini duyabilirler. İnsanların duyabildiği frekans aralığı ise 20 ile 20.000 Hz arasındadır. İnsan kulağının duyamayacağı yüksek frekanslı seslere verilen isim ise ultrasoniktir. En az saniyede 18.000 Hertz, yaklaşık üst sınır veya insan işitme aralığı olduğundan, ultrasonik işlemin başladığı nokta olarak kabul edilir [2].

Ses dalgaları frekans değerlerine göre 3 ana başlık altında toplanır.

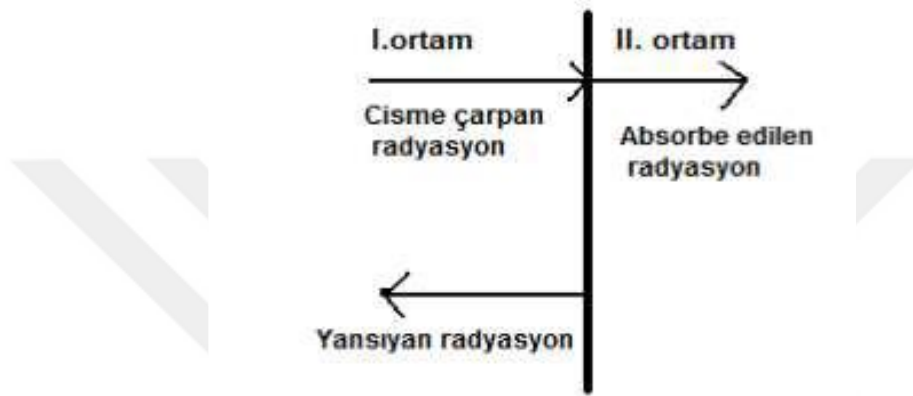
Alçak Frekanslı Sesler (İnfrasonik): 20 Hz'den düşük frekanslar için kullanılan bir terimdir. Hava basıncı değişikliğiyle oluşan seste dalga frekansları yüksek olduğunda insan kulağının duyamayacağı frekansta olabilirler. İnsan kulağının teorik olarak 20 Hz ile 20.000 Hz aralığını duyduğu söylene de, en iyi 250 Hz ve 3.000 Hz aralığındaki ses frekanslarını duyar.

Yüksek Frekanslı Ses (Ultrasonik): Ses öte ya da ultra ses, insan kulağının duyamayacağı yüksek frekanstaki seslere verilen addır. Frekansı 20 kHz'in üzerindedir.

Çok Yüksek Frekanslı Ses (Megasonik): Mega ses ya da megasonik ses frekansları olarak nitelendirilen frekanslar, 800 kHz'den büyük olan MHz mertebesinde ölçülen çok yüksek frekanslı seslere denir.

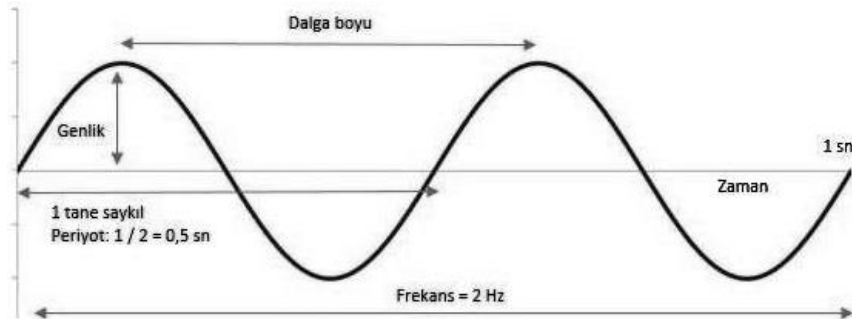
Ultrasonik, insan kulağının duyabileceği frekans sınırının üzerindeki mekanik ses dalgalarıdır. Herhangi bir elektromanyetik dalga yayılımında olduğu gibi, ultrasonik bir

dalga da herhangi bir cisme çarptığı zaman bir kısmı cisim tarafından absorbe edilir, bir kısmı da cisim üzerinden geçer. Eğer ses dalgası yansıtıcı cisme doğru yaklaştırılırsa yansiyarak geri döner ve alınan dalgaların frekanslarında değişme olur (Doppler etkisi). Dalgaların yansıdığı cisimle olan bu etkileşmesi bazı fiziksel büyüklüklerin ölçümünde ve hareketli cisimlerin hızını izlemede kullanılmaktadır. Ultrasoniğin içeri işleyebilme özelliği de vardır. Bu özelliği sayesinde tıpta da kullanılmakta ve röntgen ışınlarına göre daha güvenilir olduğu bilinmektedir [2].



Şekil 2.1. Bir cisme çarpan ultrasonik dalganın yansıması ve absorbe edilmesi [1]

Frekans aslında ses dalgasındaki tonlamayı belirler. Yani ses dalgalarının saniyede üretilme sayısı frekans değeridir. Frekansı düşük olan sesleri kalın tonda, frekansı yüksek olan sesleri (yani saniyede üretilen ses dalgaları kalın tona göre fazla) ise ince tonda bir ses olarak işitiriz. İnce tonda ki seslerin frekansları büyük, kalın tonda ki seslerin ise frekansları küçük değerlerdedir. Endüstride ultrasonik yöntemle temizleme yapmak için genellikle 20-50 kHz arası frekans değerleri kullanılır [2].



Şekil 2.2. Frekans-periyot ilişkisi

Ardı ardına iki atma (dalga) arasında geçen zamana “periyot” denir. T ile gösterilir ve birimi SI birim sisteminde saniye (s)'dir. Bir periyotluk zaman içinde alınan yola “dalga boyu” denir. Diğer bir deyişle, iki tepe ya da iki çukur arasındaki uzaklıktır λ (lamda) ile gösterilir ve birimi SI birim sisteminde m'dir. Atmanın tepe yüksekliğine “genlik” denir. Periyot ve frekans arasındaki ilişki, $T=1/f$ şeklinde ifade edilir ve bütün periyodik hareketlere uygulanır. Hareket sabit hızlı olduğundan, dalga boyu $Yol = Hız \times Zaman$ ifadesinden:

$$\lambda = v \cdot T \quad (2.1)$$

Eşitliği ile ifade edilir. Bu son iki eşitlikten hız ifadesi,

$$v = \lambda \cdot f \quad \text{m/s} \quad (2.2) \text{ elde edilir.}$$

Burada:

λ : Uzaklık (m)

v: Hız (m/s)

T: Periyot (s)

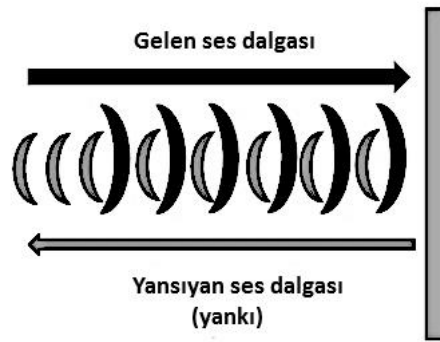
f: Frekans (Hz)

Oluşturulan dalgaların yayılma hızı sabittir. Hız değerinin genelde kaynak frekansına ve atmalarının genliğine bağlı olmadığını söyleyebiliriz. Hız, ortamın özelliklerine bağlıdır. O halde kaynağın frekansı değiştirilirse, oluşturulan dalga boyu da değişecektir.

2.2. Ultrasonik Ses Dalgası ve Ortamdaki Etkisi

Ultrasonik kavramını iyi şekilde anlamak için öncelikle ses dalgaları hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Ses dalgalarının oluşumu ve yayılımı ultrasonik kavramının ortaya çıkmasındaki ana nedendir. Ses katı, sıvı ve gaz ortamlarında farklı hızlarda yayılım gösterir.

Yayılan ses dalgaları temizlenecek metal malzeme gibi sert düz yüzeylere çarpınca doğrultularını değiştirirler. Bu olay yansımadır. Yansıma olayında sesin özellikleri değişmez. Yansımış ses dalgaları tekrar geriye dönerse ikinci bir ses meydana gelir. Ancak geri dönen bu ses dalgalarının frekanslarında değişimler görünür. Gelen ses dalgasının bir kısmı cisim tarafından absorbe edilmiş olur. Cisme çarpıp geri dönen bu sese yankı denir [1].



Şekil 2.3. Yankının oluşumu

Su, katı ve hava gibi ortamlarda insan kulağının algılayabileceği frekans aralığında olan basınç değişimlerini ses olarak daha önce tanımlamıştık. Herhangi bir maddeye bir temas ya da hafif bir kuvvet uygulandığında belirli frekansta titreşim olur. Böylece çevresindeki hava moleküllerinin hareket etmesiyle ses dalgaları oluşur. Ses dalgaları, boyuna dalgalardır. Bu dalgalar, buldukları ortamın (yani gazlar, katılar ve sıvılar), özelliklerine göre belli bir hızla yayılırlar. Ses dalgası, bir ortamda yayılma gösterirken; ortamdaki maddeler, dalganın hareket doğrultusu boyunca yoğunluk ve hacim değişikliği göstererek titreşir. Ses yayılımı için bir ortama ihtiyaç vardır. Ses boşlukta yayılmaz. Ses bulunduğu her ortamda farklı bir hızla yayılır. Aşağıdaki tabloda farklı ortamlarda sesin yayılma hızı m/s cinsinden verilmiştir [3].

Çizelge 2.1. Sesin çeşitli ortamlardaki yayılma hızları (m/s) [3]

0 ⁰ C havada	331
20 ⁰ C havada	343
0 ⁰ C helyum gazı içinde	972
0 ⁰ C hidrojen gazı içinde	1286
25 ⁰ C suda	1493
Deniz suyunda	1533
Alüminyumda	5100
Bakırda	3560
Kauçukta	54

2.3. Ultrasonik Dalga Türleri

Dalga hareketi bir ortamda enerjinin, bir bölgeden diğer bir bölgeye iletilmesidir. Bir dalgada ortam tanecikleri geçici olarak yer değiştirir ve daha sonra özgün konumlarına geri dönerler. Dalga hareketinde enerji taşınır, madde taşınmaz [4].

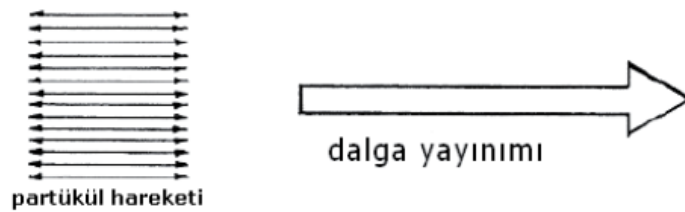
Ultrasonikte dalga türleri 3 farklı yapıda tanımlanır. Bunlar boyuna dalgalar, kayma dalgaları ve yüzey dalgalarıdır.

2.3.1. Boyuna dalgalar

Boyuna dalgalar, parçacıkların bir ortamdaki hareketi dalga yayılma yönüne paralel olduğunda meydana gelir. Yani ses dalgaları titreşim ile yayılma yönü aynı olan boyuna dalgalarıdır. Bu tür bir dalgaya genellikle L dalgası denir. L dalgaları sıvılar, katılar veya gazlar içinde hareket eder ve kolayca üretilebilir. Boyuna dalgalar çoğu ortamda yüksek bir hareket hızına sahiptir. Boyuna dalgalar bir ortam içinde ultrasonik frekansta normal bir doğrultuda titreşimiyle üretilebilir.

Boyuna dalgalara, “basınç dalgası” adı da verilir. Titreşen atomlar bir periyodun yarısında birbirlerine yaklaşarak sıkışır, periyodun diğer yarısında ise birbirlerinden uzaklaşarak kendi aralarında bir çekme kuvvetinin doğmasına neden olurlar. Böylece malzeme içinde, elastik sınırlar dâhilinde kalan ve alternatif olarak değişen basınç ve çekme kuvvetleri doğar. İnsan kulağının nitelediği ses bu türdür ve diğer dalga kuvvetlerine göre daha hızlı yayılır [13].

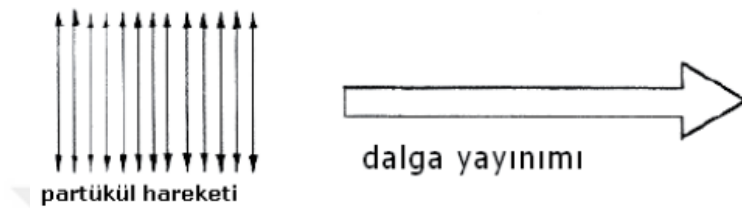
Ultrasonik ses dalgaları, kullanacağımız dönüştürücü yani transdüser olarak adlandırılan ekipmanın ürettiği dalgalarıdır. Bu doğrultuda daha sonra kavitasyon olarak tanımladığımız enerji, transdüser montajı doğrultusunda etkisini gösteren dolu baloncukların oluşumu yoğunlaşacaktır. Yayılım hızı diğer dalga türlerine oranla fazladır [23].



Şekil 2.4. Boyuna dalgaların hareketi[23]

2.3.2. Kayma Dalgaları

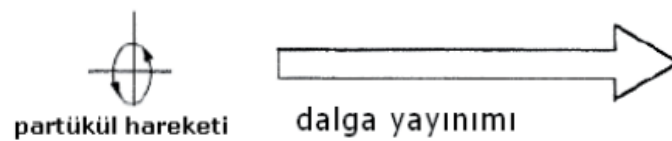
Kayma dalgalarında sıvı içerisindeki partiküllerin ortam içindeki hareketi, dalga yayılma yönüne dik açılardadır. Dalga hareketi x yönünde ise, parçacık yer değişimi y yönündedir. Bundan sonra S dalgası olarak da anılacak olan kayma dalgaları, L dalgalarının yaklaşık yarısı kadar olan bir hıza sahiptir. Bu düşük hız nedeniyle, kayma dalgalarının dalga boyu L dalgalarından çok daha kısadır [23].



Şekil 2.5. Kayma dalgaların hareketi[23]

2.3.3. Yüzey Dalgaları

Yüzey dalgaları, S dalgalarının üretildiğine benzer şekilde ileri geri çalkalanmasıyla üretilebilir. Bir yüzey dalgasının dalga boyu her zaman çok kısadır ve üzerinde hareket ettiği plaka en az birkaç dalga boyu kalınlığında olmalıdır. Yüzey dalgaları L ve S parçacık dalgalarının hareketinden oluşur [23].



Şekil 2.6. Yüzey dalgalarının hareketi[23]

2.4. Ultrasonik Dalganın Bir Engelden Yansıması

Bir ultrasonik dalga, bir engelle karşılaştığında, engelin yapısına ve boyutuna bağlı olarak çeşitli şekillerde yansır. Bu olay, dalga boyuyla engelin boyutunun ilişkisine bağlı olarak değişiklik gösterir. Engel dalga boyuyla karşılaştırıldığında dalga boyundan büyükse, geri dönen (yansıyan) güçlü bir dalga vardır. Bu olay Doppler Etkisi olarak adlandırılır.

Doppler Etkisi, ultrasonik bir dalga yansıtan yüzeye yaklaştığında veya bunun tersi bir durum olduğunda frekanstaki değişikliği not ederek ultrasonik dalgaların varlığının bir

göstergesi olarak kullanılabilir. Alıcı kaynağa doğru hareket ederse, frekans artar ve eğer hareket kaynaktan uzaktaysa, frekans azalır [17]. Artış veya azalış miktarı;

$$f = 2f_0 \frac{v}{c} \quad (2.3) \text{ bağıntısı ile verilir.}$$

Burada;

f = Artış ve azalış miktarı

f_0 = frekans (Hz)

v = hareketin genliği (m)

C = ortamdaki ses hızı (m/s)

2.5. Ultrasonik Dalga Hareketi ve Hızları

Daha önce de belirtildiği gibi, birkaç tip ultrasonik dalga mevcuttur. Bu tür dalgalar, daha önce kısaca tarif edilen L, S, kayma ve yüzey dalgalarıdır. Ultrasonik dalga hareketi, dalga şeklini değil, yalnızca parçacık hareketini ifade eder.

Herhangi bir malzemedeki bir parçacık açıkça üç farklı yer değiştirmeye karşılaşılabılır: biri x yönünde (genellikle u olarak adlandırılır), biri y yönünde (v olarak adlandırılır) ve biri z yönünde (w olarak adlandırılır). Bu nedenle, herhangi bir parçacık hareketi, üç yer değiştirmenin bir kombinasyonu halinde çözülebilir.

Böylelikle; bir bütün dalga olarak hareket etmemesi ve Hooke kanununa uyması gerekmektedir. Hooke kanunu, belirli sınırlar içerisinde, yay gibi esnek bir cisim gerdirmek için gereken kuvvetin yayın uzunluğundaki değişimle doğru orantılı olmasıdır. Ayrıca, iç gerilmelerin ve parçacık ivme kuvvetlerinin hareketini temsil eder.

2.5.1. Ultrasonikte Ses Hızına Etki Eden Faktörler

Akustik Empedans (Z): Malzeme üzerinde ultrasonik dalgaların yayılımına karşı gösterilen direnç akustik empedans olarak isimlendirilir. Ses dalgaları farklı bir akustik empedans ile karşılaştıklarında geri yansır.

$$Z = C \cdot \rho \quad (2.7)$$

Burada:

$C = \text{Ses Hızı (m/s)}$

$q = \text{Yoğunluk (kg/m}^3\text{)}$

$Z = \text{Akustik Empedans (ohm)}$

Akustik Basınç (P): Ultrasonik dalgaların hava basıncında yol açtığı değişimlere akustik basınç denir [5].

$$P = Z \cdot a \quad (2.8)$$

Burada:

$Z = \text{Akustik Empedans (ohm)}$

$a = \text{Parçacık Titreşiminin Genliği (Pa)}$

$P = \text{Akustik Basınç (Pa)}$

Akustik Şiddet (I): Ultrasonik ses dalgalarının yayılması sırasında yayılma yönlerindeki birim kesitten geçen mekanik enerji miktarına ultrasonik dalgaların şiddeti denir [5].

$$I = \frac{P^2}{2 \cdot Z} = P \cdot \left(\frac{a}{2}\right) \quad (2.9)$$

Burada:

$I = \text{Akustik Şiddet (W/m}^2\text{)}$

$P = \text{Akustik Basınç (N/m}^2\text{)}$

$Z = \text{Akustik Empedans (ohm)}$

$a = \text{Parçacık Titreşiminin Genliği (Pa)}$

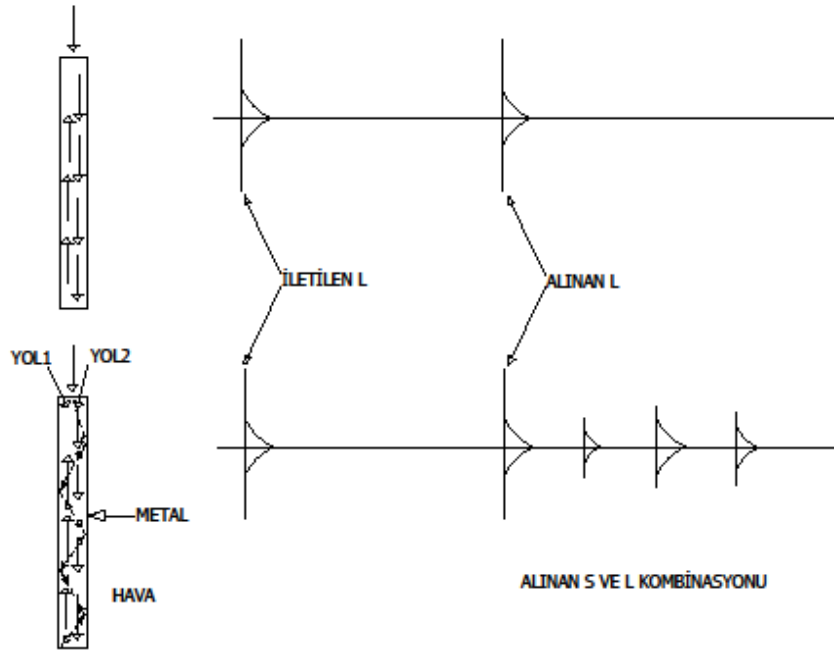
Çizelge 2. Çeşitli ortamlardaki akustik hızlar [11]

Malzeme	Akustik Hız	Yoğunluk	Akustik Empedans
	$V(\text{cm/sn}) * 10^5$	$\rho (\text{g/cm}^3)$	$\rho, V * 10^6$
<i>Hava</i>	0,343	1,205	0,000000413
<i>Etan</i>	0,308	1,357	0,000041
<i>Etilen</i>	0,317	1,260	0,000040
<i>Metan</i>	0,430	0,717	0,0000308
<i>Hidrojen</i>	1,28	0,090	0,000011
<i>Oksijen</i>	0,316	1,42	0,0000452
<i>Su</i>	1,43	1,00	0,143
<i>Alkol</i>	1,44	0,79	0,11
<i>Gliserin</i>	1,90	1,26	2,42
<i>Polisitrin</i>	2,67	1,10	0,294
<i>Motor yağı</i>	1,25-1,74	0,88-1,02	1,1-1,7
<i>Petrol</i>	1,33	0,70	0,93
<i>Ağaç</i>	4,17	0,5-0,8	0,17-0,35
<i>Naylon</i>	1,8-2,2	1,00-1,20	1,8-2,7
<i>Pleksiglas</i>	2,73	1,18	3,20
<i>Lastik</i>	1,48	1,30-2,10	1,9-3,1
<i>Bakalit</i>	2,59	1,4	0,363
<i>Cam</i>	3,40-5,90	2,5-5,9	1,2-2,1
<i>Porselen</i>	5,6-6,2	13-14	2,40
<i>Granit</i>	3,90	2,75	1,09
<i>Mermer</i>	3,80	2,65	1,01
<i>Bakır</i>	4,60	8,93	4,11
<i>Pirinç</i>	4,25	8,55	3,61
<i>Çelik</i>	5,81	7,80	4,76
<i>Kalay</i>	3,32	7,29	1,99
<i>Demir</i>	5,85	7,87	4,07
<i>Alüminyum</i>	6,22	2,65	1,70
<i>Gümüş</i>	3,80	10,50	3,90
<i>Altın</i>	3,24	19,32	3,92
<i>Kurşun</i>	2,13	11,40	2,73
<i>Tungsten</i>	5,46	19,30	8,32

2.6. Ultrasonik Dalgaların Dönüşümü

Herhangi bir türden bir dalga, farklı akustik empedansların iki ortamı arasında, 90 dereceden başka herhangi bir açıda bir sınıra çarptığında, bir dönüşüm gerçekleşebilir ve dalga başka bir türe dönüşebilir.

Yaygın bir örnek olarak, bir sıvıdan bir katıya geçen ve katıya bir açıyla vuran bir L dalgası verilebilir. Sıvı ve katı arasındaki sınırdaki, yansıyan L ve S dalgaları ve iletilen L ve S dalgaları, dalganın çarptığı açıya ve aynı zamanda malzemelerin empedanslarına bağlı olarak farklı genliklerde ve farklı hareket açılarıyla oluşabilir. S dalgaları sıvı içinde hareket etmeyeceğinden, sadece yansıyan L dalgası ve iletilen L ve S dalgaları kalır. Dolayısıyla, belirli uygun koşullar altında dalga tipi değişebilir (Şekil 2.7). Bir L dalgası böyle bir dönüşüm geçirdiğinde, bu durumda bir katı içinde hareket etmekte ve katı ile gaz arasında bir sınıra çarptığında ne olabileceğini şematik olarak göstermektedir [13].



Şekil 2.7. Bir ortamda dalga türlerinin dönüşümü

Bu, sırayla tekrar bir sınıra çarpan ve olayı tekrarlayan farklı dalga türlerinin ortaya çıkmasına neden olur. Bu yolla, her biri kendi hızında ve farklı bir yönde hareket eden çok sayıda yabancı sinyal üretilebilir. Bir alıcıda gözlemlendiğinde, ortaya çıkan sinyalin yorumlanması imkânsız olacak şekilde karıştırılır. İnce veya düzensiz şekilli dalgalar, bu tür karmaşık bir hareket üretmeye özellikle uygundur.

2.6.1. Ultrasonik Dalgaların Açısal Aktarımı

Ultrasonik dalgalar katı ortamdan sıvı ortama geçerken kırılma ve yansıma uğrarlar. Açısal aktarım için temel formül Snell'in yasası ve durumları olarak bilinir. Bu kanuna göre geliş açısının sinüsü ile yansıma veya kırılma açısının sinüsü oranı her iki ortamdaki ses hızlarının oranına eşittir [14].

$$\frac{\sin \theta_L}{c_L} = \frac{\sin \theta'_L}{c'_L} = \frac{\sin \theta'_S}{c'_S} \quad (2.10)$$

Burada:

θ_L =bir ortamda boyuna dalgaların görülme açısı

θ'_L =ikinci ortamda L dalgalarının iletim açısı

θ'_S =ikinci ortamda S dalgalarının yayılma açısı

c_L =birinci ortamda L dalgalarının hızı

c'_L =ikinci ortamda L dalgalarının hızı

c'_S =ikinci ortamda S dalgalarının hızı

2.7. Frekans ve Ultrasonik Dalga Boyu

Frekans, hız ve dalga boyu arasındaki normal ilişki ultrasonik dalgalar içinde geçerlidir.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.11)$$

Burada:

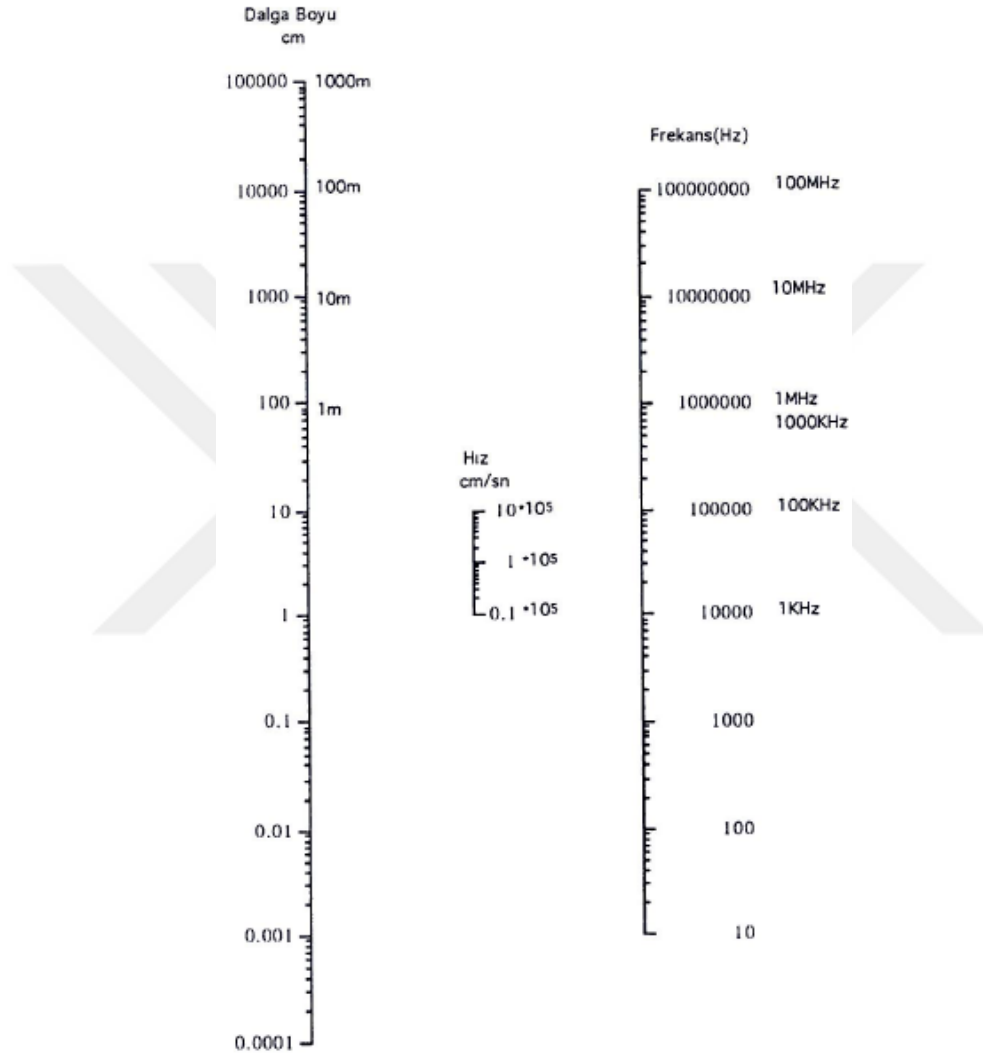
λ = Dalga boyu (m)

c = Hız (m/s)

f = Frekans (Hz)

Titreşim hareketinin tamamlanması için geçen zaman periyot olarak tanımlanır. Birim zamandaki periyot sayısına ise frekans denir. Frekans ve periyot, sesi üreten noktanın titreşim hızı ile ilgilidir ve titreşim hareketi için sabittirler. Aynı titreşim hareketi havanın moleküllerini titreştirerek çevreye yayılırken de frekans ve periyodu hep aynı kalır. Dalga boyu bir periyot zarfında ve ses hızı birim zamanda sesin ortamda yayılım uzaklıkları olarak

ortamın cinsine bağılı büyüklüklerdir. Ses dalgaları her ortamda değişik hızlarda yayılır. Eşitliğe göre ses hızı farklılaştığı zaman yani ses bir ortamdan diğer bir ortama geçerken frekansı aynı kaldığı halde, ses hızı değişeceğinden dalga boyu değişmek zorunda kalacaktır. Böylece dalga boyu ortama göre kısılır veya uzayabilir. Şekil 2.8'de frekans, dalga boyu ve hız için bir abak verilmiştir [11].



Şekil 2.8. Ses dalgaları için frekans, hız ve dalga boyunu veren bir abak [11]

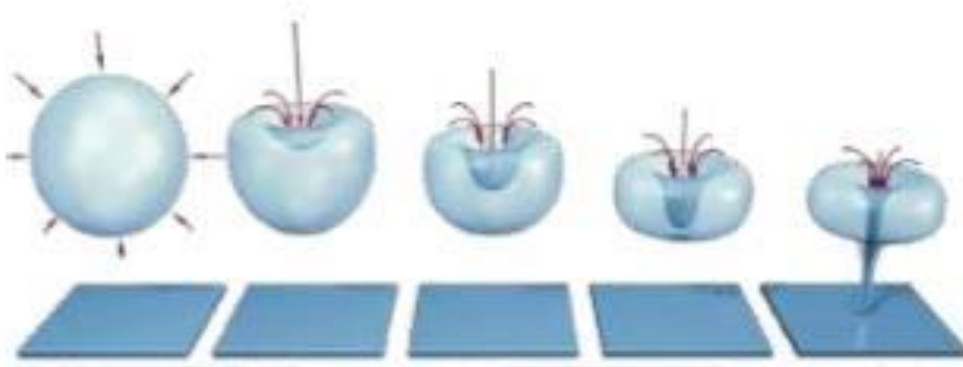
Frekans sadece dalğanın kaynağına hız ise ortama bağılıdır. Dalga boyu, hız ve frekansa göre değişen bağımlı bir değişkendir. Bir dalğanın frekansı ile dalga boyu arasında bağlantı vardır. Boyu artan bir dalğanın, frekansı azalır. Uzun boylu dalgalar düşük frekansa, kısa boylu dalgalar ise yüksek frekansa sahiptir. Bir dalğanın hızı, dalğanın frekansı ve dalga boyuna bağılıdır. Hız artar ise dalga boyu da artar, yani aralarında doğru orantılı bir ilişki vardır.

3. KAVİTASYON OLUŞUMU

Ultrasonik temizleme yapısı, kavitasyon oluşumuyla başlar. Kavitasyon oluşumu uygulanan güce, sıcaklığa, bulunduğu sıvıya göre değişiklik gösteren bir yapıdadır. Kavitasyon, bir sıvı içerisinde, sıvı üzerine etki eden kuvvetler ve değişkenler sonucunda, küçük, içerisinde sıvı bulunmayan bazı boşlukların veya kabarcıkların oluşmasıdır. Bir sıvının hızlı değişikliklere maruz kalması, basıncı sıvı basıncından nispeten daha düşük olan bu özel bölgelerinin oluşumuna neden olur. Sıvının yüksek basıncına maruz kaldığında bu boşluklar şiddetle içeriye çekilip patlayabilir ve bir şok dalgası da oluşturabilirler.

3.1. Kavitasyon

Kavitasyon olarak adlandırılan baloncuk oluşumunda, mikron boyutunda kabarcıklar bir çözeltildeki değişken pozitif ve negatif basınç dalgaları nedeniyle oluşurlar ve büyürler. Bu sürekli artan ve azalan basınç dalgalarına maruz kalan kabarcıklar, rezonans boyutuna ulaşıncaya kadar büyümeye devam eder. Kabarcık patlamasından hemen önce, kabarcığın içinde depolanan muazzam miktarda enerji vardır. Kabarcık temizlenecek yüzeye çarptığında patlama gerçekleşir ve depolanan enerji açığa çıkar. Açığa çıkan enerji kirli yüzeye çarparak temizleme işlemini gerçekleştirmiş olur [13].



Şekil 3.1. Kabarcık patlama oluşumu [10]

Kavitasyon kabarcığı içerisindeki sıcaklık yaklaşık 50000 kPa kadar olan basınçlarla oldukça yüksek olabilir. Basınç, sıcaklık ve hızın bir araya gelmesiyle, kirli kısımları temizlenmek istenen parça üzerinden uzaklaştırır. Kabarcığın doğal olarak küçük boyutundan ve nispeten büyük enerjiden dolayı, ultrasonik temizleme küçük yarıklara ulaşma ve sıkışmış gözle görülemeyen kalıntıları çok etkili bir şekilde çıkarma yeteneğine sahiptir.

Kavitasyon, esas olarak, sıvılardaki basınç artış ve azalışlarından dolayı meydana gelen boşlukların etkisinden kaynaklanan parçaların erozyonunu tarif etmek için bir terim olarak kullanılmıştır. Bu işlem kavitasyon erozyonu olarak adlandırılır ve kavitasyon, sıvılarda var olan gaz ya da buhar olarak meydana gelen boşlukların birleşimi olarak tanımlanır. Boşluklar, sıvıdaki bir basınç düşmesinden kaynaklanır. Kabarcıklar daha sonra basınç arttıkça çöker.

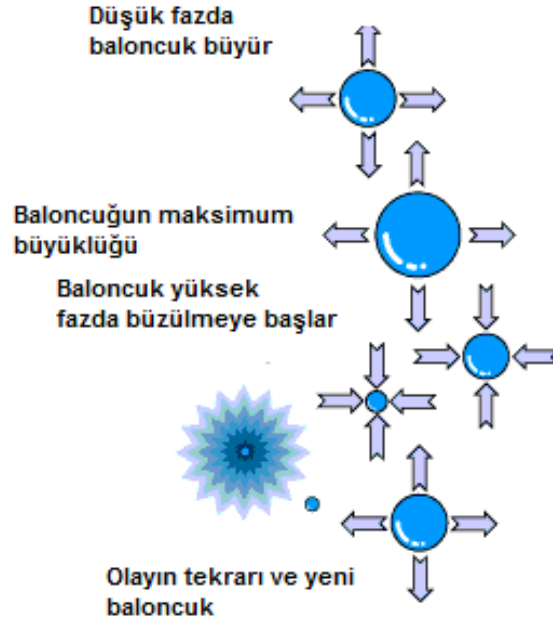
Kavitasyon kabarcıkları 4 şekilde oluşur [28]:

1. Birkaç küçük baloncuk tarafından oluşarak bir araya gelenler
2. Sıvının gazdan arındırılması ile oluşanlar
3. Alternatif basınçlardan dolayı gaz ilavesinden oluşanlar (gaz kavitasyonu)
4. Basınçtaki düşüşten oluşanlar (buhar türü)

Yüksek yoğunluklu dalgaların bir sıvıdan geçmesiyle, kabarcıkların belirli noktalarda toplandığı gözlemlenebilir. Bu kabarcıklar sıvı ortamından atılan gaz nedeniyle görünmektedir. Genel olarak, sıvı ne kadar uçucu olursa, toplanan kabarcıkların hacmi o kadar büyük olur. Bu durumu daha iyi anlayabilmek için hidrostatik basınç araştırmaları yapılabilir.

Kavitasyonu sağlamak için gerekli enerji miktarı deneysel olarak ölçülebilir. Ortamdan atılan gazın tamamen hava olduğu veya bunun çok yüksek bir yüzdesinin hava olduğu bilinmektedir.

Kavitasyon, termal, kimyasal veya mekanik işleme üretilebilir. Ultrasoniklerde kavitasyon üretecektir. Kavitasyon oluşumu küçük olduğunda, sıvı içerisinde çöküşleri büyük yoğunlukta şok dalgaları üretir.



Şekil 3.2. Kavistasyon oluşumu ve tekrarlanması [29]

Kavitasyon, gemi pervaneleri gibi katı cisimleri bile tahrip edebilir veya sıvılarda kimyasal veya başka etkiye neden olabilir. Kavistasyonun matematiksel olarak ele alınması girişimi, ilgili olan viskozite, yüzey gerilimi, sıkıştırılabilirlik vs. konularında da olabilir.

Kavitasyon ultrasonik olarak üretildiğinde, genellikle dönüştürücünün bulunduğu bölgeden başlayarak kabarcık oluşumu ortaya çıkar. Transdüserler yani dönüştürücüler bir noktaya yönlendirildiğinde, kavistasyon odakta görünür. Bu kabarcıklar, enerjinin transdüserden sıvıya iletildiğinin göstergesidir.

Sonik olarak indüklenen kavistasyonun etkileri, özellikle biyolojik ve emülsifikasyon yani emülsiyon veya Türkçe adıyla sıvı asıltı, birbiri içinde çözünmeyen iki sıvının karışımıdır. Bir sıvı (dağılan faz), öbürünün (dağınilan faz) içinde dağılmış durumdadır. Emülsiyon oluşma sürecine emülsifikasyon denir. Genel olarak, çözünmüş gazların sıvının içinden uzaklaştırılmasının etkisi büyük ölçüde azalttığı kabul edilir. Ayrıca, sıvıdaki partiküllerin kavistasyon kabarcıklarını çekirdeğe dönüştürmesi gibi davrandığı da olasıdır. Kavistasyonun başlangıcı sistemin tüm özelliklerinden, yani sıcaklık, hidrostatik, uyarma tipinden, viskozite vb. etkilenir [13].

3.1.1. Kavitasyon Çekirdeği

Birçok deney, bir sıvı içindeki partikül veya kabarcık varlığının, kavitasyonun çekirdeği gibi görüldüğünü göstermiştir. Bu kavitasyon çekirdekleri, sıvıda çatlaklarda veya başka bir yerde kalan az miktarda gazdan veya kendileri de çatlaklara izin veren bir yüzey pürüzlülüğüne sahip yaklaşık 5×10^{-5} ile 10^{-3} cm çapındaki toz parçacıklarından meydana gelebilir. Bu büyüklükteki bu parçacıklar her zaman var görünmektedir.

Akustik bir sinyal meydana geldiğinde, açıkça sıvı yüzeyinin bir hareketine ve bunun sonucunda da bir çekirdek gibi davranan küçük bir kabarcığa neden olur [13].

3.1.2. Kavitasyon Gürültüsü

Kavitasyon gerçekleştikçe, kabarcıkların birbirleri ile çarpışmaları sonucu oluşan ses kavitasyon gürültüsü olarak adlandırılabilir. Kolayca duyulabilen karakteristik bir tıslama gürültüsü gibi bir ses meydana gelir. Frekans arttıkça kavitasyon oluşumu arttığı için duyulan kavitasyon gürültüsü de aynı oranda artış gösterecektir.

3.1.3. Basınçlandırmanın Kavitasyona Etkisi

Basıncıdaki bir artış kavitasyonu baskılayabilir. Basınç, kavitasyon üzerinde bir tür önyargı görevi görür. Bununla birlikte, basıncı arttırmak, kabarcıkların minimum yarıçapının, başlangıç boyutuna oranı ile belirlenen kavitasyon şiddetini arttırmaz [30].

3.1.4. Kavitasyon Şiddeti Ve Erozyon

Ultrasonik temizlemeye uzun süre maruz kalan malzemede kavitasyon erozyonunun oluşması yüksektir. Erozyon oluşma süresi, şiddeti, ultrasonik frekans değerlerine göre ve malzemenin yapısına göre değişiklik gösterir. 20 kHz altı frekanslarda aşınmalar daha kısa sürede ve daha kuvvetli biçimde görülür. Hatta bu kadar düşük frekanslarda çalışıldığında 316Ti paslanmaz çelik malzemeden üretilen temizleme tankı bile zarar görebilir. 316Ti, aşındırıcı sıvıların tanklarında ve saklama kazanlarında, kimya ve petrokimya endüstrisinde, buhar kazanlarında, boya endüstrisinde, gıda tesislerinde ve madencilikte sıklıkla kullanılır. Ancak frekans değeri yüksek olan ve uzun yıllar boyunca kullanılan ultrasonik temizleme tanklarında da kavitasyon sebepli erozyonlar meydana gelir.

Bu sebeplerden dolayı temizlenecek parçaların özelliklerine göre frekans değerleri belirlenmelidir. Ancak genel olarak yüksek frekanslarda kavitasyon kabarcıklarının oluşumu küçük olduğu için patlama şiddetleri de boyutlarına oranla küçük olacaktır. Bu küçük patlayan kabarcıklar hem erozyona sebebiyet vermezler hem de ulaşılması zor olan yerlerin

temizliğinde daha etkili olurlar. Kavitasyon erozyonuna uğramış metal bir malzeme örneği Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Kavitasyon erozyonunun metal malzeme üzerindeki etkisi

3.1.5. Kavitasyon Oluşumunda Temizleme Sıvısı

Kavitasyon oluşumuna su içindeki çözülmüş gazların olumsuz etkisi vardır. Su içerisinde bulunan oksijen miktarı; atmosferde bulunan oksijenin kısmî basıncına, suyun sıcaklığına ve sudaki mineral yoğunluğuna bağlıdır. 0 °C'de suda en fazla 14,63 mg/L oksijen çözünebilirken, 30 °C'de 7,57 mg/L çözünebilmektedir [35]. Kavitasyon baloncuğu büyüme fazında iken sıvı içindeki çözülmüş gazlar baloncuğa gelirler ve bunlar istenilen ultrasonik etki için gerekli olan güçlü patlamalara engel olurlar. Sıvı içindeki çözülmüş gazların miktarı sıcaklık arttıkça azalır. Sıvının yüzey gerilimi yükseldikçe minimum kavitasyon oluşabilme enerjisi de artar. Ancak bu durumda da kabarcık patladığında daha fazla şok dalga enerjisi meydana getirir. Saf suyun yüzey gerilimi 75×10^{-5} N/cm civarındadır, oda sıcaklığında kavite zor oluşturulur. Ancak sıvıya yüzeyde aktif bir kimyasal malzeme (deterjan, solvent) katıldığında yüzey gerginliği 30×10^{-5} N/cm ye düşer ve kavite oluşturabilir. Sıvının buhar basıncı düşük olduğu zaman, soğuk suda olduğu gibi kavite üretimi zordur; fakat sıcaklık arttıkça buhar basıncı gitgide yükselir [2].

Arıtılmış su yüksek kaliteli temizlik için aşağıdaki sebeplerden dolayı önemlidir [26].

- İçindeki minerallerin tamamı ya da çoğu giderildiği için temizlenecek parçadaki mineralleri içine almaya hazırdır (çoğunlukla parçanın yüzeyindeki pisliklerden arındırmak amaçlı).

- Öyle aktif bir temizleyicidir ki deterjanlı ya da deterjansız ultrasonik temizlik için mükemmeldir.
- Arıtılmış su parçanın üzerinde hiçbir artık bırakmaz, böylece parça kurduktan sonra üzerinde leke olmaz.
- Deterjanla karıştırılırsa kesinlikle iyi bir temizleme sonucu verir.
- Durulama fazında parça üzerinde kalmış deterjan ve sabun artıklarını yok eder.
- Deterjan ya da diğer temizlik maddeleri arıtılmış su ile daha iyi bir çözelti oluşturur. Temizleme kalitesi artar ve deterjan ziyan olmadan maksimum verimlilikle kullanılır. Bu nedenlerden dolayı ultrasonik temizlemede ve durulamada mümkün olduğunca saf su kullanılmalıdır.



4. ULTRASONİK KULLANIM İÇİN KRİSTALLER

Ultrasonik dalgaların üretiminde yaygın kullanılan birkaç yöntem vardır. Bunlardan en önemlilerinden birisi piezoelektrik yöntemdir. Diğer birisi ise magnetostriktif malzemelerdir. Manyetostriktif malzemelerin temel çalışma mantığı; magnetostriktif malzemenin etrafına sarılan bobinden elektrik akımı geçirilerek oluşturulan manyetik alanın istenilen malzeme uzamasını vermesi şeklindedir. Ultrasonikte piezoelektrik malzemelerin daha yaygın kullanılmasının önemli nedeni magnetostriktif malzemelerin tepkilerinin geç olmasıdır [36].

4.1. Kristal Türleri

Kristallerden malzemelerden elde edilen piezoelektrik etkisi, bazı ultrasonik çalışma türlerinde büyük öneme sahiptir ve bu nedenle yaygın kullanılırlar. Ancak, manyetostriktifte yöntemi de yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. İlk etki, birkaç doğal ve yapay kristalde meydana gelir ve kristal yüzlerine bir elektrik yükü uygulandığında kristalin boyutundaki bir değişiklik olarak tanımlanır. Burada göz önünde bulundurulmak üzere elektriksel etki piezoelektrik altına dâhil edilmiştir. Elektrostriktif, elektriksel yer değiştirmenin karesiyle orantılı olan bir şekil değiştirme anlamına gelir. Baryum titanat gibi kristaller bu etkiyi belirgin derecede gösterirler. Polarize olduktan sonra piezoelektrik sınıfına dâhil edilebilirler.

Geçmişte kuvars kristalleri, sanki yalnızca katı ve sıvılarda ultrasonik titreşimler üretmek için kullanılırdı. Halen düşük güçlerde gönderme ve alma için yaygın olarak kullanılmaktadırlar ve bu nedenle ilk önce onlarla ilgili açıklamalar yapılacaktır. Yüksek voltajlar kullanılması gerektiği için tutucu tasarımıyla ilgili oluşan sorunlardan dolayı bu sistem katılarda tam olarak başarılı şekilde kullanılamamıştır.

Özellikle, transdüser ile katı bir ortam arasında temas olabileceği veya büyük gücün önemli olmadığı durumlarda, yüksek frekanslarda yapılan ultrasonik çalışmalarda, kuvars kristalleri ultrasonik temizleme endüstrisinde halen çok yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Kuvars kristalleri, bir elektriki voltaj uygulandığında ultrasonik bir dalgayı genişletme ve iletme özelliğine sahiptirler ve ayrıca mekanik olarak titreştiğinde de bir elektrik sinyali üretebilecek yapıdadırlar. Kuvars ve diğer kristaller, birçok sualtı tespit ve sinyal cihazlarında, dinleme sistemi ve derinlik bulma cihazlarının üretiminde cihazın ana unsurlarından birisi haline gelmiştir.

Ultrasonik üretiminde kullanılan Rochelle tuzundaki piezoelektrik etkisi, kuvarstaki etkisinden oldukça fazladır. Bununla birlikte, hassasiyeti yüksektir ve bu nedenle kuvarstan daha fazla kırılma ve hasara maruz kalabilirler. Bu nedenle, kullanım sırasında daha az tercih edilmektedirler.

İkinci Dünya Savaşı sırasında, özellikle denizaltı çalışmaları için yapay kristaller geliştirilmiştir. Daha yakın zamanlarda, baryum titanat ve lityum sülfat endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmıştır [17].

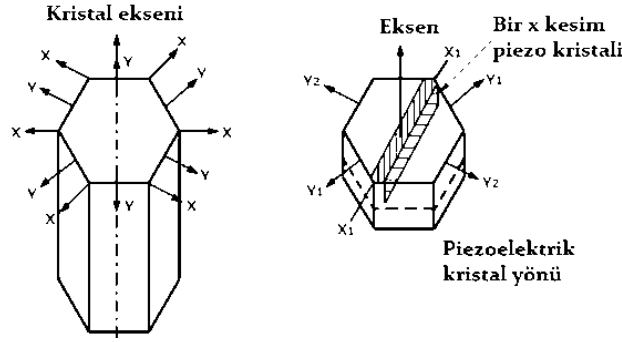
Her açıdan (dayanıklılık, ekonomi, üretim kolaylığı ve basitlik bakımından) kuvars kristali, ultrasonik uygulamalar için seçilebilecek tüm üretim maddelerinden en çok tercih edilenlerden birisidir. X-kesim (Şekil 4.4.) kristali en çok kullanılanlardan birisidir. Çünkü, kuvars kristalinin x-kesimi L dalgalarının oluşmasına sebep olur. Ultrasonik temizlemede su içerisindeki kavitasyon oluşumunu da L dalgaları oluşturur. Kayma dalgalarının üretimi için Y-kesimli kristaller kullanılır; ancak bu tür dalga hareketi, kayma esnekliği olmayan sıvılar veya gazlar arasında hareket etmeyecektir. Ayrıca katı maddelerle kullanım için, kesimler işe özel yöntemlerle yapılmalıdır. Bu nedenlerden dolayı Y-kesim kristalleri yaygın olarak kullanılmaz [13].

4.1.1.Kuvars Kristali

Kuvars değimi, anlamı bilinmeyen eski Almanca bir kelimedenden gelmez. Kimyasal formülü Silisyum dioksit (SiO_2) olan kuvarsın, kristal yapısı trigonaldir. Kuvars kristalinin, orijini püskürük kayaç olup, birçok püskürük ve metamorfik kayaçlar içinde, özellikle granit ve gnaylarda bulunurlar. Kuvar kristalleri, doğada çoğu kez damarlar halinde bulunurlar. Olivin hariç, diğer bazı önemli minerallerle bir arada görülmektedirler [21].

Püskürük ve metamorfik kayaçların ayrışarak dağılmaları sonunda serbest hale gelen kuvars kristalleri saf halde iken renksiz ve saydamdırlar. Buna karşılık, bileşimlerine yabancı bazı maddelerin, örneğin, çok az miktarda maden oksitler ve hidrokarbürlerin girmesiyle, kuvarlarında bazı renkler oluşmaktadır. Bazen de, yapılarında sıvı halde karbondioksit (CO_2) enklüzyonları bulunmaktadır. Bunun kuvars içerisindeki miktarının artmasıyla kuvarların renkleri donuklaşırlar [21].

Doğal kuvars, son derece dayanıklı bir malzemeledir. Kristal, genellikle her iki uca da bir piramit takılı altı altıgen bir prizma şeklinde bulunur. Bu prizmaların noktaları bir çizgiyle birleştirilirse, bu çizgi kristal ekseni veya Z ekseni olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Piezoelektrik kristalin X-Y eksenleri [31]

X eksenlerine elektriksel olanlar denir ve kristalin karşı köşelerinden geçen çizgilerle tanımlanır. Bu nedenle, her bir doğal kuvars parçasının üç X eksenli vardır. Y eksenleri, şeklin kenarlarına diktir. Bu eksenlerin her ikisi de Z veya optik eksene diktir.

Kristaller, montaj yapılırken paralel yüzlere sahip olmalı ve her türlü yonga veya çatlaktan arındırılmalıdır; aksi takdirde serbestçe titremezler. Optik zımpara ile temizlemek genellikle ultrasonik için yeterli ve uygun olmaktadır.



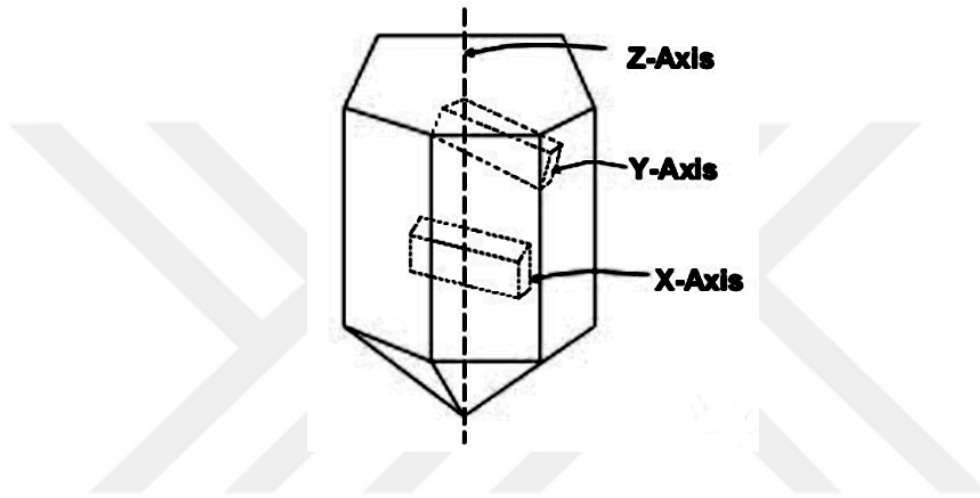
Şekil 4.2. Kuvars kristal örnekleri

4.1.2. Kuvars Kristali Kesimi ile Titreşim İlişkisi

Piezoelektrik etki gösteren kristaller arasında ($BaTiO_3$, PZT) en yaygın olarak kuvars kristalleri adı ile bilinirler. Bunun nedeni, doğada fazla miktarda bulunmaları ve maliyet açısından ucuz olmalarıdır.

Bir kristalin piezoelektrik özellikleri, kesimlerine bağlıdır ve kuvars kristali piramit yapısında üç eksene sahiptir. Bunlar;

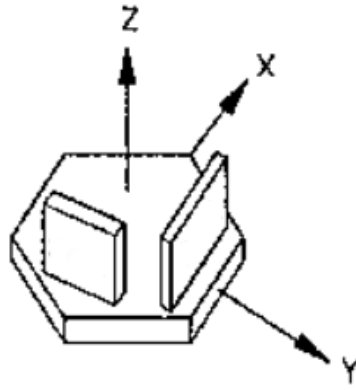
- Optik eksen olarak bilinen Z ekseni,
- Elektrik ekseni olarak bilinen X ekseni ve
- Şekil 4.3'de gösterildiği gibi mekanik eksen olarak bilinen, (mekanik baskı sonucu elektrik enerjisi üretimi fazla olan) Y eksenidir.



Şekil 4.3. Kuvars kristali ve eksenleri [32]

Her kuvars kristali sarkaç gibi doğal bir frekansa sahiptir. Bu nedenle, f frekansı kristal kalınlığı ile ters orantılıdır. Kristal ne kadar ince olursa, doğal frekansı o kadar yüksek olur, tersi durumda da düşük olur. Bununla birlikte, aşırı ince kristaller, titreşimlerden dolayı hasar görüp kırılabilirler. Bu durum, bazı yüksek frekansların üzerine çıkılmaya engel oluşturur ve yüksek frekanslar için bir sınır koyar.

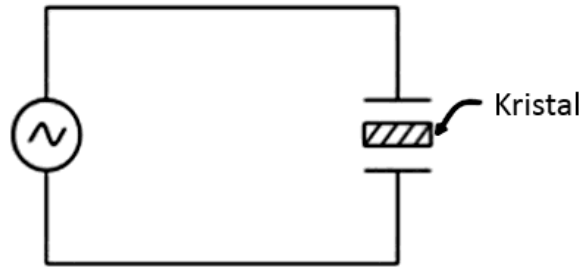
Kuvars kristalinin kesimi titreşim yönü açısından önemlidir. Kristal kesimi gerçekleştirildikten sonra kristal yapısında değişiklikler meydana gelir. Kristal bu kesimin sonunda optik, kimyasal ve fiziksel olarak farklılaşır.



Şekil 4.4. Kuvars kristali x ve y kesim örneği

Bir kristal X veya Y yönünde kesildiğinde, X eksenindeki basıncın o eksene dik kristal yüzeylerde bir yük oluşturma özelliği vardır. Bu uzunlamasına doğrudan etki olarak bilinir. Enine doğrudan etki ise, X eksenine üzerine etki eden basıncın üreteceği aynı yükleri üretecek, ancak, Y eksenindeki gerginliğin bir sonucu olarak bu üretim meydana gelecektir.

Kristal, elektronik bir devrede kullanılması için iki metal plaka arasına yerleştirilir. Şekil 4.5'de gösterildiği gibi dielektrik olarak kristal ile bir kapasitör oluşturur. Plakalara AC voltajı uygulanırsa, kristal uygulanan voltajın frekansında titreşmeye başlar. Bununla birlikte, uygulanan voltajın frekansı, kristalin doğal frekansına eşit yapılırsa, rezonans gerçekleşir ve kristal titreşimleri maksimum bir değere ulaşır.



Şekil 4.5. Kristale doğrudan voltaj uygulaması [17]

Bir kristalin rezonans frekansında titremesi veya salınması teorik olarak gerekli değildir. Kristaller ne olursa olsun herhangi bir frekansta sürülebilir, ancak rezonansta kristal salınımının genliği o kadar fazladır ki kristaller bunu yapmak için kesin bir neden olmadıkça başka herhangi bir frekansta nadiren kullanılır. Örnek olarak, çalkalamada nispeten yüksek frekanslarda kalın plakalar gerekebilir. Böyle bir durumda düşük frekanslı bir kristal daha yüksek bir harmonik frekansta çalıştırılır. Benzer şekilde, yüksek frekanslı kristaller düşük

frekanslarda sürülebilir. Bu genellikle, bir kristalin doğal ya da rezonansının altındaki tüm frekans gruplarını kapsayan bir aralıkta sürüldüğü rezonans çalışmasında yapılır.

Kuvars ile temas halinde bulunan herhangi bir malzeme, sönümlemeyi arttırır, yani; kristalde bulunan boşluğun ayarını genişletir. Bir kristaller, kesime bağlı olarak farklı yönlerde veya şekillerde titreşirler. Çünkü kesime bağlı olarak kristal üzerinde boşluklar meydana gelmektedir. Bu durum Şekil 4.6 'nın incelenmesiyle anlaşılabilir.



Şekil 4.6. Kristalin kesim yönüne göre hareketi [13]

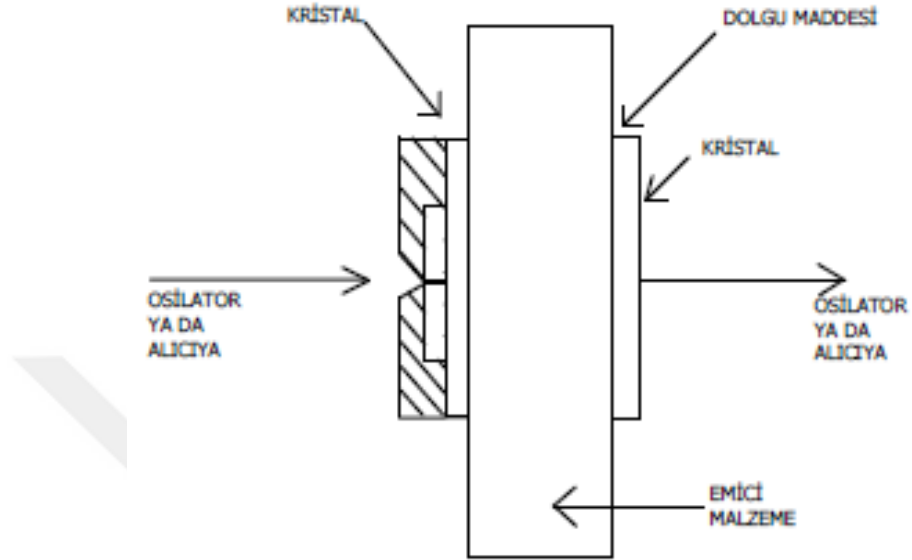
Şekilde, ilk çizim bir Y-kesimli kristalin titreşim şeklini ve ikincisi de bir X-kesimli kristalin titreşim şeklini göstermektedir. Kristal, genellikle belirsiz aralığı olan herhangi bir harmonikte salınım yapabilir. Harmonik titreşimde, daha da karmaşık desenler ortaya çıkmaktadır.

Kristaller, bunu yapmak için tasarlanmış olsalar bile, normalde sadece bir yönde titreşmezler. Bu nedenle, X yönünde titreşen bir kristalin kenarları boyunca sert bir şekilde sabitlenmemesi gerekir. Çünkü bu durumda titreşimleri kuvvetle sönümlenir. Bu nedenle kristaller normalde titreşimlerin gerçekleştiği boyut dışındaki tüm boyutlarda rahat salınım yaparlar. Bu, sabitleme parçasının dikkatlice tasarlanmasıyla gerçekleştirilebilir. Rezonans ölçümlerinde, tam tersi doğrudur. Çünkü sadece bir dalga tipinin var olmasına izin verilmelidir. Bu nedenle kristal, diğer tüm tip salınımların önleneceği şekilde sabit bir şekilde sabitlenir.

4.2. Ultrasonik Aktivite için Kristalleri Test Etme

Kristal için testler, ultrasonik aktivite için kristal içindeki boşlukları test etmek amacıyla uygulanır. Bir kristal, osilatör kontrolünün deneyleri için iyi bir etkinliğe sahip olabilir. Ancak gerçek fiziksel titreşim, ultrasonik dalgaların yayılması için yeterince yüksek olmasını sağlayacak kadar büyük olmayabilir.

Bu nedenle ultrasonik çıkış için kristallerin test edilmesi gereklidir. Bunlar, ultrasonik jeneratör ve alıcı olarak kullanılan deneyler ile yapılabilmektedir. Şekil 4.7'de kristal testinin yapılışı gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Kristal testi uygulaması

Kristallerin montajında meydana gelen ve test edilen boşluk, yüksek derecede emici karaktere sahip bir ortamda ultrasonik enerji göndermek için bir verici olarak kullanılır. Parçanın karşı tarafına sabit bir kristal yapıştırılır ve alıcı olarak kullanılır. Bu alıcı kristal, daha sonra uygun bir radyo frekanslı amplifikatöre bağlanır ve bu amplifikatörün çıkışı, kalibre edilmiş bir gücü çalıştırmak için kullanılır.

5. ULTRASONİK ÜRETİMİ VE ÜRETİME ETKİ EDEN FAKTÖRLER

5.1. Ultrasonik Üretimi

Ultrasoniği yani sesi üretmek için her zaman bir titreşim kaynağına ihtiyaç vardır. Bu duruma günlük hayatımızdan örneklerde verilebilir. Örneğin, bir davula vurulduğunda vurmanın şiddetiyle ortamda titreşimler oluşur ve biz bu oluşan titreşimleri ses olarak algılarız. Yani ses mekanik bir enerjidir.

Yüksek frekanslı ultrasonik üretim için en yaygın ve en basit yöntem manyetostriksiyon veya kristal transdüserlerin yani piezoelektriğin kullanılmasıdır. Bu yöntemler manyetrostriktif etki ve piezoelektrik etki olmak üzere anlatılacaktır.

5.1.1. Piezoelektrik Etkisi

Mekanik basınç veya gerginlik uygulandığında belirli kristallerin elektrik yükü oluşturacağı gerçeği 1880'de Curie kardeşler tarafından keşfedilmiştir. Bu olay daha sonra piezoelektrik etki olarak adlandırılmıştır. Deneyleri, mekanik basınç ile ortaya çıkan enerji arasında doğrudan bir orantı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, basınç gerilime geçtiğinde veya bunun tersi gerçekleştiğinde yükün işaretinin değiştiği görülmüştür [19].

Kısaca piezoelektrik bir malzemenin mekanik enerjiyi elektrik enerjisine, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmesine denilir. Piezoelektrik elementlerinin kalınlığı oluşan ses dalgalarının frekansını belirler.

$$f = \frac{c}{2.d} \quad (5.1)$$

Burada:

f =Frekans

C =Ses Hızı

d =Kristal Kalınlığı



Şekil 5.1. Piezoelektrik etkisi

Piezoelektrik etkisi birçok kristal türünde bulunur. Ancak en çok kuvars ve Rochelle tuzunda en iyi sonuç alındığı gözlemlenmiştir. Kuvars kristallerinin kutupsal eksenini, maksimum yükün görüneceği yöndür. Bu nedenle piezo eksenini olarak da adlandırılır. Bu eksen kristal döndürülerek tanımlanabilir.

Gerilim, basma ya da çekme olarak değiştirildiğinde, etkinin işareti değişir. Bu nedenle, kristale yüksek frekansta alternatif bir yük uygulanırsa ve kristal bu frekansta salınacak şekilde uygun olarak tasarlanmışsa, uygulanan frekansta titreşir. Kristalin yüzleri birbirine göre hareket edecektir ve eğer bir yüz diğer bir yüzeyin üzerine bastırılırsa, ultrasonik dalgalar üretilecek, ortama girecek ve sonra o ortamın içinden geçecektir.

Belirtildiği gibi, bir kristal uygun boyutta bir sıkıştırma veya genişlemeye maruz kaldığında, üzerinde bir elektrik yükü belirir. Bu yük, basınçla doğrudan orantılıdır.

Beliren yük miktarı, deneysel olarak ölçülen piezoelektrik modül olarak bilinen kristalin bir özelliği ile de belirlenir.

Eğer δ kuvars için modül ise,

$$\delta = 6.32 \times 10^{-2} \text{esu/kg} \quad (5.2)$$

Burada:

δ : Kuvars Modülüdür.



Şekil 5.2. Piezoelektrik dönüştürücünün yapısı ve montajı [6]

Bununla birlikte, yük, hem kuvvet hem de modülle orantılı olmasına rağmen, gerçekte kristal kalınlığından, sıcaklığından ve montaj sırasında oluşan boşluktan bağımsızdır. Başka bir deyişle, temel ilişki, alan yoğunluğunun doğrudan zorlanma ile ilgili olmasıdır. Bu durum iyi etkiler yaratmaktadır, çünkü sıcaklık veya çevresel farklılıklar pratik çalışmalarda sıklıkla ortaya çıkmaktadır ve bu faktörlerin neden olduğu ultrasonik enerjideki değişimin minimum olması tercih edilir.

Piezo aktivitesi, 20°C ila 300°C sıcaklıkları arasında pratik olarak sabittir, fakat bu üst sınırın üstünde, piezoelektrik modül, keskin bir şekilde etkinliğini kaybeder. Modülün maksimum değeri yaklaşık 200°C'de gerçekleşir. Yaklaşık 579°C'de, bu piezoelektrik etkinin tümü durur. Kristaller ani bir aşırı ısı altında kullanılmamalıdır, yavaş yavaş ısıtılmalıdır, kuvars kristali aksi halde paramparça olur.

5.1.2. Manyetostriktif Etkisi

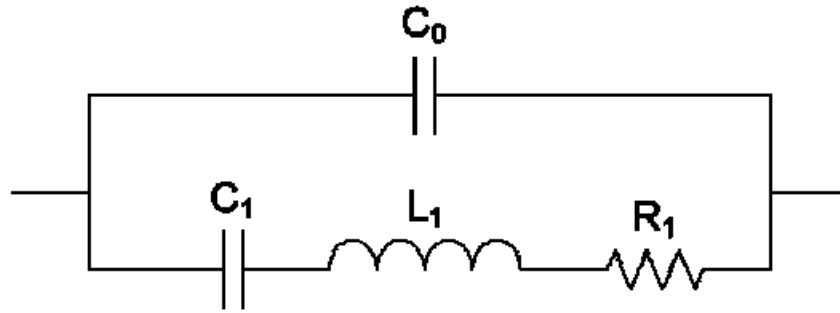
Manyetostriktif etki: Manyetik alana maruz kaldıklarında demir, kobalt, nikel ve bazı alaşımlar gibi bazı ferromanyetik malzemelerin doğrusal boyutlarındaki değişimi kullanırlar. Burada yine, alan polaritesinin tersine çevrilmesine doğrusal boyutlardaki değişiklik eşlik eder ve alternatif bir manyetik alan alternatif büzülme ve malzemenin genişlemesini üretir. Hem manyetostriktif hem de piezoelektrik transdüserler, doğal frekanslarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır, böylece belirli bir güç seviyesinde maksimum

salınım genliği sağlanabilir. Manyetostriktif etki yalnızca düşük frekanslarda verim sağlayabilir.

5.2. Rezonans ve Antirezonans

Salınım yapan bir sistemin doğal frekansı ile aynı frekansta kuvvet uygulanarak salınımın genliğinin artması olayına rezonans denir.

Bir kristalin eşdeğer devresi L, C ve R değerlerinden oluşur. Kristallerin doğası gereği, bu yalnızca sınırlı frekans aralıkları için mümkündür ve her titreşim modu için (veya devrede sabitler için son farklı değerlerde) gereklidir.



Şekil 5.3. Bir kristalin eşdeğer devresi[1]

Burada;

C_0 = Rezonans frekans altında, ultrasonik dönüştürücünün statik kapasitansı,

R_L = Mekanik kayıpların neden olduğu değişken rezistans

C_1 = Mekanik devrenin kapasitansı

L_1 = Mekanik devrenin endüktansı

Kristal düşük iç empedanslı bir jeneratör tarafından etkinleştirilirse, iki frekansta, seri ve paralel rezonans (rezonans karşıtı) titreşir.

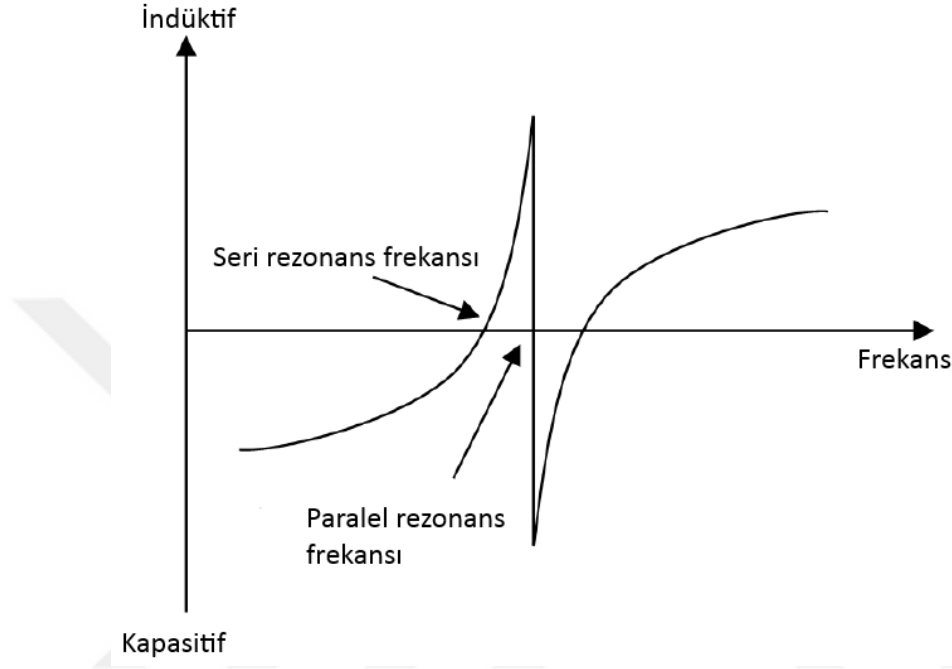
Seri rezonans;

$$\omega_s = 2\pi f_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(1 + \frac{R^2 C_1}{2L} \right) \quad (5.3)$$

Paralel rezonans;

$$\omega_p = 2\pi f_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(1 + \frac{C}{2C_1} - \frac{R^2(C_1+C)}{2L} \right) \quad (5.4)$$

Başka bir deyişle $\frac{C_1}{C}$ küçüldükçe, iki rezonans frekansı birbirine yaklaşır. Kuvars için $\frac{C_1}{C}$ 100'ün üzerindedir; Rochelle tuzu ve diğer yapay kristaller için bu çok daha azdır. Paralel rezonans için direnç sıfır olsaydı seri reaktansı sonsuz olurdu. Seri reaktans eğrisinin şeklinin nedeni budur.



Şekil 5.4. Seri - paralel rezonans frekans eğrisi

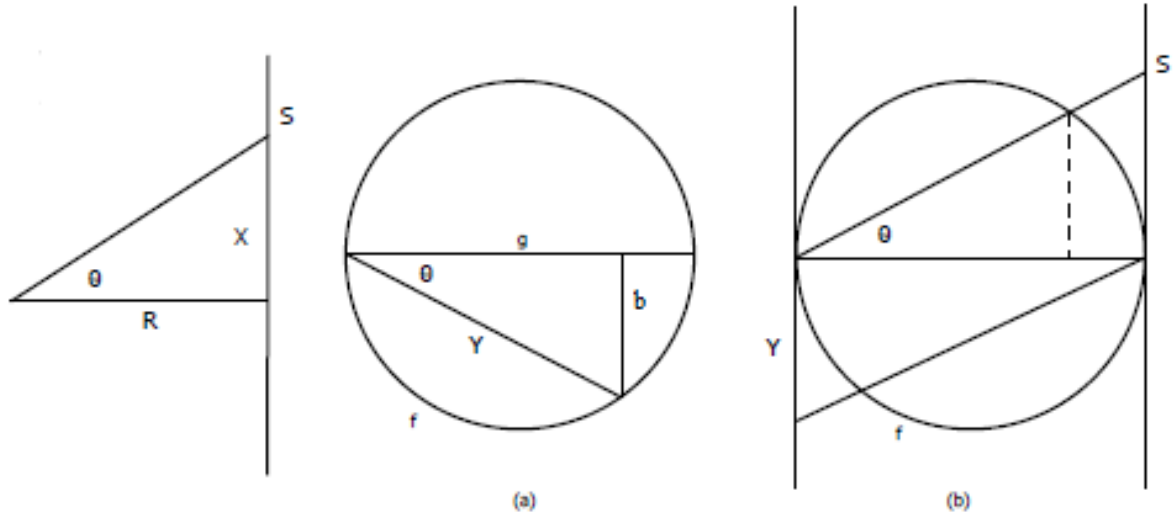
30 MHz altındaki kristaller, seri ve paralel rezonans frekansları arasındaki herhangi bir frekansta çalıştırılabilir. Bu, çalışma sırasında indüktif oldukları anlamına gelir. 30 MHz'in üzerindeki yüksek frekans kristalleri, genellikle temel frekansın katlarında meydana gelen rezonans frekans serisinde veya fazla ton frekanslarında çalıştırılır. Kristal frekansı, yük kapasitansı değiştirilerek ayarlanabilir [25].

Kristal özellikleri çeşitli yöntemlerle ölçülebilir. Bir sinyal üretici ve osiloskop aracılığıyla rezonans ve antirezonans noktaları ölçülür. Genel olarak hiçbir hesaplama gerekli değildir, çünkü bu kendi başına istenen bir bilgidir. Bununla birlikte gerekirse, piezoelektrik özellikler elde edilebilir.

5.3. Çember Diyagramı

Rezonatörlerin empedansları dairesel bir alan ile temsil edilebilir. Bu, sınırlı bir frekans aralığındaki (veya R, L ve C için bir eşdeğer devre değer grubu) işlemi temsil eder. Şekil 5.5'te a empedansı ve Şekil 5.5'te b girişini temsil eder. R, frekans değıştikçe sabit kalır,

ancak X değişir ve Z de değişir. Benzer şekilde g (iletkenlik) sabit kalır; b ve Y sıklığa göre değişir.



Şekil 5.5. Çember diyagramları, R, L, C seri halinde; giriş ve empedans birlikte

Şekilde, $Y = \cos \theta / R$ 'nin, $1 / R$ çapında bir dairenin denklemi olarak gösterilebilir. Uygun ölçek değerleri kullanılarak, iki diyagram üst üste getirilebilir.

5.4. Sıvı Ortamda Sıcaklığın Ultrasonik Üzerinde Etkileri

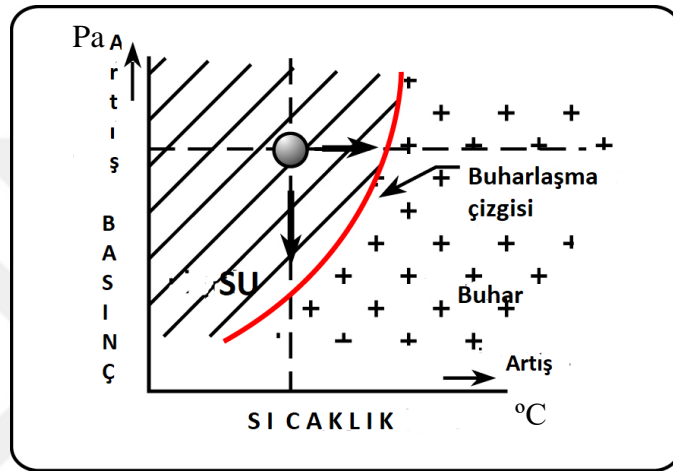
Sıcaklık değişimlerinin kavitasyonu etkileyen diğer parametrelerle ilişkisi vardır. Frekans ve kavitasyon oluşumu ters orantılıdır. Yüksek frekansta çok kavitasyon oluşumu gözlenir, düşük frekansta ise elde ettiğimiz az miktardaki kavitasyonun büyüme oranları fazladır. Bu yüzden patlama etkileri de daha güçlü olur. Ancak iki farklı frekansta da aynı sonucu elde ederiz. Kavitasyonun büyüklüğünü ve patlama şiddetini belirleyen diğer bir faktör ise boşluğun içerisindeki gaz ve buhar miktarıdır. Frekansta olduğu gibi burada da ters orantı mevcuttur.

Sıcaklık kavitasyon miktarını arttırmak için en önemli faktördür. Sıcaklığın artmasıyla sıvı içerisinde bulunan gaz miktarı azalır ve kavitasyon oluşumu artar. Ancak sıcaklığın kaynama noktasına doğru artmasıyla kavitasyonun içi buhar ile dolmaya başlar ve bu durumda kavitasyonun patlama şiddetinin azalmasına neden olur.

Bir sıvıyı kaynatmanın iki yolu vardır. İlk yol, basıncı sabit tutup sıcaklığı buhar kabarcıkları üretecek kadar arttırmaktır. Şekil 5.6'da, sabit basınçta su tarafında bir nokta alınır ve sıcaklığı yükselttilerek yatay hareket ettirilirse sonunda, suyun buharlaşma hattına çarpar ve

sıvı kaynar veya buhar kabarcıkları üretilmeye başlanır. Gerçekte, bu olayı bir tencere suyu kaynattığımızda yapmaktayız [22].

Bir sıvıyı kaynatmanın diğer bir yolu sıvı üzerindeki basıncı düşürmektir. Sıcaklığı sabit tutar ve basıncı düşürürsek, su belli bir basınçtan sonra kaynar ve buharlaşma başlar. Çünkü kaynama sıcaklığı aynı zamanda basınca bağlıdır. Şekil 5.6'da, su tarafında bir nokta alırsanız ve basıncı düşürerek düşey olarak (sabit sıcaklıkta) hareket ederseniz suyun buharlaşma hattına geçersiniz ve sıvı, buhar kabarcıkları oluşturup kaynamaya başlar.

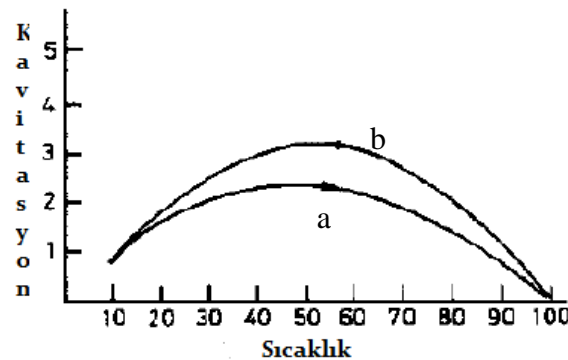


Şekil 5.6. Buhar basıncı ve sıcaklık

Temizleme işlemlerinde, su en etkili şekilde yaklaşık 60°C'de kaviteyona yapar; Öte yandan, bir kostik / su çözeltisi, kimyasalların yüksek sıcaklıktaki artan etkinliği nedeniyle yaklaşık 82°C'de (180°F) en etkili şekilde temizleme yapar. Solventler, kaynama noktalarının altındaki (en az 6°C=10°F) sıcaklıklarda kullanılmalıdır [9].

Sıcaklığın, kullanılan musluk suyundaki kaviteyona etkisi Şekil5.6'da daha açıkça gösterilmektedir. Sıcaklığın 55°C'ye yükseltilmesi, kaviteyona yoğunluğunda benzer bir artışa yol açar. Suyun kaynama noktasına doğru sıcaklıktaki daha fazla artırılması, buhar basıncındaki artıştan kaynaklanan kaviteyona yoğunluğunda bir azalma olduğunu gösterir. Ayrıca dikkat çeken, su kaynama noktasına ulaştığında ve daha sonra tekrar 50°C - 60°C'ye soğutulduğunda ortaya çıkan histerisizdir. Yani, sisteme dönüşümlü olarak azalan ve artan bir sıcaklık uygulandığında bu durumu histerisiz olarak tanımlayabiliriz. Şekil 5.6'daki üst eğri, ilk önce kaynayan ve daha sonra soğutulup sonra tekrar kaynatılan suyun göstergesidir. Bu eğriden anlayacağımız; ikinci defa kaynayan sudaki (Şekil 5.7. b) buhar miktarının ilk

kaynama haline göre (Şekil 5.7. a) çok az olduğudur. Yani su buhardan arındırılmış bir şekilde tekrar kaynatıldığında kavitasyon etkisinin arttığı görülür.



Şekil 5.7. Sıcaklığın musluk suyunda kavitasyona etkisi ve histerezis etkisi

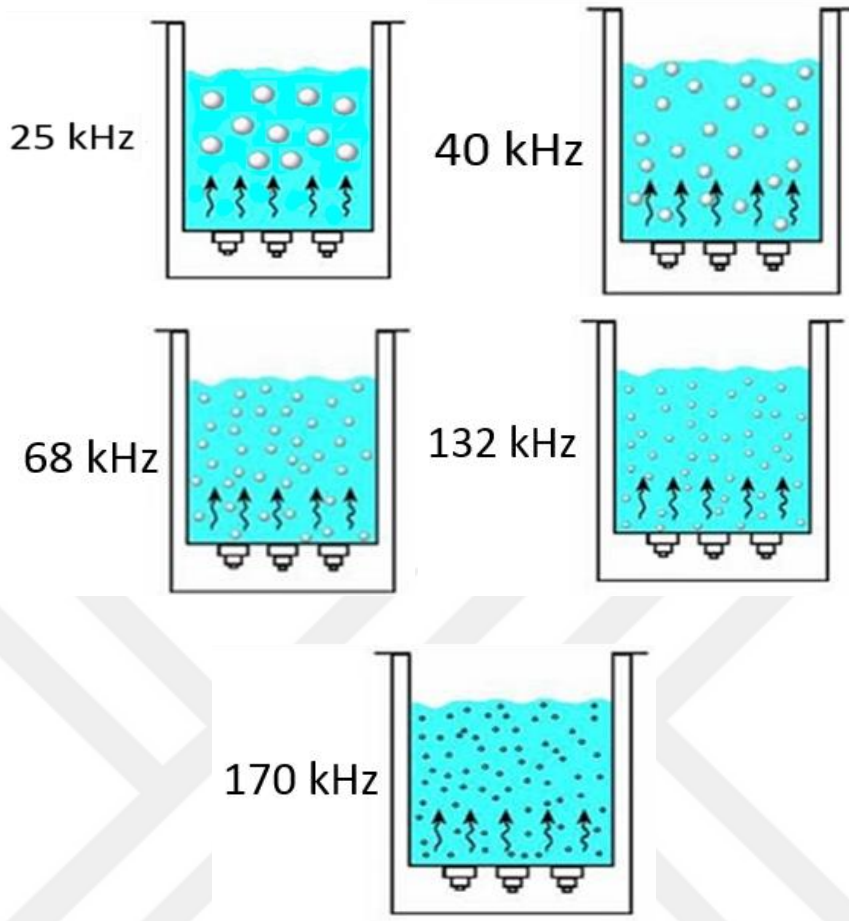
Çizelge 5.1. Farklı su çeşitlerinde ultrasonik etkilerinin ölçümü [27]

SIVI	PARAMETRELER	BAŞLANGIÇ	Citric acid+Na-Dodecyl	ÖLÇÜMLER						
				3dk	5dk	10dk	15dk	20dk		
SAF SU	O ₂ (mg/lit)	9,63	9,58	Ultrasonik	3,8	4,44	4,28	4,54	4,77	4,9
	İletkenlik(µS)	73,5	1756							3,6
	pH	6,46	2,37							5,87
	Sıcaklık (°C)	19,8	19,8							20,9
KAYNAMIŞ SU	O ₂ (mg/lit)	3,14	5,13	Ultrasonik	3,26	3,56	3,87	4,25	4,54	4,92
	İletkenlik(µS)	97,4	1677							3,63
	pH	9,41	2,38							5,9
	Sıcaklık (°C)	19,9	19,9							21
ŞEBEKE SUYU	O ₂ (mg/lit)	10,13	9,92	Ultrasonik	3,71	4,08	4,25	4,35	4,44	4,84
	İletkenlik(µS)	240	1781							3,72
	pH	6,7	2,41							5,77
	Sıcaklık (°C)	19	19,4							20,8

Çizelge 5.1 de verilen değerlerde ultrasonik temizliğin en iyi etkiyi saf suda gösterdiği görülmüştür. Ancak deneylerde erişim ve maliyet kolaylığı sağladığı için şebeke suyu kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

5.5. Frekans Değişkenliğinin Ultrasonik Üzerindeki Etkileri

Kavitasyonun büyüklüğü ve şekli frekansın bir fonksiyonudur. Frekans arttıkça, kavitasyon azalır ve kavite boyutu küçülür. Bir sıvının tamamen parçalanmasıyla gaz veya buharla doldurulmuş boşlukların yani kavitasyon baloncuklarının üretilmesi belli bir süre sonra gerçekleşir. Yüksek frekanslı ses dalgaları, kavitasyon oluşumu için gereken süreden daha uzun sürede oluşurlarsa sorun yaşanabilir. Sonuç olarak, frekans arttıkça, kavitasyon kabarcığı oluşumu gittikçe zorlaşır.

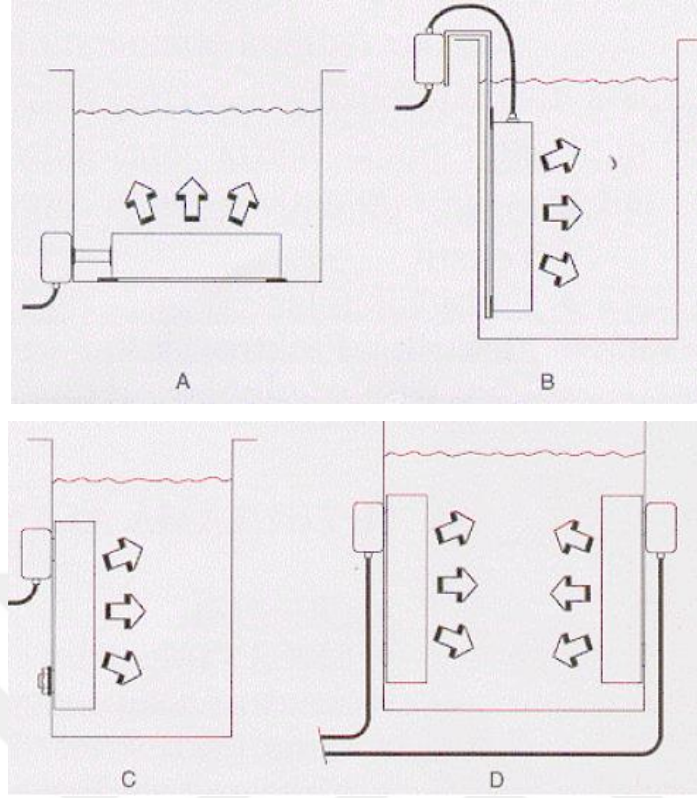


Şekil 5.8. Frekans değişiminin kavitasyon üzerindeki etkileri

Sıvıların çoğu, doğada heterojendir ve belirli miktarda çözülmüş gaz veya gaz kabarcıkları içerir. Bu gaz kabarcıkları, ultrasonik bir sıvı içinde buldukları zaman, kavitasyon kabarcıklarının büyümesi için çekirdek görevi görürler ve kavitasyon sıklığı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olabilirler (Şekil 5.8).

5.6. Dönüştürücülerin Tank Yerleşimi

Modüller temizlenecek parçanın büyüklüğüne, temizleme odak noktalarına göre konumlandırılabilir. Modül sayısı da temizlenecek parçanın kirliliğine ve etkin temizlik için istenilen temizleme süresine göre artırılabilir. Ultrasonik dönüştürücüler genellikle tankın altına veya kenarlarına bazen de hem alta hem de kenarına yerleştirilebilir [8].



Şekil 5.9. Transdüserlerin tank içerisine yerleşimi [7]

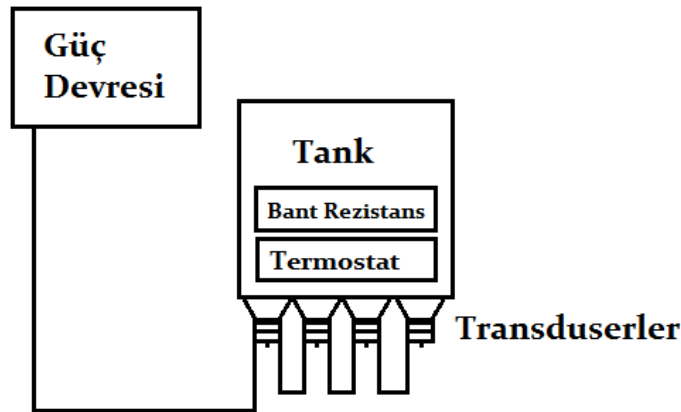
Metu Elektromekanik ile birlikte yürütülen çalışmada dönüştürücüler tankın alt noktasına (Şekil 5.9A) yerleştirilecektir. Tankın alt yüzeyine yerleştirilen dönüştürücülerin oluşturduğu kavitasyon yüzeye yakın noktalarda etkili olmaktadır. Kavitasyonun yüzeydeki etkisi folyo testlerinde görülecektir.

6. DENEYLERDE KULLANILAN ULTRASONİK TEMİZLEME SİSTEMİNİN TASARIMI

Yeni imal edilen veya revizyondan geçen makine parçalarının üzerlerinde bulunan çapak, yağ ve kir gibi istenmeyen maddelerin bulunması makine elemanlarının kullanım ömrünü kısaltmakta ve çeşitli arızalara neden olmaktadır. Özellikle, bu partikül ve parçacıkların yağ filmini parçalamaları nedeniyle, yağın görevini yapmasına engel olmakta, parçaların kısa zamanda aşınmalarına neden olmaktadır. Bu da bu parçaların çalışma ömrünü kısaltmaktadır. Bu istenmeyen durumların giderilmesi için makine parçalarını temizlemek için birçok temizleme yöntemi kullanılmaktadır. Solventli temizleme, basınçlı sıcak su ile temizleme, kimyasallı su ile temizleme ve ultrasonik temizleme gibi yöntemler bunların bir kısmıdır. Ultrasonik temizleme sisteminin diğer temizleme sistemlerine göre en büyük avantajı, temizlenecek makine parçasının her noktasına, özellikle ulaşılabilen girinti ve kanallardaki kalıntılara kadar ulaşip etki ederek daha etkili bir temizleme yapmasıdır. Bu çalışmada, tasarlanmasını yaptığımız ve denemelerde kullandığımız ultrasonik temizleme sisteminin yapısı ve ana elemanları aşağıda açıklanmıştır.

6.1. Ultrasonik ile Makine Parçası Yıkama Sisteminin Genel Tasarımı

METU Elektromekanik firması ile birlikte tasarlanan ve üretilen ultrasonik temizleme sistemi, Şekil 6.1'de görüldüğü gibi 5 ana bölümden oluşmaktadır. Bu sistemin temel bölümleri; Güç devresi kartı, transdüserler (dönüştürücü), tank, bant rezistans ısıtıcısı ve termostattan oluşmaktadır.



Şekil 6.1. Ultrasonik ile makine parçası yıkama sistemin genel yapısı

Yıkamada kullanılan sıvı sıcaklığının ultrasonik temizleme üzerindeki etkisini görmek için başka bir ifade ile bu sistemin avantaj ve dezavantajları incelemek için basit bir sistem

tasarlanmıştır. Bu amaçla, kristalin karakteristiğine uygun bir salınım üretecek olan bir devre kartı tasarımı METU Elektromekanik firmasında çalışan elektrik-elektronik ve mekatronik mühendisleriyle birlikte gerçekleştirilmiştir. Bu devre kartında uygun frekansı elde etmeyi sağlayan en önemli eleman osilasyon bobinidir. Kararlı bir frekans oluşturmak amacıyla, osilasyon bobini kullanımı özellikle tercih edilmiştir. Çalışmada, imalatı düşünülen ultrasonik temizleme makinesinin kapasitesine uygun olarak kristal osilasyon bobininin çalışma frekansı kaynak araştırmaları da yapılarak 10 kHz ile 2 GHz arasında seçilmiştir [33].

Ultrasonik tekniğinin temizlik amacıyla kullanılmaya başlandığı 1950 yılından günümüze kadar olan süreçte, temizleme için uygun olarak seçilen frekans değerleri 18-40 kHz arası olarak literatürde yer almaktadır. Ancak, ticari olarak yaygın kullanıldığı 1980'lerden sonra 25-40 kHz frekans aralığının kullanımının tercih edildiği görülmüştür [6].

Bu çalışmada, ultrasonik temizleme sisteminde kullanılan piezoelektrik kristallerin ölçüm değerlerine uygun olarak tasarlanan kartta elde edilmek istenen frekans aralığı ise 25-30 kHz'dir. Bu aralığın elde edilmek istenmesinin nedeni "6.1.1.Kristal Çalışma Frekans Analizi" bölümünde gerçekleştirilen kristal analizlerinin (Şekil 6.3 ve Şekil 6.4) sonuçları doğrultusunda belirlenmiştir. Aynı zamanda frekans değerindeki değişimlerin temizliğe etkisinin minimize edilmesidir. Böylelikle sıcaklığın değişiminin değerlendirilebilmesi için deneylerde alüminyum folyo kullanılmıştır. Alüminyum folyo, alüminyum metalinden oluşur ve kalınlığı 6 mikrondan 150 mikrona kadar değişir. Bu yöntemde 12 mikron kalınlığında folyo parçaları kullanılmıştır.

Tank içerisinde bulunan yıkama sıvısının sıcaklık değerleri bir termostat yardımıyla istenilen değerde tutulmuştur. Çalışmada, ayarlanan sıcaklık değerleri 20°C, 30°C 40°C, 50°C, 60°C, 70°C ve 80°C olacak şekilde testler yapılmıştır. Sıcaklıklar, temizlenme numunesi olarak kullanılan örnek alüminyum folyo ve çelik sac parçalarının yıkanacağı dereceye göre ayarlanmaktadır ve ayarlama işlemi, temizleme tankının dış yüzeyine montajı yapılan termostat vasıtasıyla yapılmaktadır. Böylelikle, alüminyum folyo ve çelik sac parçaların yıkama testi süresince su sıcaklıkları sabit tutulmaktadır.

Tank içerisindeki suyu ısıtmak amacıyla kabın dış yüzeyine bir ısıtıcı bant rezistans montajı yapılmıştır. Isıtıcı bant rezistans ile sıcaklık istenilen sıcaklık derecelerde tutularak, farklı deney numuneleri, farklı sıcaklıklarda temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Kullanılan

termostat ile sıvı sıcaklıkları $\pm 2^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle ayarlanmaktadır ve denemeler genellikle en az üç tekrarlı olarak yapılmıştır. Ayrıca, yıkama süreleri değiştirilerek ve kavitasyona maruz kalmış numuneler mikroskop altında incelenerek değerlendirilmiştir. Enerji tüketimini de minimize etmek için yıkama süresinin optimum değerleri yakalanmaya çalışılmıştır.

Ultrasonik sistemin seçilen örnek parçaları uygun şekilde temizlemesinde etkili olan parametrelerin sayısı literatür araştırmalarından bilindiği gibi çok fazladır. Örneğin, tank üzerine transduser yerleşimi, osilasyon etkisi, temizleme maddesi sıcaklığı vb. Bunlardan birisi kristalin tank içerisine uygun şekilde montajıdır. Kristal montajı yapılırken parçalar arasındaki boşluklara dikkat edilmelidir. Fazla uygun aralıklarda bırakılmayan boşluklar kristale zamanla titreşimden dolayı zarar verebilmektedir. Bu durumda kristal etkisini kaybetmeye başlar veya kırılarak transdüser yapısını bozar. Kristal montajı Şekil 5.2 'deki şema dikkate alınarak Şekil 6.12'de görüldüğü gibi yapılmaktadır ve tork anahtarı ile uygun torkta şekilde görüldüğü gibi sıkıştırılmaktadır. İlgili firmaların önerileri ve kaynak incelemeleri yapılarak montajları yapılmıştır.

6.1.1. Kristal Çalışma Frekansı Analizi

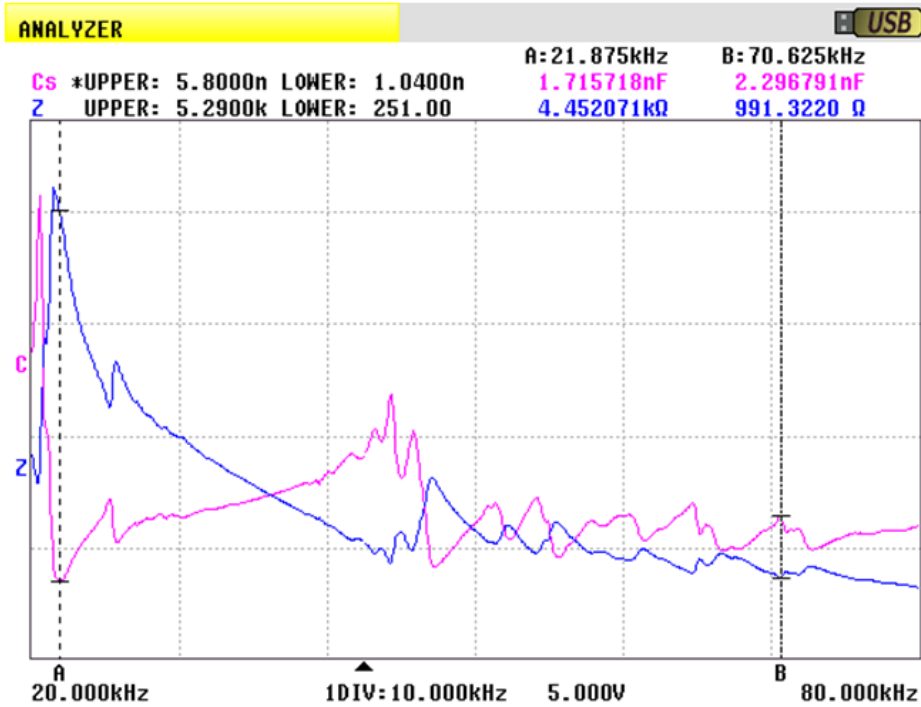
Frekans, bir empedans ölçüm cihazı için en temel ölçüm koşuludur. Tüm elektronik bileşenler frekans bağımlılığı sergiler ve empedans değerleri frekansa göre değişir. Ayrıca, empedans ölçüm cihazlarının ölçüm hassasiyeti frekans ve empedans değerine göre değişir. Frekans tarama ölçümü, rezonans frekansını ve empedansını ölçmek için kullanılır ve daha sonra tepe karşılaştırıcı fonksiyonu, rezonans durumunda frekans aralıklarını gösterir.

Belirtilen analizi yapmak için çalışılma sırasında HIOKI IM3570 empedans analizi cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın ölçüm frekans aralığı 4 Hz – 5 MHz'dir. Liste ve grafik ekranı olarak iki ekran modu tercih edilebilir yapıdadır. Şekil 6.2'de görüldüğü gibi grafik ekranı kullanımı tercih edilmiştir.



Şekil 6.2.Frekans ölçüm cihazıyla kristalin analizi

Bu analiz yönteminde kristalin hangi frekans değerinde en yüksek verimi vereceği belirlenmektedir. Bunun için kristal iki ayrı yüzeyinden cihaza bağlanır. Burada ölçüm yapılırken kristaller transdüser üzerine bağlıdır. Kristalle ilgili değerler cihazın ekranından görülebilir. Aşağıdaki grafikte tek bir transdüserin en iyi şekilde çalışacağı değerler görülmektedir.



Şekil 6.3. Kristalin en verimli çalışacağı değerler gösterilmektedir. A=21 kHz B=70

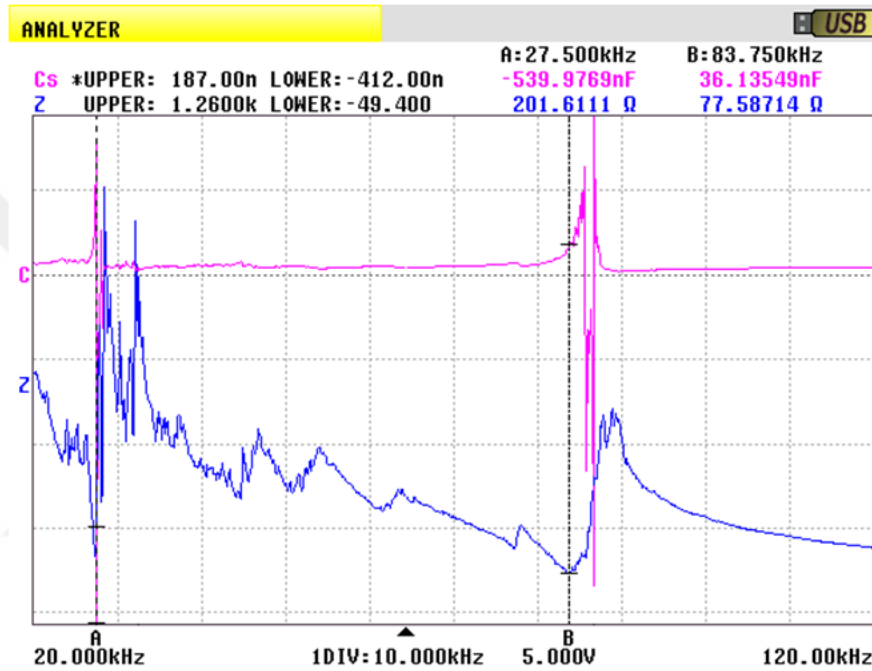
Burada:

Z=Empedans

C=Rezonans frekansı

A=Kristallerin en verimli çalışacağı seri rezonans değeri

B=Kristallerin en verimli çalışacağı paralel rezonans değeri



Şekil 6.4. Kristalin en verimli çalışacağı değerler gösterilmektedir. A=27 kHz B=83

Burada:

A=Kristallerin en verimli çalışacağı seri rezonans değeri

B=Kristallerin en verimli çalışacağı paralel rezonans değeri

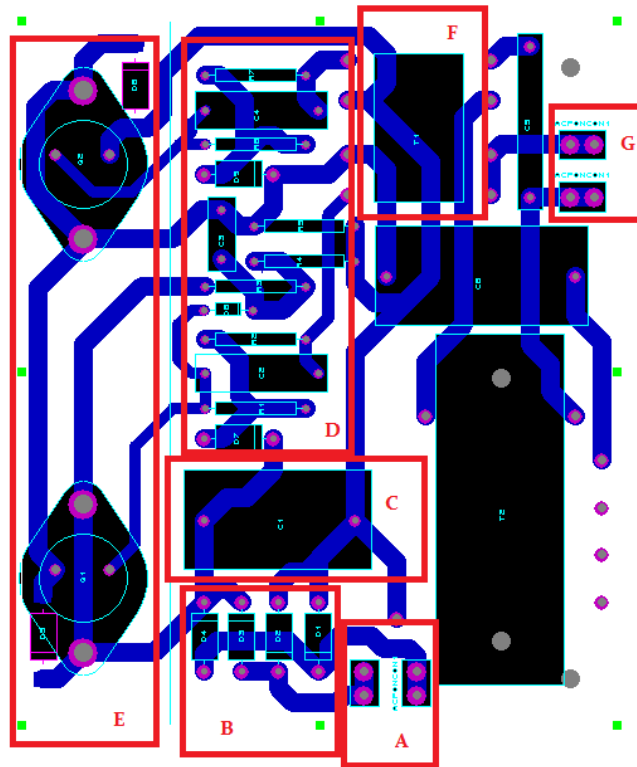
Şekil 6.4 'te dört transdüserin birbirlerine seri bağlı olarak en iyi şekilde çalışacağı değerler görülmektedir. Yapılacak olan deneylerde kullanılan güç kartı bu değerler göz önüne alınarak yapılmıştır.

Cihazın belirlediği A ve B değerleri kristalin rezonans frekansı değerleridir. Kristallerin rezonans frekansında çalışması, en verimli oldukları çalışma değerleridir. Bu değerlerin birinde çalıştırılmayan kristaller çok çabuk deformasyona uğrarlar ve çalışma verimleri düşer.

6.1.2. Güç Devresi Kartı Tasarımı

Tasarımı yapılan bu devrede metal malzemelerin kaviteasyon erozyonuna uğramadan ve en hızlı, homojen şekilde temizlenebilmesi için 25-30 kHz arasında frekans değeriyle çalışması amaçlanmıştır. Bu kHz değerleri, kullanılacak olan kristallere "6.1.1.Kristal Çalışma Frekans Analizi" bölümünde yapılan frekans testi sonucuna göre belirlenmiştir.

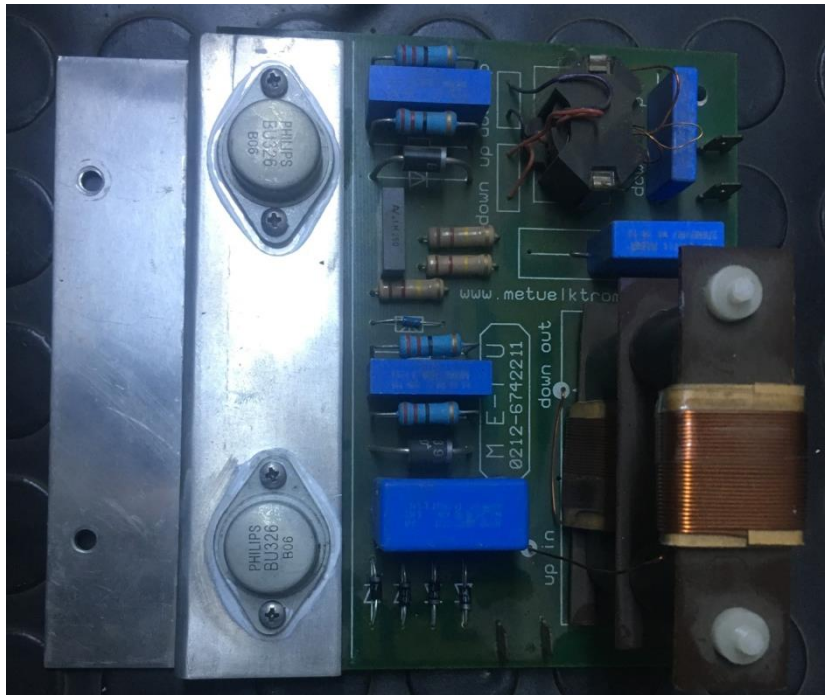
Ultrasonik dönüştürücülere uygulanacak sinyali üreten yüksek frekanslı ve yüksek genlikli modüle edilmiş kare dalgaların üretildiği devredir [6]. Şehir şebekesinden alınan 220 V 50 Hz'lik gerilim, tasarlanan bu kartta frekansı 25 kHz ile 30 kHz arasında bir değere dönüştürecek şekilde uygulanmıştır. 310 mm x 300 mm x 210 mm boyutundaki tankımıza 4 adet transdüser kullanılmıştır. Kullanılacak olan 4 adet transdüserle seri olarak bağlantısı yapılmıştır. Transdüserlere bağlanan piezoelektrik kristallerin her birinin çalışma frekans aralığı 25-30 kHz olarak belirlendiği için transdüserler birbirlerine seri olarak bağlanabilirler. Eğer bir kristalin frekansı 30 kHz'in üzerinde çıkmış olsaydı o kristalin takıldığı transdüserin verimli çalışması için farklı bir güç devresi kartına daha ihtiyaç duyulacaktı. Güç devresi kartı yapısı aşağıda tanımları yapılan harfler yardımıyla bölümlere ayrılarak Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.5.Kullanılan temizleme sisteminin güç devresi

- A: 220V AC (giriş)
- B: Diyotlar(220V DC'ye çevirilir)
- C: Kondansatör(gerilim regüle edilir)
- D: Diyotlar (transistörlere iletilir)
- E: Transistörler
- F: Osilasyon bobini (transistörleri tetikler)
- G: Transdüser çıkışı

Şekil 6.5'te verilen güç devresinde belirtilen bölümler; AC 220 V(A) girişinden gelen enerji diyotlar yardımıyla (B) DC 220 Volt'a çevrildi. Diyotlardan sonra gelen kondansatörle (C) gerilim regüle edildi. Daha sonra diyotlar (D) ile transistörlerin uçlarına gelindi. Transistör (E) uçlarında bulunan voltaj, transdüserlere iletim için osilasyon (F) bobininden salınım beklemektedir. Osilasyon bobini de bir salınım oluşturarak normal şebeke frekansı 50 Hz iken transdüserlerin karakteristiğine göre devreyi osilasyona uğratar. Osilasyona uğrayan devre transistör ayaklarında bulunan voltajı tetikler ve transistörler vasıtasıyla gerilim transdüserlere (G) iletilir.



Şekil 6.6. Üretilen güç devresi resmi

6.1.3. Ultrasonik Güç Kartı Frekans Testi

25 kHz ve daha düşük değerlerde, yüksek frekanslardan daha az sayıda kavitasyon oluşumu gerçekleştiği Şekil 5.8'de görülmektedir. Ancak oluşan kavitasyonların boyutları büyük olacağından depolayacakları enerji miktarı da yüksek olacaktır ve patlama anında yüksek bir enerji miktarı ortaya çıkacaktır.

Düşük frekansta çalıştırılan ultrasonik temizleyiciler, temizleyiciyi çalıştıran kişiyi ya da kişileri gürültüden dolayı rahatsızlık verebilir. Bu durum ultrasonik dalgaların boyutunun büyük olmasından kaynaklanır. 20 kHz ve altında olan frekanslarda yani titreşimlerin saniyede 20.000 defa titreşmelerinden dolayı insanlar için rahatsız edici bir ses ortaya çıkabilir ve koruyucu kulaklıkların kullanılması gerekebilir.

Tasarlanan analog güç kartında hedeflenen kHz değerleri, Şekil 6.4.'te bulunan kullanılan kristallerin analizleri sonucunda kristallerin en iyi çalışma frekansları 25 kHz ile 30 kHz olarak belirlendiği için güç kartı değeri de 25-30 kHz arasındadır. Şekil 6.7'de görülen enerji metre olarak adlandırılan cihaz yardımıyla ultrasonik analog güç kartımızın çalışma kHz değerini göreceğiz.



Şekil 6.7. Enerji metre ölçüm cihazı

Ultrasonik güç kartımız analog bir kart olduğu için sabit bir kHz değeri almak mümkün değildir. Ancak tasarlanan kartın üretmesi beklenen değer aralığı 25-30 kHz'dir. Burada beklenen değeri ise, "6.1.1. Kristal Çalışma Frekansı Analizi" başlığı altında yapılan ölçümler ile belirlenmiştir. Güç devresi kartının kristallere uygun, istenilen değerde çalıştığını test etmek için enerji metre cihazının probu kullanılır.

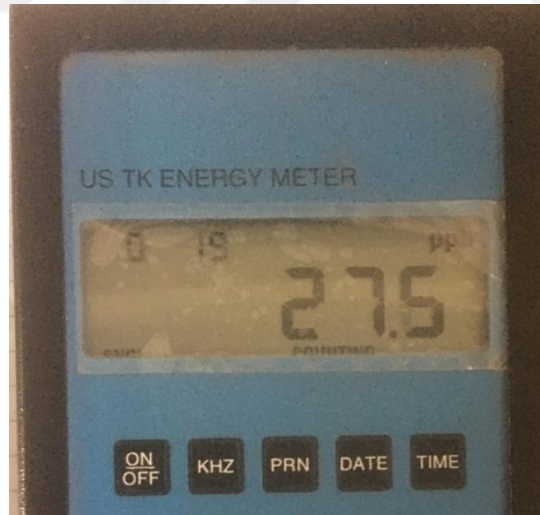
Enerjimetre: Kavitasyon etkisinin ölçümünde kullanılmak üzere PPB Megasonics firmasından temin edilen enerjimetre; ultrasonik frekans aralığı için EPDM ve megasonik frekans aralığı için kuvarsprobu bulunan göstergeli, el tipi bir cihazdır. Probu temizleme sıvısının bulunduğu tankın içerisine daldırıp tank içerisindeki kHz değerini ölçmek mümkündür.

Ölçülen değerler;

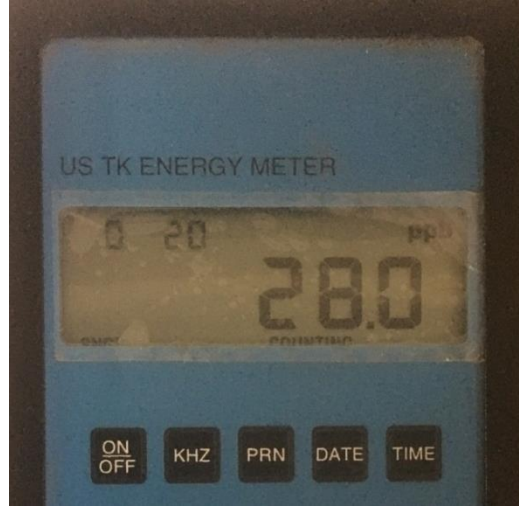
Şekil 6.8'de 27,6 kHz,

Şekil 6.9'da,28,0 kHz,

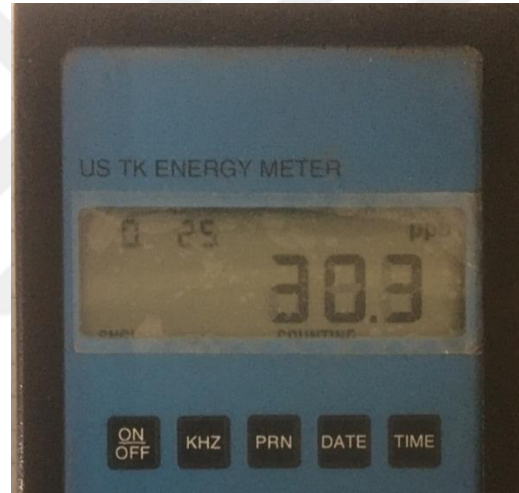
Şekil 6.10 'da 30.3kHz olarak görülmektedir. [27].



Şekil 6.8. Enerji metre cihazı kHz ölçümü-1



Şekil 6.9. Enerji metre cihazı kHz ölçümü-2



Şekil 6.10. Enerji metre cihazı kHz ölçümü-3

Enerji metre cihazıyla yapılan ölçüm, ölçüm cihazının ucunda buluna prob ve bu probun içerisinde yer alan frekans algılayıcılar ile ölçülür. Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10'daki ölçümlerde görüldüğü gibi kartımız 25 kHz ile 30 kHz değer aralıklarında çalışmaktadır. Ortalama 28,6 kHz frekans değerinde çalışan sistemde sıcaklığın etkisini alüminyum folyo yardımıyla yapılan deneylerle inceleyeceğiz.

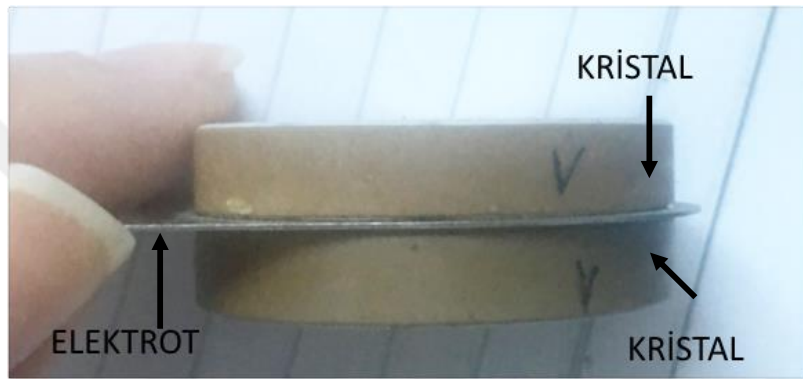
6.1.4.Kristal ve Transdüser (Dönüştürücü) Montajı

Kristalin tasarımı, titreşim sisteminden maksimum enerji ve verimi elde etmek için elbette son derece önemlidir. Bu tür tutucular için tasarım düşüncelerinin çoğu, teorik olarak belirlense de montaj sırasındaki etkilerden dolayı değişiklik görülebilir. Örneğin kristalleri

tutucuya sabitlerken kristali fazla sıkıştırmak kristalin titreşimini etkiler ve kullanım ömrünü kısaltır.

Bir kristal transdüser, salınım genliğinin karesiyle ve tabii ki kristalin kesit alanıyla orantılı olan bir ultrasonik çıkışa sahiptir. Montaj parçası ne kadar büyük olursa homojen olmayan doğası nedeniyle kristal aşırı titreşimden o kadar kolay tahrip olur.

5 mm kalınlığında bir kristal plakadan 150 ile 200 watt ultrasonik enerji elde etmek mümkündür. Enerji, tanktaki sıvının kendisinde ısı çıkışı olarak veya transdüserin plaka devresinde kullanılan gücün ölçülmesiyle ölçülmektedir.



Şekil 6.11. Kristallerin elektrot malzemeye montajı

Kristalin montajının yapılması önemli bir işlemdir. Kristal montaj aşamasında sıkıştırma pulu ile bağlantı elemanı arasında yeterince sıkıştırılmadığında istenilen verim elde edilemeyebilir ve aynı zamanda titreşimin vereceği tahribattan dolayı kristal zarar görebilir. Sıkıştırma işlemi boşluk kalmayacak şekilde ve çok sıkıda olmayacak şekilde uygun torkta ilgili firma talimatlarına dikkat edilerek yapılmıştır. Kristal elektrot olarak adlandırılan iletim malzemesinin iki yüzeyine bağlanır. Uygun bağlantı yapıldıktan sonra, montaj için hazırdır. Belirtilen elektrota bağlantı için lehimli teller, pimler tercih edilebilir. Bir kristali herhangi bir şekilde sabitlerken, montaj parçasının doğal kristal hareketini kısıtlayarak titreşimleri sönmlememesi önemlidir. Genellikle, sıkıştırma vidası olarak adlandırılan parça gerekli tüm bağlantıyı sağlar. Kristal yüzeyiyle temas eden elemanlar, kristal yüzeylerini aşındırmayacak şekilde bir transdüser oluşumu sağlanmalıdır.



Şekil 6.12. Transdüseri oluşturan elemanların montajı

Transdüser, çelik veya başka plakaların ve kuvars kristallerinin bir kombinasyonundan oluşan bir dönüştürücüdür. Genellikle çelik, kuvarsın her iki yüzüne sabitlenir. Ancak kristallerin sayıları arttırıldığında montajda ister istemez kristallerin bağlantısında gözle görünmeyen bir miktar boşluklar oluşmaktadır. Bu boşluklar kristal titredikçe kristale zarar vermektedir ve kristalin bir süre sonra çatlamasına neden olmaktadır.



Şekil 6.13. Dört kristalli transdüser montajı

Sistem çok ince tutkal katmanları ile birlikte ve hava kabarcığı olmadan doğru şekilde montaj yapıldığında, genel kristal tasarım kurallarını izleyen bir ünite olarak kabul edilir. Plakalar için seçilen malzeme, kuvarsinkine mümkün olduğunca yakın bir ultrasonik hız

derecesine sahip olmalıdır. Titreşim aktarımının iyi bir şekilde olması için, tüm sistemde minimum bir sönümlenme olması gerekir. Genel olarak, yüzey ne kadar büyük olursa çıkış o kadar büyük olur.

Dört kristalli transdüserlerin montajında yukarıda belirtilen hususlar dikkate alınarak, en uygun montaj yapılmıştır.

6.1.5. Uygulama Tankı ve Transdüserlerin Montajı

Genellikle daldırma tip ultrasonik temizleme sistemlerinde taban kısmı dikdörtgen ya da kare olacak şekilde tasarlanır. Tankın boyutu temizlenecek parçaya göre belirlenir. Paslanmaz çelikten üretilirler. Etkinin maksimum olması için olabildiğince ince ancak dayanıklı olacak kadarda kalın yapıda olmalıdır.

Çoğu ultrasonik temizleme sistemleri, test edilen ürünlerin daldırıldığı sıvı içeren bir tankla birlikte kullanıldığında etkili bir şekilde çalışır. Sıvı, birleştirme maddesi olarak işlev görür ve yağ, su, vb. olabilir. Tankın derinliği ve genişliği temizlenmesi istenen parçanın büyüklüğüne göre belirlenir.

Yukarıda verilen açıklamalar dikkate alınarak, ultrasonik temizlik için kullanacağımız tankın kullanım hacmi 12 litre alınmış ve 304 kalite paslanmaz çelik malzeme kullanılarak üretilmiştir. Şekil 6.14, Şekil 6.15'te imalatı yapılan tankın resimleri gösterilmektedir.

Tankın ham boyutlarının ölçüleri ise 310 mm x 300 mm x 210 mm'dir.



Şekil 6.14. Ultrasonik temizleme yapılacak tankın yan görünüşü



Şekil 6.15.Ultrasonik temizleme yapılacak tankın iç görünüşü

Tankın alt bölümüne yerleştireceğimiz transdüserlerin montajının sağlam bir şekilde yapılmasına dikkat edilmelidir. Transdüserin bağlı bulunduğu tank yüzeyinden istenmeyen bir şekilde ayrılması halinde transdüserde bulunan kristaller enerji yüklü olduğu için titreşime devam ederler. Ancak bu durum bir elektriksel tehlikeye sebep olabilir. Bu yüzden transdüserin tanka montajı dikkatli bir şekilde yapılmalı ve gerekli güvenlik önlemleri alınmalıdır. Transdüserleri tanka monte etmek için en kuvvetli yapıştırıcılardan biri olan epoksi kullanılmıştır.



Şekil 6.16. Ultrasonik temizleme yapılacak tankın alt görünüşü ve epoksi ile transdüser montajı

Epoksi ısı değişiminden fazla etkilenmeyen bir malzemedir. 300°C'nin üzerine çıkan sıcaklıklarda önce kömürleşmeye başlar ve daha sonra uçucu hale gelir. Epoksi mükemmel bir elektriksel yalıtkandır. Bu amaçla nerede istenirse kullanılabilir. Reçine ve sertleştiriciden oluşan, kimyasal reaksiyon ile sertleşen dolgu malzemesi olarak da kuvars kumu ile desteklenen bir malzemedir [15]. Bu nedenle bu malzeme tank imalatında kullanılmıştır.



Şekil 6.17. Ultrasonik temizleme yapılan tankın sıvı tahliye vanası

Tanktaki sıvıyı tahliye etmek için tankın en alt bölümüne iki yollu küresel vana bağlantısı yapıldı. Boşaltma kabı, ultrasonik makineden alt seviyede olacak şekilde konumlandırılmıştır. Küresel vana çıkışına basit bir hortum vasıtasıyla bağlantı yapılarak tahliye sağlanır.

6.1.5.1. Uygulama Tankı İç Sepet

Uygulama tankı tasarlanırken temizlenmesi hedeflenen parçanın boyutu göz önüne alınır. Kavitasyon kabarcıkları tankın yüzeyine doğru oluştuğu ya da büyüdüğü için tank yüzeyine yakın bölgelerde temizleme etkisi daha fazladır. Temizleme tankının tabanına yerleştirilen malzemenin içerisinde hareketi ya da transdüserlerin bulunduğu taban yüzeyine darbeleri transdüserlerin yapısını bozmaktadır. Kristallerin salınımını olumsuz yönde etkilemektedir [8].

Temizleme tankının içerisine yerleştirilecek olan sepet paslanmaz çelik malzemedendir olmalıdır. Sepet temizlenecek tek bir parçaların ve dış kabın hacmine göre boyutlandırılmaktadır. Temizleme tankı içerisindeki sepete içerisine malzemeler tek tek

düzenli bir şekilde dizilmelidir. Bu dizilim temizleyici sıvının daha kolay dolaştırılmasını ve kirli yüzeylerin daha kolay ve etkin temizlemesini sağlar [8].



Şekil 6.18. Temizlenecek parçanın yerleştirileceği tank içi parça tutucu sepet



Şekil 6.19. Tank içine yerleştirilen parça tutucu sepetin yandan görünüşü

6.1.6. Tank ve Sıvının Isıtılması

Ultrasonik yöntemle temizlemede etken olan bir diğer önemli değişken ise sıcaklıktır. Daha önce bahsettiğimiz gibi sıcaklık yükseldikçe sıvı içerisinde bulunan gaz miktarı azalmaktadır ve kavitasyon oluşumu artmaktadır. Ancak sıcaklık aşırı yükseldiğinde ise kavitasyonun içi buhar ile dolmakta ve bu durum patlamanın şiddetini azaltmaktadır. Bu sebeple tanktaki sıvı sıcaklığını belirli değerler arasında termostatik kontrol ile tutmak gerekmektedir.



Şekil 6.20. Temizleme tankına ısıtıcı bant rezistansın montajı

Tankı ve sıvıyı ısıtmak için bant rezistans olarak adlandırılan ısıtıcı eleman kullanılmıştır. Kullandığımız bant rezistans değeri 250 watt'tır. Rezistans seçiminde tankın boyutu, istenilen sıcaklığa ulaşma süresi vb. etkenler değerlendirilerek basit ısıtma hesapları yapılarak, seçim yapılmıştır. Aşağıdaki hesaplamada örnek olarak tankın sıcaklık değeri 65°C olacak şekilde hesaplama yapılmıştır. Suyun ilk sıcaklık değeri 20°C olarak alınmıştır. Giriş suyunun ilk sıcaklık değeri 20°C olarak alınmıştır.

Temel ısı formülünden hesaplayacak olursak:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (6.2)$$

$$Q = 12000 \cdot 1.45$$

$$Q = 0.62802 \text{ kW}$$

Kullandığımız rezistans değeri 250watt olduğuna göre;

$$250\text{watt} = 0.25\text{kW}$$

Gerekli ısımız 0.62802 kW ise;

$$t = \frac{0.62802}{0.25} = 2,5 \text{ saat}$$

Burada;

$Q = \text{Isı (kal)}$

$m = \text{kütle (g)}$

$c = \text{özgül ısı (kal/g } ^\circ\text{C)}$

$\Delta t = \text{sıcaklık farkı (} ^\circ\text{C)}$

$t = \text{zaman (sn)}$

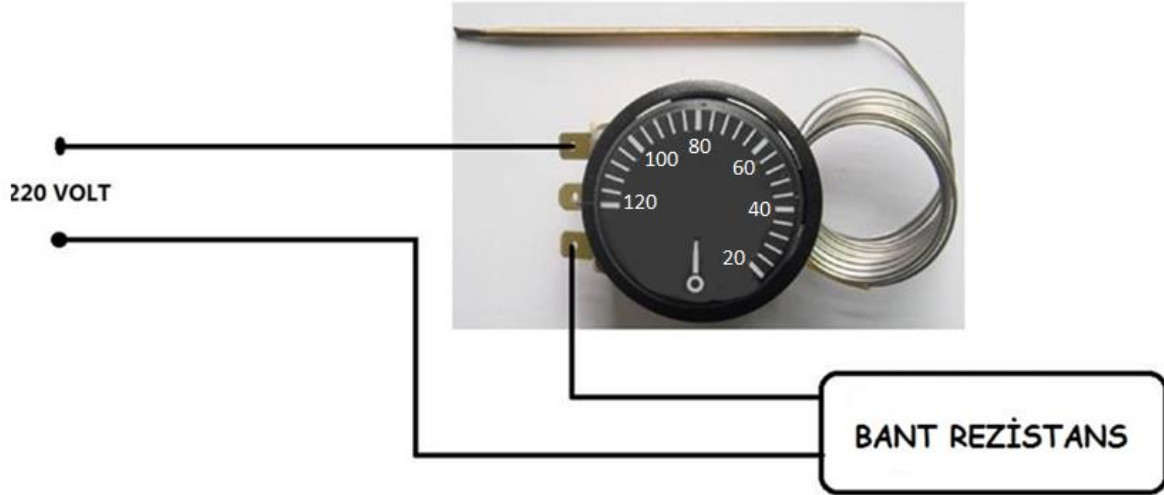
Bant rezistansları verimli şekilde kullanabilmek için montaj çok önemlidir. Bant rezistansın ısıtacağı bölgeye tam temas etmesi, arada hava kabarcıklarının kalmaması gerekir. Bant rezistans kırmızı ısıya dayanıklı silikon ile tanka sabitlenmiştir. Aynı zamanda yüksek ısı derecelerine çıkılmaması gerekmektedir. Kullandığımız bant rezistansın vereceği ısı derecesi maksimum 100°C sıcaklığa çıkacak şekilde ayarlanmıştır. Böylece, sistemin bir noktada emniyeti sağlanmıştır.



Şekil 6.21. Bant rezistansın ultrasonik temizleme yapılacak tank üzerine sabitlenmesi

6.1.7. Termostat Montajı

Termostat, bilindiği gibi sıcaklık değişimini istenilen değerler arasında tutan bir kontrol elemanıdır. Termostatlar, metallerin ısıyla genişmesi sonucu verdiği tepkiler doğrultusunda aktif ya da pasif olurlar. Bunu da yapısal özelliklerine bağlı olarak çeşitli şekillerde gerçekleştirir. Soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde kullanılan termostatlar başlıca iki ana kısımdan oluşur. Birinci kısım, sıcaklık değişimlerine tepki veren mekanik bölümdür. Mekanik tepkinin kumanda ettiği elektrikli kontaklar ise ikinci kısımda bulunur. Basit manada termostat, sıcaklık değişimlerine bağlı olarak devrede bir elektrik anahtarı gibi çalışan ve böylece bağlı olduğu sistemi açma ve kapama yaparak kumanda eden cihazlardır [16].



Şekil 6.22. Termostat ve bant rezistans bağlantısı

Tankın sıcaklığını istediğimiz sıcaklık aralıklarında tutmak için bant rezistansın kabloları termostata bağlanmıştır. Böylece tank sıcaklığı istenilen sıcaklık aralıklarında tutulmuştur. Bu belirlenen sıcaklık aralığının altına düştüğünde bant rezistans tekrar aktif olacak tank sıcaklığını ayarladığımız derecede tutacaktır. Deneylerin yapılış kısmında ayarlanan sıcaklık aralıkları verilmiştir.



Şekil 6.23. Termostat ucu tank üzeri montajı

Termostat bir montaj plakası ve vida yardımıyla tank üzerine monte edilmiştir. Yani sıcaklıklar tank yüzeyinden ölçülmüştür. Bazı sistemlerde direkt sıvı içerisinde sıcaklık ölçen termostatlardan kullanılmaktadır. Ancak burada ultrasonik kavitasyondan sıcaklık elemanının etkilenmemesi için yüzeyden sıcaklık ölçen termostat tercih edilmiştir.

7. FOLYO TESTLERİ

7.1. Sıcaklığın Temizliğe Etkisinin Folyo Testleri ile İncelenmesi

Ultrasonik temizliğin en önemli parametrelerinden birisi temizleme sıvısının sıcaklığıdır. Sıcaklık, kavitasyon oluşumunda etkili olan sıvının viskozitesine, sıvı içindeki gazın çözünürlüğüne, çözülmüş gazın sıvı içindeki difüzyon oranına ve buhar basıncına doğrudan etki eder. Maksimum kavitasyon etkisi için sıvının viskozitesinin minimum olması gerekir. Sıcaklık arttıkça ultrasonik kazan içinde maksimum kavitasyon oluşur [2].

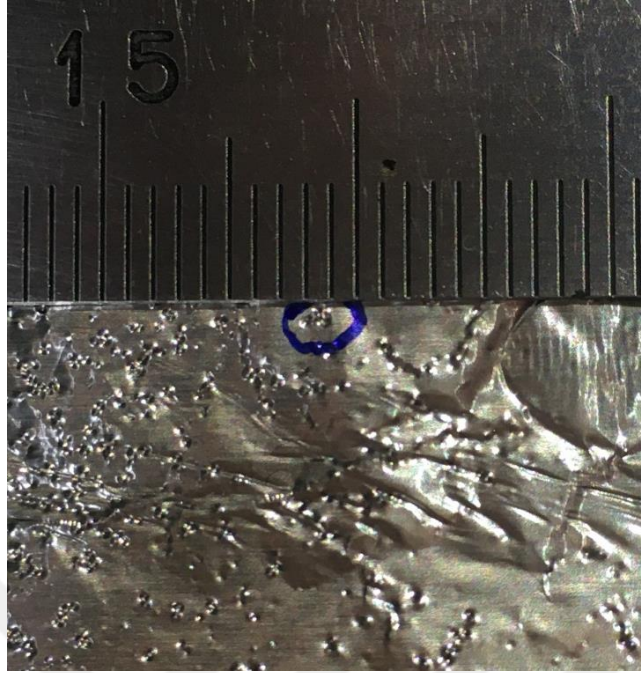
Ultrasonik tankın etkisinin görülebildiği en kolay yöntem yapısından dolayı alüminyum folyo malzeme deneyleridir. Folyo Şekil 7.1 'de görüldüğü gibi yatay olarak tankın üzerine bırakılır ve sıvı folyo üzerine çıkacak şekilde suya daldırılır. Kavitasyonun yoğun olduğu bölgeler dönüştürücülere en yakın olan yerlerdir. Folyo testinde kavitasyon ilk olarak katlanmış ya da buruşmuş alanlardan başlar ve böyle yüzeylere daha çok etki eder. Bu etkinin sebebiyse ultrasonik dalgaların çarptıkları her yüzeyi yük kabul etmesidir. Bu nedenle yükün fazla olduğu alanda kavitasyon etkisi de fazla olur. Mevcut sıvıyı da yük kabul ederler ve bu yüzden sıvının yoğunluğu da ultrasonik temizlemede önemli bir etkendir.

Folyo testlerinde, folyo üzerinde farklı sıcaklıklarda oluşan kavitasyon etkilerini Nikon MA100N mikroskopuyla incelenmiştir. Bu mikroskop aydınlık alan ve basit polarizasyon gözlemleri için tasarlanmış kompakt ters tip bir mikroskoptur. Yüksek kontrastlı görüntü ve çekim sağlar. Metalurji, metal imalatı, tane boyutu ve yüzey muayene gibi alanlarda kullanılabilir [34].



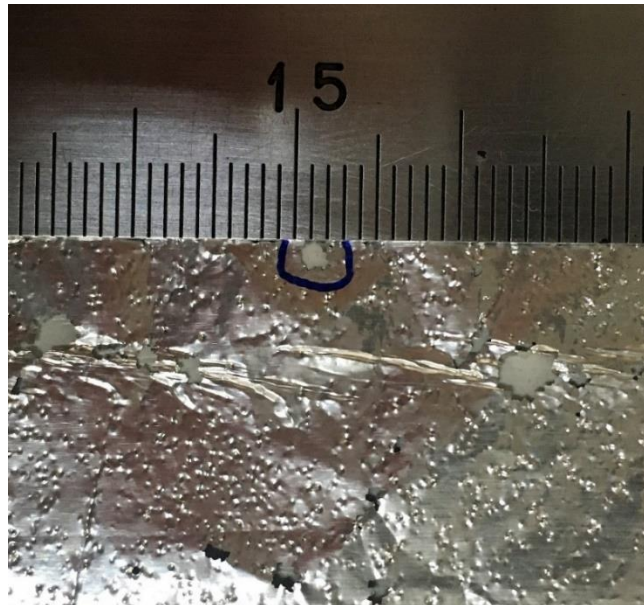
Şekil 7.1. Ultrasonik temizleme tankı içerisine koyulan su ile folyo testinin gerçekleştirilmesi

Tank içindeki temizleme maddesi miktarı 12 litre ve temizleme süresi 3 dakika olarak ayarlanmıştır. Tank içerisindeki sıvı sıcaklığı değiştirilerek alüminyum folyo üzerinde meydana gelen değişimler elde edilmiştir. Şekil 7.2'de 25-30 kHz frekans aralığında ve 20°C su sıcaklığında elde edilen alüminyum folyo testi gösterilmektedir. Şekil 7.3'te 40°C, Şekil 7.6'da 50°C, Şekil 7.8'de 60°C, Şekil 7.10'da 70°C ve Şekil 7.13'de 80°C için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Elde edilen bu örnekler temizleme işleminden sonra Yıldız Teknik Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında mikroskop ile incelenmiştir.



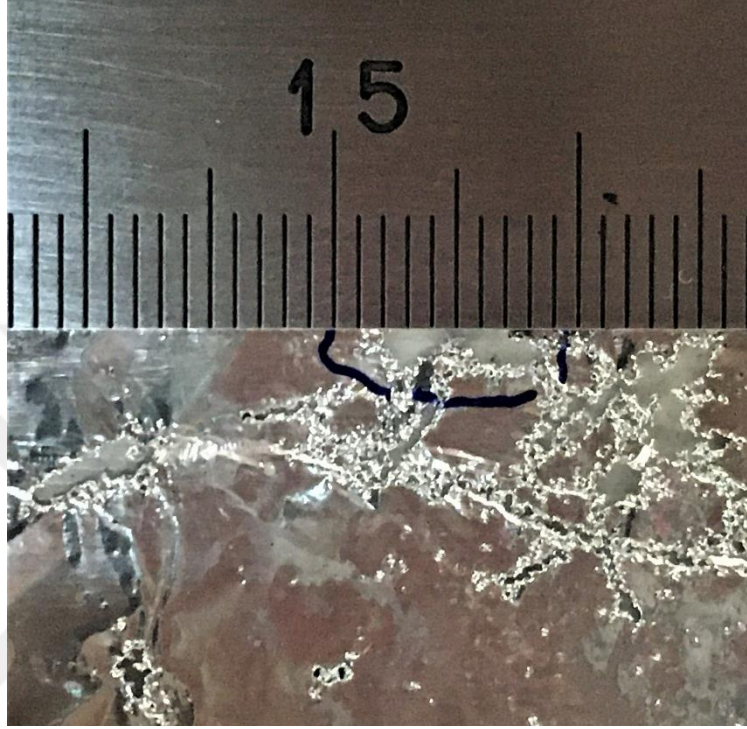
Şekil 7.2. Sıcaklığı 20°C olan suda, 25-30 kHz aralığında 3 dakika süre ile temizlenen alüminyum folyonun görünümü

Şekil 7.2’de alüminyum folyo üzerine etki eden kavitasyon gözle görülebilir bir etki göstermiştir. Gözle kontrolde ölçümü yapılacak olan erozyon alanı milimetre birimiyle gösterildi. Bu kavitasyonun folyo üzerinde erozyon etkisi Nikon MA100N mikroskopuyla sonuçlar bölümünde incelendi.



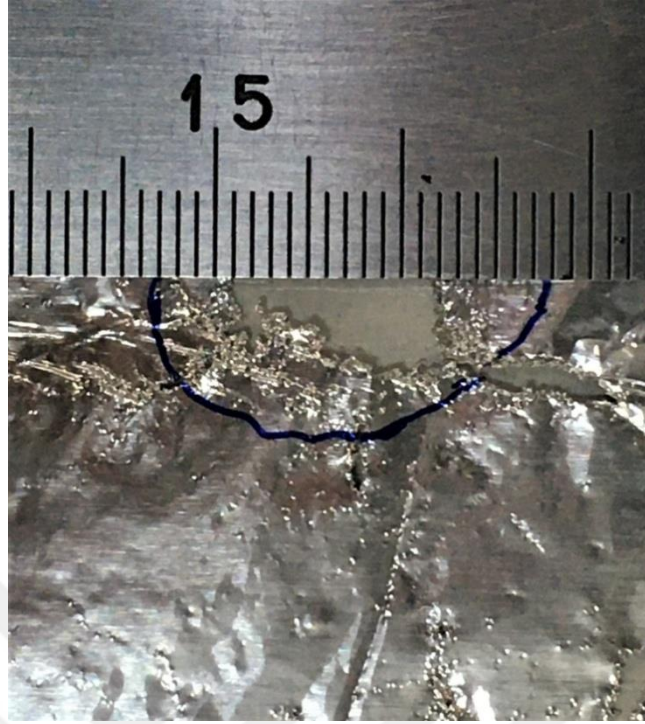
Şekil 7.3. Sıcaklığı 40°C olan suda, 25-30 kHz aralığında 3 dakika süre ile temizlenen alüminyum folyonun görünümü

Şekil 7.3'te 40°C sıcaklığındaki su içerisinde kalan alüminyum folyo üzerinde meydana gelen 2 adet kavitasyon erozyonu, yani gözle görülür delinmelerin oluştuğu görülmektedir ve meydana gelen bu erozyonların çevresinde folyo üzerinde herhangi bir erozyona dair etki görülmemektedir.

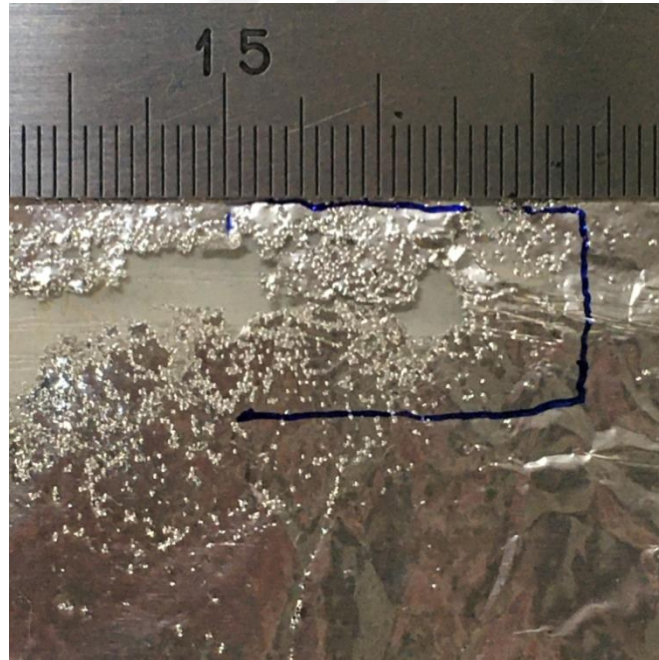


Şekil 7.4. Sıcaklığı 50°C olan suda, 25-30 kHz aralığında 3 dakika süre ile temizlenen alüminyum folyonun görünümü

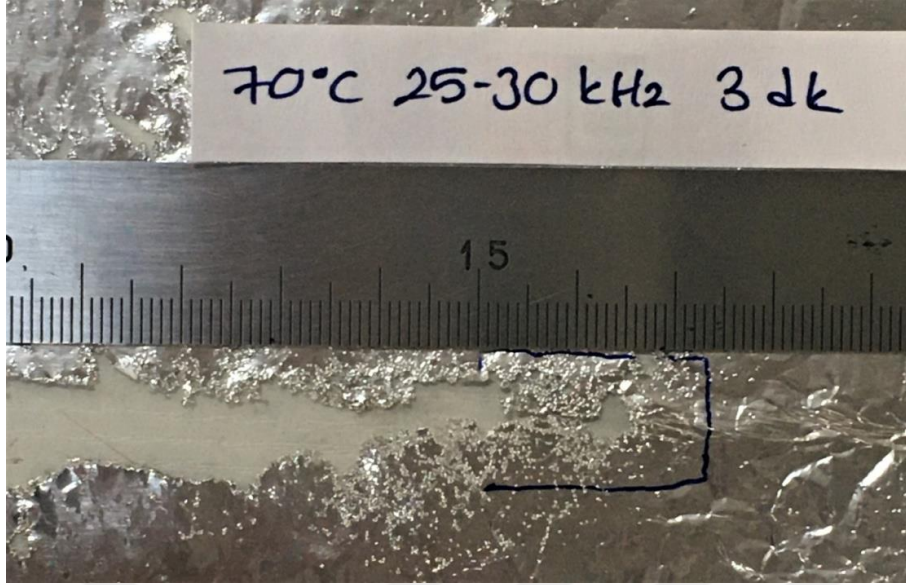
Tank içerisindeki sıcaklık arttıkça su içerisindeki gaz miktarı buhar olarak dışarı atıldığı için kavitasyon baloncuklarının etkisinin ve oluşumunun arttığı mikroskop ölçümlerinde görülmektedir. Kavitasyon oluşumunun artması folyo üzerinde erozyon oluşumunu arttırmakta ve erozyona uğrayan bölgede incelmeler meydana getirmektedir. Erozyonun incelttiği folyo üzerinde bir süre sonra gözle görülen delikler oluşmaktadır. Kavitasyonun oluşturduğu delinen bölgelere etki etmeye devam eden kavitasyon baloncuklarıyla delinmiş bölgede genişlemeler görülmüştür.



Şekil 7.5. Sıcaklığı 60°C olan suda, 25-30 kHz aralığında 3 dakika süre ile temizlenen alüminyum folyonun görünümü



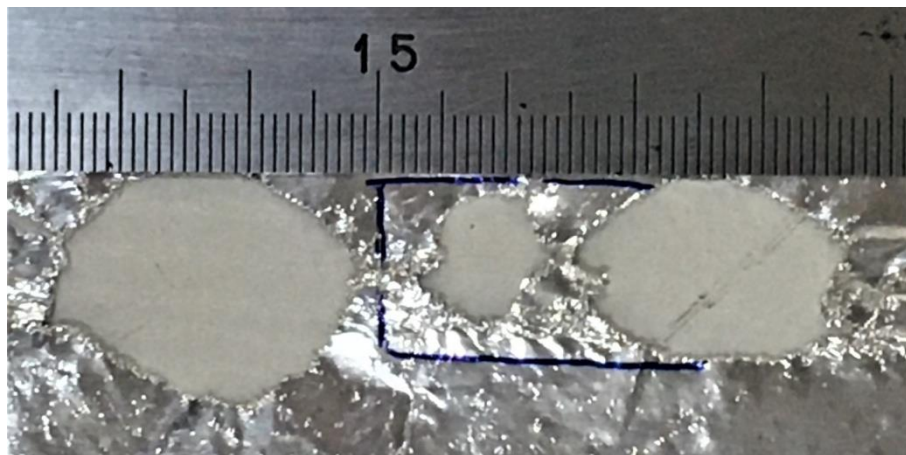
Şekil 7.6 . Sıcaklığı 70°C olan suda, 25-30 kHz aralığında 3 dakika süre ile temizlenen alüminyum folyonun görünümü



Şekil 7.7. Sıcaklığı 70°C olan suda bulunan folyo üzerinde meydana gelen yüksek erozyon etkisi

Şekil 7.7'de görülen folyo üzerinde yüksek derecede erozyon meydana gelmiştir. Mikroskopla ölçüm yapılabilecek alan çizilerek belirtilmiştir. Folyo üzerinde delik oluşumlarından çok yırtılma şeklinde ayrılmalar oluşmuştur

Şekil 7.7'de görüldüğü gibi oluşan kavitasyonların erozyonun başladığı bölgeye doğru yöneldiği ve homojen bir dağılım sağlamadığı görülmüştür. Kavitasyon baloncuklarının boyutları ise 50°C sıcaklıktaki suda oluşan kavitasyonların boyutlarına yakındır. Kavitasyonun etkisi kadar homojen dağılımı da görüldüğü üzere önemlidir. 70°C sıcaklıkta folyo testi üzerinde homojen bir dağılım sağlanamadığı görülmüştür.



Şekil 7.8. Sıcaklığı 80°C olan suda bulunan folyoya 25-30 kHz aralığındaki frekansın 3 dakika boyunca yarattığı etkinin milimetreye oranla gözle kontrolü

Şekil 7.7’de folyo üzerinde yüksek erozyondan kaynaklanan yırtılma meydana geldiğini incelemiştik. Su, kaynama noktasına doğru yükseldikçe içerisinde bulunan buhar miktarı artmaya başlar. Bu artan buhar miktarı kavitasyon baloncuklarının içerisinde dolar ve patlama etkisini azaltır. 70°C ’den 80°C ’ye çıkan su sıcaklığı kavitasyon etkisinde gözle görülür bir etki kaybının olduğunu göstermiştir. Şekil 7.8’de folyo üzerinde şerit şeklinde yırtılma değil derin delikler meydana getirmiştir. Homojen bir etki oluşmadığı görülmüştür.

7.3. Metal Malzeme Üzerinde Yapılan Temizleme Testi ve Sonuçları

Üretmi yapılan 12 litre hacmindeki endüstriyel ultrasonik metal malzeme temizleme makinesi küçük boyutlardaki metal endüstri malzemelerinin temizlenmesi amacıyla tasarlanmıştır. Çalışmalar sırasında çeşitli makine parçaları da test amaçlı kullanılmıştır. Bunların temizlenme derecesini belirlemek için bazıları üzerinde test yapılmış bazıları ise sadece gözle incelenerek değerlendirilmiştir. Örneğin bir metal dişli parçanın (ara montaj elemanı) dişlilerinde, dişlerin arasında ve göbek kısmında kirli ve sabitlenmiş şekilde gres yağı kalıntıları bulunmaktadır. Bu kir kalıntılarının uygun şekilde temizlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde sağlıklı bir montaj yapmak ve yağlama sırasında uygun yağ filmi parça üzerinde oluşturmak mümkün olmayacaktır. Bu durumda malzeme ömrünün kısalmasına ve bazen de çeşitli hasarlara neden olabilmektedir. Bu amaçla, örnek bir metal malzemeyi (üzerinde vida dişleri bulunan) montaja hazırlamak için, 60°C sıcaklığında su bulunan ultrasonik temizleme tankının içerisine konulmuştur. Şekil 7.9’da görülen ara montaj elemanının ilk temizlenmemiş hali, kullanılan metal malzemenin üzerinde gres yağı tabakası görülmektedir. Daha sonra, Ultrasonik tank içerisine yerleştirilen tel sepet yardımıyla temizlenen tam temizlenmemiş metal malzeme resmi Şekil 7.10’da görülmektedir. Ve temizleme işlemi tamamlandıktan sonraki son durumu Şekil 7.11’de görülmektedir. Bu çalışma ultrasonik temizlenmenin etkisini gözle inceleyebilmek açısından yapılmıştır.



Şekil 7.9. Ultrasonik temizleme tankına girmeden önce gres yağı kalıntılarının bulunduğu kirli metal malzeme



Şekil 7.10. Ultrasonik tank içerisine yerleştirilen tel sepet yardımıyla temizlenen metal malzeme



Şekil 7.11. 60°C sıcaklıkta 3 dakika boyunca ultrasonik temizlik yapılan gres yağı kalıntılarında arındırılmış metal malzeme yüzey görünümü

Şekil 7.11’de görülen üzerinde vida dişleri de bulunan bir metal makine parçası, sıcaklığı 60°C olan su dolu ultrasonik tankın içerisinde 3 dakika süreyle yıkanmıştır. Gres yağı kalıntılarının tamamının malzeme üzerinden ayrılma süresinin, yağın yoğunluğuna ve miktarına göre değişiklik göstermesine rağmen yaklaşık 3 dakika sonunda tamamen temizlenmiş olduğu gözlenmiştir.

7.4. Paslanmaz Sac Parçaları Üzerinde Ultrasonik Temizlik Etkisinin İncelenmesi

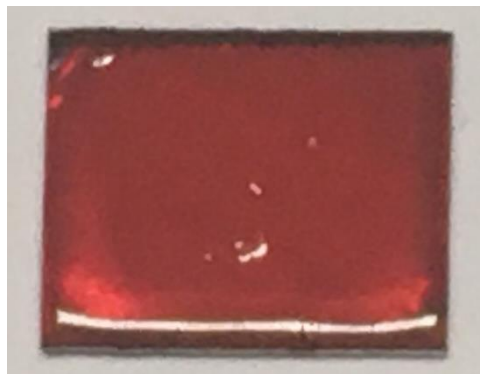
Endüstride birçok alanda kolay şekil verilmesi, ısıya, suya dayanıklı olması, mukavemet değerlerinin çok iyi olması sebebiyle paslanmaz sac ve diğer çelik malzemelerin imalatında paslanmaz sac malzemesi kullanımı yaygındır. Bu sebeple paslanmaz sacdan yapılan ürünlerin temizlenmesinde ultrasonik yıkamadan yararlanılabilir.

Bu amaçla, kullanılacak sac parçaları, tasarlanarak üretilen ultrasonik metal ultrasonik malzeme yıkama cihazına yerleştirilecek boyutlarda üretildi ve testlerde kullanıldı. Yıkama

sisteminde ve testlerde kullanılacak şekilde uygun boyutlarda üretilen metal sac parçaları, çeşitli şekillerde kirletilerek deneylerde kullanılmıştır. Yalnızca suya daldırma yöntemleriyle üzerindeki istenmeyen tozdan ya da kirden arındırılmayacak kadar parça üzerinde yer alan küçük delikler ya da çizilmeler bulunabilir. Bu etkileri incelemek amacıyla farklı boyutlarda iki adet sac parçasının üzeri sivri bir cisimle çizilerek farklı noktalarda derinlikler oluşması sağlanmıştır. Sac parçalarının üzeri işleme işleminden önce kullanılan, kalıp marka boyası olarak bilinen boya ile boyanmıştır. Aysan kimya San. ve Tic. ürünü olan bu markalama boyası çabuk kuruma, kuruduktan sonra yağdan etkilenmeme ve metali pasa karşı koruma özelliklerine sahiptir. Bu özelliklere sahip markalama boyasını derin çizikler ve ezilmelerin bulunduğu sac parçalarının üzerine uyguladık ve kuruttuk.

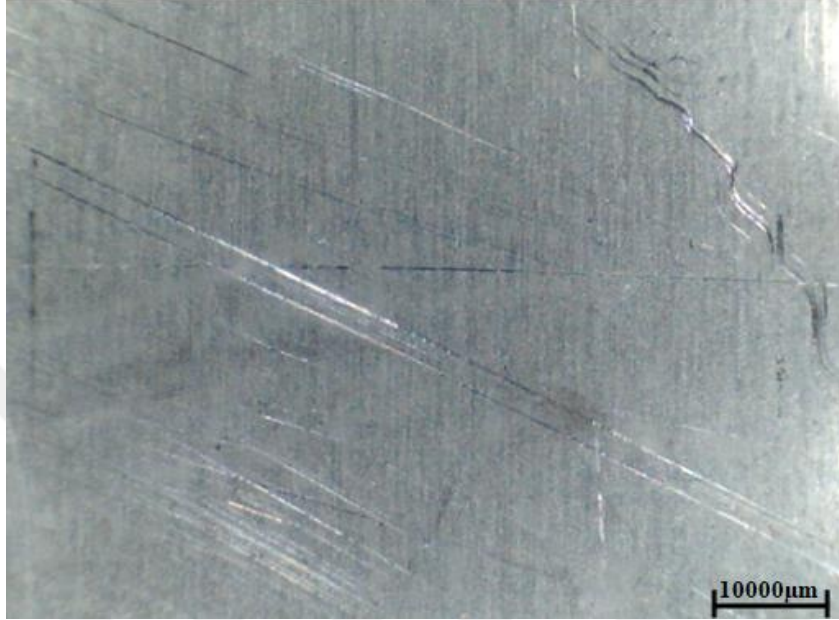


Şekil 7.12. Boyutu 18.60mm olan paslanmaz sacın üzerindeki çizikler ve ezilmeler



Şekil 7.13. Şekil 7.12'deki paslanmaz sacın markalama boyası ile tüm yüzeyinin kaplanması

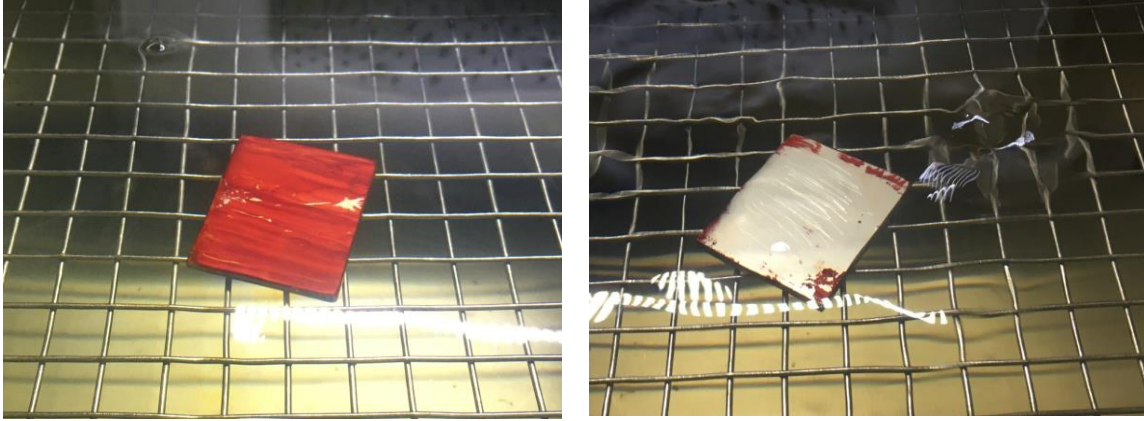
Markalama boyası ile kaplanan paslanmaz sac, 3 dakika süre ile 60°C sıcaklığında suda ultrasonik yıkama yapılmıştır. Yapılan bu yıkama sonucunda markalama boyasının derin çiziklerin ve ezilmelerin içerisinde kalıntı bırakıp bırakmadığı mikroskop ile incelenmiştir ve herhangi bir markalama boyası kalıntısı görülmemiştir.



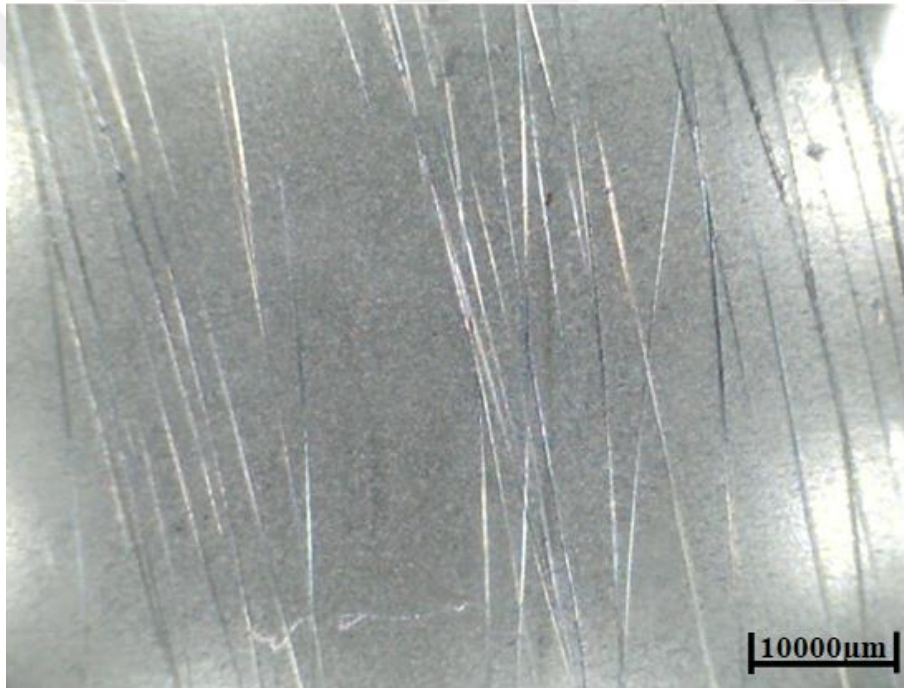
Şekil 7.14. Paslanmaz sac parçasının 3 dakika süre ile 60°C sıcaklıktaki ultrasonik temizleme uygulamasından sonra 10X büyüme ile 10000µm skalasında mikroskop altında görüntüsü



Şekil 7.15. Boyutu 43.74 mm olan çizilmiş paslanmaz sacın markalama boyası ile kaplanması



Şekil 7.16. Boyutu 3.74 mm olan, marka boyasıyla boyanmış paslanmaz sacın ultrasonik temizleme tank içerisinde işleme uğrama görüntüleri



Şekil 7.17. Paslanmaz sac parçasının 3 dakika 60°C ultrasonik temizleme yapılmasından sonra 10X büyüme ile 10000µm skalasında mikroskop görüntüsü

Bu sac parçası üzerinde derin çizikler mevcuttur. Bu derin çizikler ve sac parçası tamamen markalama boyası ile boyanmış ve kurutulmuştur. Daha sonra 3 dakika boyunca 60°C su sıcaklığında ultrasonik yıkama yapılan sac parçasının temizliği mikroskop altında incelenmiştir. Sac parçası üzerinde markalama boyasına rastlanmamıştır.

Ultrasonik temizlemede incelemesini yapacağımız diğer paslanmaz sac parçası, 40.11 mm uzunluğunda üzerinde 5mm çapında iki adet deliği bulunan bir bağlantı parçasıdır.

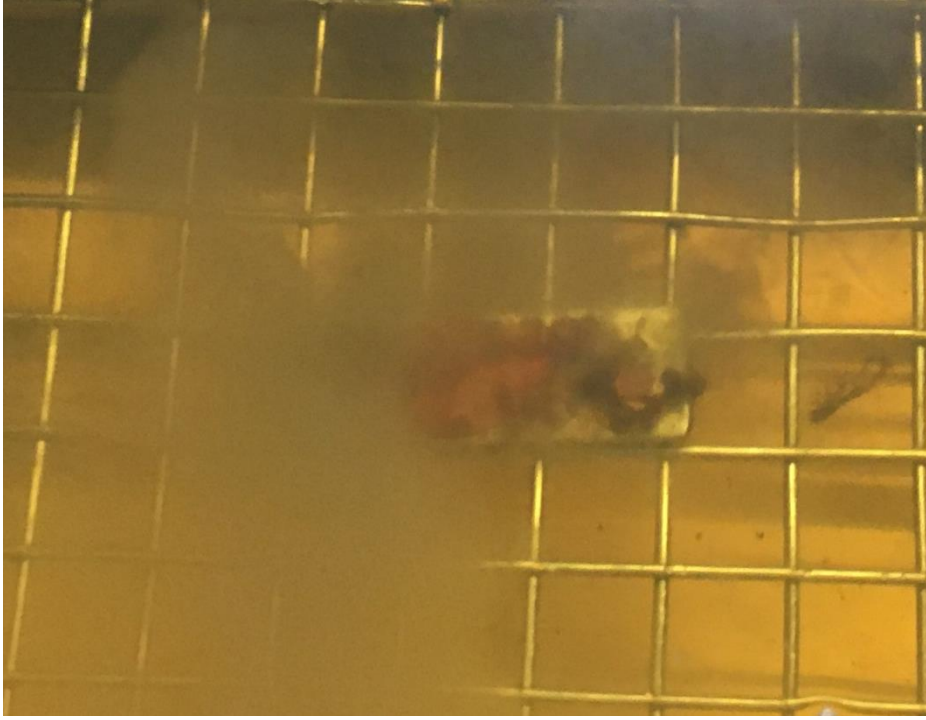


Şekil 7.18. Boyutu 40.11 mm olan paslanmaz sactan yapılan montaj parçasının üzerindeki çizikler ve ezilmeler

Şekil 7.19.'da görülen parçanın tamamını gres yağı ile kaplanmıştır. Gres yağı, makine parçalarının ve dişlilerin yağlanmasında yaygın kullanılan bir yağdır. Genellikle de gres yağının kullanımı, sanayide kullanılan makinelerde çok yaygın kullanılır ve temizlenmesi de zor olan bir maddedir. Aynı zamanda, Çalışan hareketli parçaların aşınmasını, korozyona uğramasını ve aşırı ısınmasını önleyen bir maddedir.



Şekil 7.19. Boyutu 40.11mm olan paslanmaz sactan yapılan montaj parçasının gres yağı ile kaplanması



Şekil 7.20. Boyutu 40.11mm olan paslanmaz sactan yapılan montaj parçasının ultrasonik temizleme tankı içerisinde gres yağdan temizlenmesi işlemi



Şekil 7.21. Paslanmaz sac montaj parçasının parçasının 3 dakika 60°C ultrasonik temizleme yapılmasından sonra 20X büyüme ile 5000µm skalasında mikroskop görüntüsü



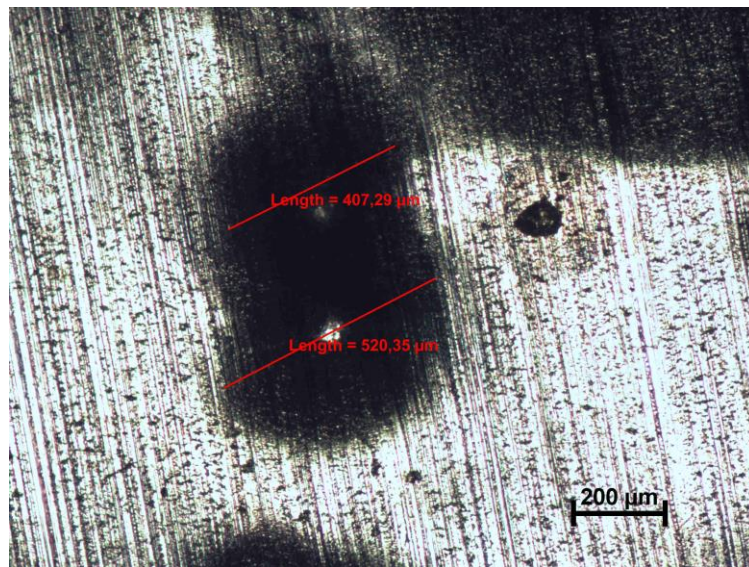
Şekil 7.22. Paslanmaz sac montaj parçasının parçasının 3 dakika 60°C ultrasonik temizleme yapılmasından sonra 20X büyüme ile 5000µm skalasında mikroskop görüntüsü

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, METU Elektromekanik Endüstriyel Temizleme & Yüzey İşlem Tesisleri firması ile birlikte yürütülmüştür. Mekanik sistemin tasarımında ve montajının yapılmasında, malzeme temininde, projelendirme konusunda ilgili firma tarafından her türlü destek sağlanmıştır.

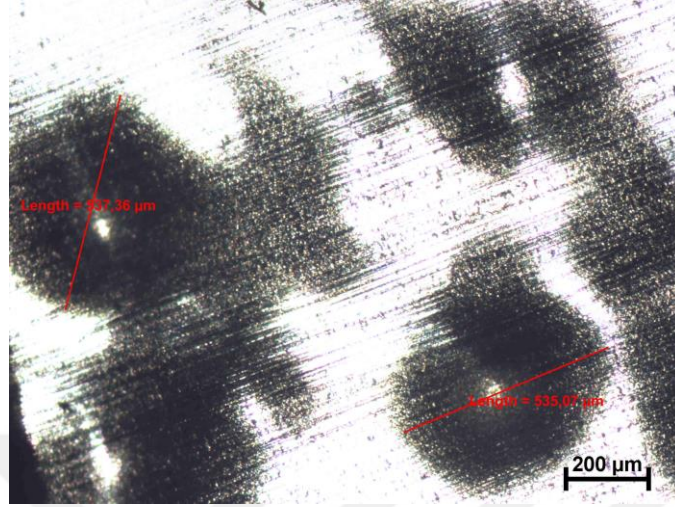
Bu tez çalışmasında, 4 dönüştürücülü (ultrasonik başlıklı) ultrasonik parça yıkama sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerle, sıcaklığın ultrasonik temizleme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ultrasonik parça yıkama sistemi imalatına başlanılmadan önce kullanılacak kuvars kristallerinin kaç kHz'de verimli daha verimli çalışacağı konusunda literatür çalışması ve teorik çalışmalar yürütüldü ve sistemin devre tasarımı belirlendikten sonra sistemin üretimi gerçekleştirildi. Tasarlanan prototipte transdüserlerin en verimli çalışma aralığının 25-30 kHz olduğu belirlendi. Çalışmalar sırasında, temizleme sıvısı (su) kirlendikçe kavitasyon şiddetinin azaldığı ve temizleme süresinin sıvının kirliliği arttıkça uzadığı görüldü.

Ultrasonik temizlemede numune olarak alüminyum folyo kullanılmıştır. Folyo numuneler kullanılarak, ortam (sıvı) sıcaklığının temizleme süresine ve parça temizliğine etkileri test edilmiştir. Çeşitli sıcaklıklarda (20, 40, 50, 60, 70, 80 °C) yapılan testlerin sonuçlarına göre en uygun ultrasonik yıkama sıcaklığının 60°C olduğu, mikroskop görüntülerinin incelenmesi ile belirlenmiştir.



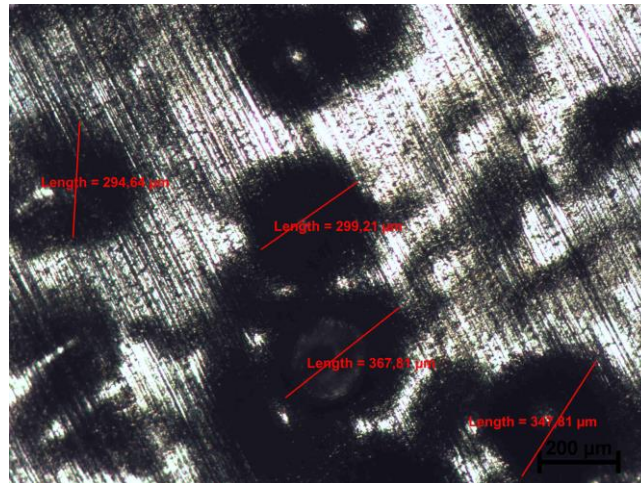
Şekil 8.1. Sıcaklığı 20°C olan suda, 3 dakika boyunca bekletilen folyonun üzerindeki kavitasyon etkisinin 50 X büyütme ile 200 µm skalasında ölçümü

Şekil 8.1’de bulunan mikroskop ölçümü, folyo üzerinde erozyon etkisi belirlenen kavitasyon alanı 50X büyütülerek 200 µm skalasına oranla Nikon MA100N mikroskobuyla incelendi.



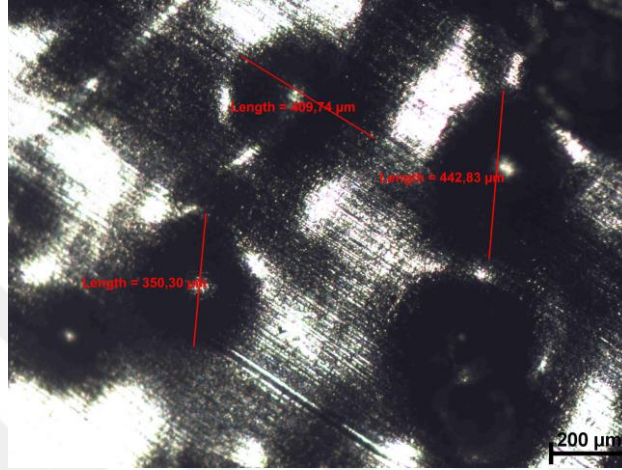
Şekil 8.2. Sıcaklığı 40°C olan suda, 3 dakika boyunca bekletilen folyonun üzerindeki kavitasyon etkisinin 50 X büyütme ile 200 µm skalasında ölçümü

Şekil 8.2’de siyah bölgeler kavitasyon erozyonunun başladığı bölgeler olarak tanımlanabilir. Şayet 3 dakikadan uzun süre temizleme tankı içerisinde malzemeyi bırakmaya devam etmiş olsaydık, folyo üzerinde kavitasyon bölgelerinde delikler oluşmaya başladığı görülecekti. Bu nedenle, en uygun sürede en etkili çalışma planlanarak yapıldı. Böylece gereksiz fazla enerji tüketiminin ve malzeme tahribinin de önüne geçilmiş oldu.



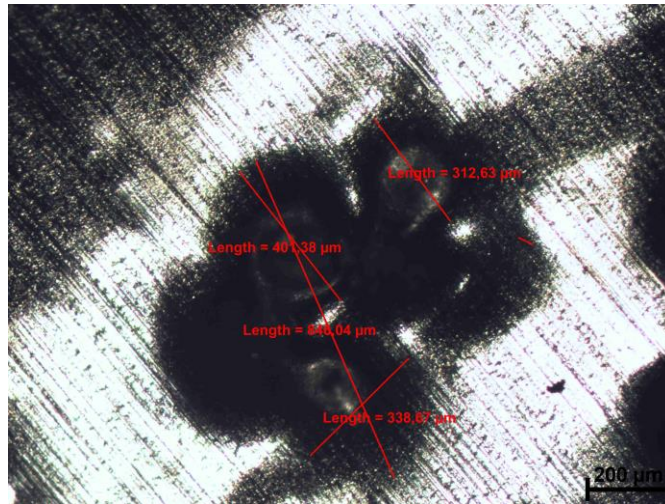
Şekil 8.3. Sıcaklığı 50°C olan suda, 3 dakika boyunca bekletilen folyonun üzerindeki kavitasyon etkisinin 50 X büyütme ile 200 µm skalasında ölçümü

Şekil 8.2’de 40°C sıcaklıkta 3 dakika boyunca bekletilen folyo üzerinde görüntülenen mikroskop ölçümünde kaviteasyon erozyonuna uğramış 537,36 μm ve 535,07 μm uzunluğunda 2 adet erozyon deliği oluştuğu görülmüştür. Şekil 8.3’te görülen ölçümde 50°C sıcaklıkta kaviteasyon baloncuklarının oluşum sayısının arttığı ancak oluşan kaviteasyon deliklerinin uzunluğunun azaldığı görülmüştür.

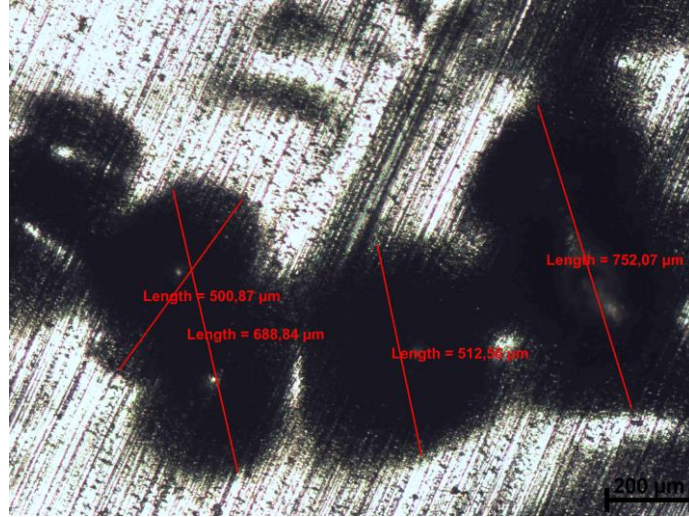


Şekil 8.4. Sıcaklığı 60°C olan suda, 3 dakika boyunca bekletilen folyonun üzerindeki kaviteasyon etkisinin 50 X büyütme ile 200 μm skalasında ölçümü

Şekil 8.3 ile Şekil 8.4’ü karşılaştıracak olursak; Şekil 8.3’te kaviteasyon erozyon boyutları ortalama 327,36 μm , Şekil 8.4’te ise ortalama kaviteasyon erozyonu 400,95 μm olduğu görülmüştür. Sıcaklık artmasıyla birlikte kaviteasyon erozyon boyutunun genişlediği ve kaviteasyon baloncuklarının etkisinin yüzey üzerinde daha fazla alana etki ettiği görülmüştür.



Şekil 8.5. Sıcaklığı 70°C olan suda, 3 dakika boyunca bekletilen folyonun üzerindeki kaviteasyon etkisinin 50 X büyütme ile 200 μm skalasında ölçümü



Şekil 8.6. Sıcaklığı 80°C olan suda, 3 dakika boyunca bekletilen folyonun üzerindeki kavitasyon etkisinin 50 X büyütme ile 200 µm skalasında ölçümü

Sıcaklık değişimi ile birlikte mikroskopta ölçüm yapılan kavitasyon patlamalarının ölçümleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, görüldüğü gibi kavitasyon etkisinin en verimli olarak görüldüğü sıcaklığın 60°C olduğu belirlenmiştir. Diğer eğrilerde kavitasyon boyutları düşüşe geçerken 60°C’de ise yükselme devam etmektedir.

Çizelge 8.1. Ultrasonik temizlemede sıcaklığın folyo üzerindeki kavitasyon etkisi

Sıcaklık °C	Kavitasyon Boyutları				Sıcaklık °C
20 °C	∅ 407,29 µm	∅ 520,35 µm			20 °C
40 °C	∅ 537,36 µm	∅ 535,07 µm			40 °C
50 °C	∅ 294,65 µm	∅ 299,21 µm	∅ 367,81 µm	∅ 347,81 µm	50 °C
60 °C	∅ 350,3 µm	∅ 409,74 µm	∅ 442,83 µm		60 °C
70 °C	∅ 312,64 µm	∅ 401,38 µm	∅ 338,67 µm		70 °C
80 °C	∅ 500,87 µm	∅ 512,56 µm	∅ 752,07 µm	∅ 668,84 µm	80 °C

Boyut µm

Daha etkili bir ultrasonik temizlik için tankın yan duvarlarına da ultrasonik transdüser montajı yapılarak seri bağlantı ile çalıştırılabilir. Veya tankın hem alt kısmına hem de yan duvarlarına ultrasonik başlıklar monte edilerek testler yapılabilir ve başlıkların en iyi yerleştirilme konumları ve aralarındaki mesafeler saptanabilir. Zaman ve bütçe nedeniyle bu çalışmalar şimdi yapılamamıştır. Ayrıca, denemeler sırasında akışkan kirliliğinin temizleme üzerinde önemli derecede etkili olduğu görüldüğünden, tank içerisindeki sıvının kirliliği algılayan sensörler kullanılarak, akışkan kirliliğinin ölçümü yapılabilir ve buna göre tank

içerisindeki temizleme sıvısının değişim süreleri, zamanları belirlenebilir. Bu konuda da ayrı bir çalışma yapılmasını önermekteyiz. Bu çalışmanın sonucuna göre otomatik sıvı alımı, sıvı boşaltımı yapan bir sistem geliştirilebilir. Mikro denetleyici sistem kullanılarak kristal çalışma frekansına göre otomatik ayarlanan bir yazılım yapılabilir. Temizliğin süresi, ultrasoniğin gücü, temizlenecek parçanın maddesine göre belirlenebilir ve tek tip seri üretim yapılan fabrikalarda montaj öncesi ürün temizliğinde zaman tasarrufu sağlayan bir sistem olarak geliştirilebilir.

Çalışmalar sırasında, ayrıca kristallerin sayıları arttırılmasında ve kristallerin bağlantısında gözle görünmeyen boşlukların kristal titredikçe kristale zarar verdikleri ve kristalin bir süre sonra çatlamasına neden olduğu tespit edilmiştir.

Covid -19 nedeniyle, YTÜ üniversitesinde ve firmada yapılacak atölye ve laboratuvar çalışmalarımıza sınırlandırılmalar getirilmiştir. Çünkü bu kurumlara giriş çıkışlar sınırlandırılmıştır. Diğer taraftan tezin azami süresi de bittiği için yapılan testlerin bir kısmı daha sonraki çalışmalara bırakılmıştır. Bu çalışmada yalnızca sıcaklığın ultrasonikteki etkisi üzerine çalışılmış, diğer tüm ultrasonik parametreler sabit tutulmuştur. Farklı malzemelerin temizlenme sıcaklık ve frekansları daha sonraki çalışmalarda devam edilecektir.

KAYNAKLAR

1. Şahin, M.E.(2014), *İki Dönüştürücü Ultrasonik Temizleme Sistemi Tasarımı*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
2. Güler, S.(2012) *Ses Ötesi Temizleme Etkinliğinin Çeşitli Parametrelere Göre İncelenmesi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
3. Lewis, J. P.,Gardner S. and Corp I.,(2005). “*Finite Element Simulation of a LongNarrow Work load immersed in an Ultrasonic Cleaning Bath-Practical 98 Comparison sand Implicationsfor Cleaning Efficacy*”, IEEE 2005 Ultrasonic Symposium, 699-702.
4. Yüksel, Z.,Yügrük N. Ve İlgürel N. (2017-2018). *Mimari Akustik*.
5. İnternet: *Dinamik Endüstriyel Ölçüm*, Ultrasonik Eğitim Çalışma Notları, URL:<https://studylibr.com/>(Son Erişim Tarihi: 22.08.2019)
6. Tangel, C.,(2009).*Mikro denetleyici Kontrollü Ultrasonik Temizleme Makine Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 7-20.
7. Ay, İ., Anaç, N.,(2002).*Ultrasonik Yöntemle Parça Temizleme*, Balıkesir Üniversitesi, IV Mühendislik-Mimarlık Sempozyumu.
8. Teke, M.(2012) *Akıllı Ultrasonik Temizleme Cihazı Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Bilgisayar Anabilim Dalı, Karabük
9. İnternet: URL:<https://bluewaveinc.com/ultrasonic-cleaning-101/>(Son Erişim Tarihi: 17.09.2019)
10. Verma, P.(2018).*Water Saving Comparison Study between Innovative and Conventional Cleaning Systems*, CSP Technologies.
11. Alp, İ.(1998) *Yüksek Frekanslı Ses Dalgalarının Cevher Zenginleştirmede Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
12. Onur, A. (2004). *Bazı Cevher Ve Atıkların Cevher Hazırlama Ve Flotasyonunda Ultrasonik Dalgaların Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı.
13. Blitz, J. (1971). *Ultrasonics: Methodsand Applications*, Butterworth&Co Ltd.
14. İnternet: URL: http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14_14_00_71570.pdf (Son Erişim Tarihi: 10.11.2019)

15. Binici, H., Kaplan H., Temiz H., Zengin H., Görür E.B., *Epoksi Ve Epoksinin Yapı Güçlendirilmesinde Kullanımı*
16. MEB. (2015). *No-Frost Dolabın Elektrik Devresi Arızaları Tesisat Teknolojisi Ve İklimlendirme*, Ankara.
17. Zelenka, J.(1986). *Piezoelectric Resonators And Their Applications*, Tokyo.
18. Özkütük, A. (2005). *Manuel ve Ultrasonik Temizlik, Genel Özellikleri ve Personeli Koruma*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Mikrobiyoloji ve Klinik Mikrobiyoloji Anabilim Dalı, İzmir.
19. Ebadı, A.(2015). *Biyolojik Etkileşim Kinetiğini Algulamada Yeni Bir Yaklaşım: Plazma Polimerizasyonu İle Modifiye Edilmiş Kuvars Ayar Çatalı*, Hacettepe Üniversitesi, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı, Ankara.
20. Brian, P.N.(1998). Leaky Guided Ultrasonic Waves in NDT.
21. Sür, A. (1976). *Bazı Püskürük Ve Metamorfik Kayaçların Yapılarında Yer Alan Önemli Üç Mineral: Kuvars - Feldispat- Mika*, Coğrafya Araştırma Dergisi, Sayı:8, Ankara Üniversitesi Basım Evi, Ankara.
22. İnternet: URL: https://www.pumpfundamentals.com/download/cavitation_prev.pdf (Son Erişim Tarihi:15.10.2019)
23. Özçep, F., Karabulut S., Özgüven B., Sanlı O. (2012). *Tahribatsız Test Yöntemleri Ve Ultrasonik Hız Ölçümleri*, İstanbul Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü.
24. İnternet: URL: “PowerBlog”
<http://atlascopepower.tech/http://atlascopepower.tech/dicas-de-manutencao-e-servicos/index.php>. (Son Erişim Tarihi: 27.09.19)
25. Microchip Tecnology, (2018). AVR4100: Selecting and Testing 32 KHz Crystal Oscillators for Microchip AVR® Microcontrollers.
26. İnternet: URL: <http://www.tnasc.com/> (Son Erişim Tarihi: 28.09.19)
27. Çiçekdağı, F.(2011). *Ultrasonik Ses Dalgalarının Oluşturduğu Akustik Kaviteyi Etkileyen Değişkenler Ve Kavite Enerjisi Ölçümü*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
28. Hesson, J.R. (2019). Hesson Ultrasonic, Fundamentals of Ultrasonic Cleaning.
29. Duran, K., .Bahtiyari İ. Ve Ekmekçi Körlü A. (2006). Ultrason Teknolojisi
30. İnternet: URL:
<http://www.yildiz.edu.tr/~fcelik/dersler/gemidirenci/PDF/9.%20Kavite.pdf>
(Son Erişim tarihi:15.12.2019)

31. İnternet: URL: <http://tr.ultrasonicmachiningtool.com/info/principle-and-advantages-of-piezoelectric-tran-30597919.html> (Son Erişim tarihi:15.12.2019)
32. Vig, J.R. (1997). Quartz Crystal Resonators And Oscillators.
33. MEB (2012), *Osilatörler ve Filtre Devreleri*, Elektrik Elektronik Teknolojisi, Ankara.
34. İnternet: URL: <https://www.karfo-endustriyel.com.tr/tr/urunler/endustriyel-mikroskoplar/ters-tip-endustriyel-mikroskoplar/nikon-ma100n> (Son Erişim Tarihi:20.12.2019)
35. pH, İletkenlik, Çözünmüş Oksijen, Sıcaklık (2014),, Tds Ve Bulanıklık Tayini, Çevre Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi
36. Aydınçak, İ. *Akıllı Malzemeler Ve Havacılık*, ODTÜ (hocam bu yayında tarih ve şehir yer almıyordu.)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :DERELİ GÜLER, Eda
 Uyruğu :Türkiye Cumhuriyeti
 Doğum tarihi ve yeri :29.03.1994 Bahçelievler
 Medeni hali :Evli,
 Telefon :05444644591
 Faks :
 e-mail : edaderelii@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği	
Lisans	İstanbul Gelişim Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Mekatronik Mühendisliği	2016
Lise	Zehra Mustafa Dalgıç Ticaret Meslek Lisesi Bilişim Teknolojileri Web Programcılığı	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	METU Elektromekanik Tıb. Cih. Mak. San. Ve Dış Tic. Ltd. Şti.	Satış ve Proje Mühendisi

Yabancı Dil
İngilizce

Yayımlar

-

Hobiler Ahşap ürünleri üretimi ve boyama



ĞELİŐİM ĞELİŐMEKTİR..