

**Derviş Berk Cönger**  
Mak. Yük. Müh.

**Uğur Emiroğlu**  
Mak. Yük. Müh.

**Alper Uysal**  
Doç. Dr.

**Erhan Altan**  
Prof. Dr.

Yıldız Teknik Üniversitesi  
Makine Mühendisliği Bölümü  
İstanbul

# Alüminyum 6061 Malzemenin MQL Yöntemi ile Frezelenmesinde Nano MoS<sub>2</sub> Katkılı Kesme Sıvısı Kullanımının Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi

*Bu çalışmada, Alüminyum 6061 malzeme kuru ve MQL (minimum miktarda yağlama) şartları altında frezelenmiştir. MQL yönteminde hem katkısız hem de nano MoS<sub>2</sub> (Molibden disülfür) katkılı bitkisel kesme sıvısı kullanılmış ve kesme kuvveti bileşenleri ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Frezeleme işlemleri, CNC dik işleme merkezinde sabit kesme derinliği (1.5 mm), ilerleme (0.1 mm/dev) ve kesme hızı (250 m/dak) değerlerinde gerçekleştirilmiştir. MQL yönteminde, kesme sıvısı tek nozülde 26 ml/saat ve 52 ml/saat olmak üzere iki farklı debide kesme bölgesine gönderilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, MQL yönteminde yüksek debide kesme bölgesine gönderilen nano akışkanın kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü azalttığı belirlenmiştir.*

*Anahtar Kelimeler: Minimum Miktarda Yağlama, Alüminyum 6061, Nano MoS<sub>2</sub>, Yüzey Pürüzlülüğü, Kesme Kuvvetleri*

## GİRİŞ

Modern imalat endüstrisi, üretilen parçaların boyutsal doğruluklarının artması, daha iyi yüzey kalitesine sahip olmaları, daha yüksek üretim adetlerini daha düşük takım aşınması ve maliyet ile elde etmek için sürekli olarak kendini geliştirmeye devam etmektedir [1]. Demir esaslı veya demir dışı yüksek mukavemetli parçalar talaşlı imalat yöntemleri ile işlenirken, kesme hızı ile birlikte artan sıcaklık takım dayanımını düşürür ve takımın aşınmasına, zarar görmesine sebep olur [2]. Kesme bölgesinde oluşan sıcaklığı düşürmek için, geleneksel sıvı soğutma yöntemleri endüstride sıkça kullanılmaktadır. Ancak, gerek çevresel etkileri gerek maliyetleri bakımından soğutma sıvılarının kullanımının azaltılması kritik önem taşımaktadır [3]. Soğutma sıvılarının maliyetinin toplam maliyetin %8-16'sı arasında olduğu kabul edilmektedir. Bilindiği üzere endüstride kullanılan kesme sıvılarının büyük çoğunluğu mineral esaslı olup, insan sağlığına ve çevreye zararlı ağır elementler içerebilmektedirler [4,5]. Bu sebeple, daha az kesme sıvısının kullanıldığı MQL (minimum miktarda yağlama) yöntemi uygulamalarda kendisine daha fazla yer bulmaktadır. MQL yönteminin diğer soğutma/yağlama sistemlerine karşı avantajları; daha düşük kesme yağı tüketimi, maliyet ve takım

aşınmasını düşürmesi, yüzey kalitesini artırması ve insan sağlığına ve çevreye olan zararları azaltması olarak sıralanabilir. MQL yöntemindeki yağ tüketimi diğer yöntemlere göre çok daha az olduğundan, sıvı soğutma yönteminde büyük bir maliyet olan ömrünü tamamlamış yağların atık maliyetinden de kurtulmuş olmaktadır [6]. Bu avantajlara ek olarak, işleme sonrası elde edilen talaşlar da neredeyse yağsız olduğu için, talaşların geri dönüşümü de daha ekonomik olmaktadır. Tüm bu avantajlarına rağmen, MQL yönteminin performansının artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmakta ve MQL yönteminin diğer soğutma yöntemleri ve kuru işleme ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Ginting vd. [7] Batı Avustralya'da orta boy bir işletmede sıvı soğutma yerine MQL uygulamasının teknik, ekonomik ve çevresel açıdan faydalarını araştırmışlardır. MQL kullanımının sera gazı emisyonlarını ve sıvı atıklarını azalttığını ve bu yeni soğutma/yağlama tekniğinin metal kesme operasyonlarında işleme performanslarını artırdığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak sıvı soğutma yerine MQL sisteminin kullanılmasının çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğe yardımcı olduğunu belirtmişlerdir. Bir diğer endüstriyel uygulama örneği

de 2008 yılında Ford Motor Firmasının Kuzey Amerika'daki fabrikasında, alüminyum vites kutuları, tork konvektör kutuları ve valf gövdelerinin işlendiği 200 işleme merkezinde sıvı soğutma yerine MQL sistemine geçilmesidir. Bu parçalar için MQL sistemi, firmada öncelikli kullanılan soğutma sistemi olarak belirlenmiştir. Firmanın Avrupa'da alüminyum silindir kapağı ve dökme demir motor blokları işlediği iki fabrikasında bazı uygulamalarda hala sıvı soğutma yöntemi kullanılsa da MQL yöntemi birinci soğutma yöntemi olarak 2011 yılından beri kullanılmaktadır. Yeni MQL uygulamaları da Brezilya ve Çin'de bulunan fabrikalarında sisteme alınmaya başlanmıştır [8]. Niketh ve Samuel [9] yaptıkları deneysel çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımını kuru, sıvı ve MQL yöntemi ile işlemişler ve yüzey kalitesi, takım aşınması ve kesme kuvvetlerini incelemişler. En iyi sonuçları sıvı soğutmada almışlar fakat MQL yönteminin kuru işlemekten daha iyi sonuçlar vermesi, sıvı soğutmaya yakın değerler elde edilmesi ve enerji kaynaklarının tüketimi açısından tercih edilebileceğini belirtmişlerdir. Sivaiah ve Chakradhar [10] çalışmalarında, AISI 630 paslanmaz çeliği kuru, sıvı soğutma, kriyojenik ve MQL yöntemleri ile farklı kesme derinliklerinde tormalamışlar, takım aşınmalarını ve talaş formlarını incelemişlerdir. Çalışmada, en iyi yüzey kalitesi kriyojenik soğutmada elde edilmiş olup, kriyojenik soğutmadan sonraki en iyi yüzey kalitesi ise MQL yönteminde elde edilmiştir. Yüzey kalitesinde olduğu gibi serbest yüzey aşınmasında da, en az aşınma kriyojenik soğutma ile elde edilmiş, kriyojenik soğutmadan sonra en az aşınma değerleri MQL yönteminde elde edilmiştir. Rahim ve Dorairaju [11] yaptıkları deneysel çalışmada, AISI 1045 malzemenin MQL yöntemi kullanarak tormalanmasını incelemişlerdir. Farklı nozül püskürtme çapı, farklı hava basıncı ve farklı nozül-kesici uç mesafeleri denenerek en uygun değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Daha büyük çaplı nozül ile yağlayıcı miktarının artmasıyla daha küçük kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklıkları elde etmişlerdir. MQL soğutma/yağlama sisteminin diğer yöntemler ile birlikte hibrit olarak da kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Stachurski vd. [12] yaptıkları çalışmada, soğutulmuş basınçlı hava ve MQL yöntemlerini birleştirerek kullanmışlardır. Dişli üretiminde kullanılan azdırma takımlarının bilenmesi sırasında yüzeyde oluşan mikro sertlik düşüşü bu hibrit yöntemle aşılmıştır. İki yöntemin birlikte kullanılması tek tek kullanılmaları veya sıvı soğutma ile soğutulmuş basınçlı havanın beraber kullanılmasından daha iyi sonuçlar vermiştir. Bileme sırasında tüketilen yağ miktarının azaltılmasıyla operatörün sağlığına ve çevreye olan olumlu etkilerinin sistemin avantajı olduğu belirtilmiştir. Mia [13] çalışmasında, AISI 4140 malzemesinin MQL yöntemi ile frezelemesinde optimum kesme hızı,

kesme derinliği ve soğutucu debisini belirlemişlerdir. Spesifik kesme enerjisi ve yüzey kalitesi parametrelerine göre MQL sisteminde optimum debinin 150 ml/saat olarak bulunduğunu belirtmişlerdir. Viswanathan vd. [14] çalışmalarında, 300 mm uzunluğundaki magnezyum alaşımından iş parçasını, kuru ve MQL soğutma yöntemi ile işlemişlerdir. MQL yönteminde 6 bar basınç ve 60 ml/saat debi kullanmışlardır. Çalışmada, takım aşınması ve kesme sıcaklıkları incelenmiş ve en uygun değerleri elde etmek için gerekli kesme hızı, ilerleme, paso ve soğutma sistemi belirlenmiştir. Genel olarak elde edilen sonuçlarda MQL sisteminin kuru işlemekten daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Patole ve Kulkarni [15] yaptıkları deneysel çalışmada, AISI 4340 malzemenin sıvı soğutma ve MWCNT (çok duvarlı karbon nano tüp) katkılı MQL yöntemi kullanılarak farklı ilerleme, debi, kesme derinliği ve kesici uç yarıçap değerlerinde tormalanması incelenmiştir. Doğru bir şekilde uygulandığında nano katkılı MQL yönteminin, kesme kuvvetlerinde ve yüzey kalitesinde ciddi iyileştirmeler sağladığı ve sıvı soğutmaya alternatif olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Marques vd. [16], süper alaşım Inconel 718 alaşımını bitkisel kesme yağının içerisine grafit ve MoS<sub>2</sub> ekleyerek MQL yöntemiyle tormalamışlar ve grafit ve MoS<sub>2</sub> katkısının yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğünü belirlemişlerdir. Paturi vd. [17] deneysel çalışmalarında, Inconel 718 alaşımının tormalamasında MQL ve yağa ağırlıkça %0.5 oranında mikro boyutlarda WS<sub>2</sub> (Tungsten disülfür) ekledikleri MQL yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada, MQL yağına WS<sub>2</sub> katkısının yüzey kalitesini %35'e kadar iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Rahim vd. [18] yaptıkları deneysel çalışmada, AISI 1045 malzemesini kuru ve yağ olarak sentetik ester kullandıkları MQL yöntemi ile tormalamışlardır. MQL yönteminin, kuru işlemeye göre kesme kuvvetlerini, kesme sıcaklığını, takım talaş temas mesafesini önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir. Ekinovic vd. [19], St52 çeliğinin tormalamasında kuru ve MQL yönteminde oluşan yağ-hava karışımına su ekledikleri iki yöntemi karşılaştırmışlardır. Yağ debisi 10-50 ml/saat ve su debisi ise 0.3-0.7 ml/saat olarak ayarlanmıştır. Kesme kuvvetlerinin kuru işlemeye oranla %17 oranına kadar düştüğü ifade edilmiştir. Kedare [20], kalıp çeliğinin parmak freze ile frezelenmesi işleminde MQL ve sıvı soğutma yöntemlerini karşılaştırmış ve MQL yöntemi ile yüzey kalitesinin %27'ye kadar iyileştiğini belirtmişlerdir. Joshi vd. [21] yaptıkları çalışmada, Inconel 600 alaşımı kuru, MQL ve nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alüminyum oksit) katkılı MQL yöntemi ile tormalanmıştır. Nano katkılı MQL yönteminin diğer soğutma yöntemlerine göre daha iyi yüzey kalitesi değerleri verdiği belirtilmiştir. Ramana [22] yaptıkları deneysel çalışmada, titanyum alaşımı kuru,

sıvı soğutma ve MQL yöntemleri ile tormalanmıştır. En iyi yüzey kalitesi aynı işleme parametreleri altında MQL yöntemi ile elde edilmiştir. Sekhar vd. [23], nano MoS<sub>2</sub> katkılı MQL yöntemini AISI 1040 çeliğinin tormalanmasında kullanmışlardır. Nano MoS<sub>2</sub> katkısını kanola, ayçiçeği ve ticari yağlarda kullanarak, MQL ile kuru işlemeyi ve yağların işleme performanslarını karşılaştırmışlardır. Yağdaki nano katkı oranının ağırlıkça %0.5 olduğu durumda en iyi yüzey kalitesini elde etmişler. Ayrıca, nano MoS<sub>2</sub> parçacıklarının 70-80 nm boyutlarında olduğu durumunda en iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Kumar vd. [24], AISI 4340 malzemesini kuru, sıvı soğutma ve MQL şartlarında tormalamışlardır. Araştırmacılar, MQL yönteminin kuru ve sıvı soğutma işlemlerine kıyasla yüzey kalitesini arttırdığını ifade etmişlerdir. Sharma vd. [25], AISI 1040 malzemesinin tormalanması işleminde kuru, sıvı soğutma, MQL ve nano SiO<sub>2</sub> (Silisyum oksit) katkılı MQL yöntemini kullanmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre nano SiO<sub>2</sub> katkılı MQL yönteminin, MQL ve sıvı soğutma yöntemlerine göre yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve kesme kuvvetlerinde daha iyi değerler verdiği belirlenmiştir. Yapılan ölçümlere göre yağ içerisine katılan nano parçacığın miktarı arttıkça hem yağın termal iletkenliğinin hem de viskozitesinin arttığı tespit edilmiştir. Termal iletkenliğin artması takım-iş parçası ara yüzündeki sıcaklığı düşmesinde olumlu etki yaparken, artan viskozite sprey basınç düşüşüne sebep olduğu için negatif bir etki yapmaktadır. Bu sebepten dolayı çalışmada optimum değer olarak ağırlıkça %1 nano katkı oranında karar kılınmıştır. Sharma vd. [26], AISI 1040 malzemesinin tormalanması işleminde kuru, sıvı, MQL ve ayrıca nano TiO<sub>2</sub> (Titanyum oksit) katkılı MQL yöntemlerini kullanmışlar ve nano TiO<sub>2</sub> katkılı MQL yönteminde takım aşınmasının nano katkısız MQL yöntemine göre %35.85 azaldığını belirtmişlerdir. Sharma vd. [27] yaptıkları başka bir çalışmada, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı MQL yöntemini AISI 1040 malzemesinin tormalanması işleminde denemişler ve nano katkısız MQL yöntemine göre kesme kuvvetlerinin %29.2 azaldığını belirtmişlerdir. Iqbal vd. [28], soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesi işleminde MQL ve kuru işleme yapmışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. MQL yöntemi ile takım ömrünün arttığını ve işlem maliyetinin düştüğünü belirtmişlerdir. Kuru işleme ile MQL yönteminin karşılaştırıldığı bir başka çalışmada ise Elmunafi vd. [29] tarafından yapılmıştır. Sertleştirilmiş AISI 420 çeliğinin kuru ve MQL yöntemleri ile tormalanması incelenmiştir. MQL yönteminde takım ömrünün daha uzun olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada, Alüminyum 6061 malzemesi kuru ve MQL yöntemi ile frezelenmiştir. MQL yönteminde katkısız ve nano MoS<sub>2</sub> katkılı bitkisel

kesme sıvısı kullanılmıştır. Bu yöntemlerin, kesme kuvveti bileşenleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği sabit tutulurken, MQL debisi olarak 2 farklı değer seçilmiş ve etkisi araştırılmıştır.

## DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### Malzeme ve Kesici Takım

Deneyisel çalışmalarda, havacılık ve denizcilik sektörlerinde birçok parçada, valf ve valf parçalarında, hidrolik pistonlarda kullanılan Alüminyum 6061-T651 malzemesi takma uçlu freze takımı ile işlenmiştir. Deneylerde kullanılan Alüminyum 6061-T651 malzemesinin kimyasal bileşenleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Alüminyum 6061-T651 Malzemesinin Kimyasal Bileşimi

Si	%0.76
Fe	%0.63
Cu	%0.3
Mn	%0.15
Mg	%0.99
Cr	%0.17
Ni	%0.014
Zn	%0.14
Ti	%0.023
Ga	%0.01
V	%0.02
Al	Kalan

Alüminyum 6061 iş parçası 140 mm x 170 mm x 30 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. İş parçasının 140 mm uzunluğundaki kenarından 16 mm genişliğinde ve 1.5 mm derinliğinde kanallar açılmıştır. Frezeleme işlemleri, iki adet kesici uç takılan 16 mm çapındaki takma uçlu freze takımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesici uç olarak APHT 100308FR-27P kaplamasız karbür uçlar kullanılmıştır. Deneylerde kesme sıvısı olarak Eraoil KT/2000 ticari bitkisel kesme sıvısı kullanılmıştır. Deneyisel çalışmalarda kullanılan nanolevhalar şeklindeki MoS<sub>2</sub> parçacıklar, %99.9 saflıkta ve 0.98 g/cm<sup>3</sup> yoğunluktadır. Nano MoS<sub>2</sub> parçacıkların boyutları 10-20 nm arasında değişmekte, yüzey alanı yaklaşık 120 m<sup>2</sup>/g ve ısıl iletkenlik katsayısı yaklaşık 35 W/mK'dir.

## Nano MoS<sub>2</sub> Katkılı Kesme Sıvısının Hazırlanması

Nano MoS<sub>2</sub> katkıli kesme sıvısı hazırlanırken, nano MoS<sub>2</sub> parçacıkların nemden arındırılması için iki saat 120°C’de Termal marka G11420SD model etüv kullanılarak kurutulmuşlardır. Hassas terazide tartılan ticari bitkisel kesme yağının ağırlıkça %1’i oranında nano MoS<sub>2</sub> katılmıştır. Daha sonra nano parçacıkların yağ içerisinde homojen olarak dağılması için emülsifer olarak yağ ağırlığının %2’si oranında lesitin tartılarak yağ içerisine katılmıştır. Oluşturulan karışım, Daihan marka WiseTis HG-15D model dijital homojenizatör vasıtasıyla 5000 dev/dak’da 2 saat süresince karıştırılmış ve homojen bir karışım elde edilmiştir. Elde edilen karışım MQL sisteminin daha önceden temizlenen yağ haznesine doldurularak nano katkıli MQL deneyleri gerçekleştirilmiştir.

## Frezeleme Deneylerinin Yapılması

Frezeleme deneyleri sırasında, kesme parametreleri olarak 1.5 mm sabit kesme derinliği, 0.1 mm/dev sabit ilerleme ve 250 m/dak sabit kesme hızı seçilmiştir. Deneyler, kuru kesme, katkısız ve nano MoS<sub>2</sub> katkıli bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda gerçekleştirilen frezeleme işlemleri CNC dik işleme merkezinde Şekil 1’de gösterildiği şekilde yapılmıştır. MQL sisteminde yağ ile havayı birbirine karıştırıp, kesme bölgesine göndermek için mikro yağlama sistemi kullanılmıştır. MQL akış debileri, literatürdeki çalışmalar göz önüne alınarak 26 ml/saat ve 52 ml/saat olarak seçilmiş ve tek nozülün kesme bölgesine gönderilmiştir. MQL metodu ile frezeleme işlemlerinde, nozül literatür çalışmaları da göz önünde bulundurularak, kesme bölgesine yaklaşık 30 mm mesafede ve 45° açı ile yerleştirilmiştir.



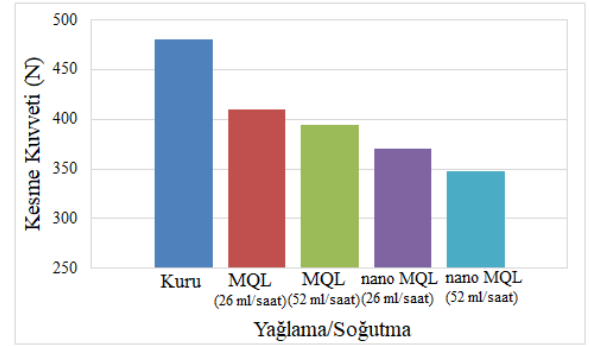
Şekil 1. Frezeleme deneylerinin yapıışı

Kesme ve ilerleme kuvvetleri iş parçası altına yerleştirilen Kistler 92578A dinamometre ile ölçülmüştür. Dinamometre, üç ekseninde de 5 N – 5 kN arasında kuvvet ölçümü yapabilmekte ve 0-70°C sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mitutoyo SurfTest SJ-210 yüzey pürüzlülük cihazı ile yapılmıştır. Kanal üzerinde yapılan 10 adet ölçümün ortalaması alınarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

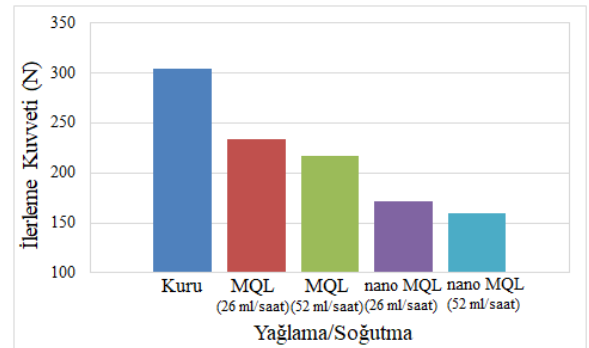
## DENEYSEL SONUÇLAR

### Kesme ve İlerleme Kuvvetleri

Şekil 2 ve Şekil 3’de kesme ve ilerleme kuvvetlerinin, yağlama/soğutma şartlarına göre değişimi görülmektedir. Deneysel sonuçlara göre en küçük kesme ve ilerleme kuvvetleri, nano MoS<sub>2</sub> katkıli MQL yönteminde, toplam 52 ml/saat debi uygulandığında elde edilirken en yüksek kesme ve ilerleme kuvvetleri kuru kesme işleminde elde edilmiştir.



Şekil 2. Kesme kuvvetinin yağlama/soğutma koşulu ile değişimi



Şekil 3. İlerleme kuvvetinin yağlama/soğutma koşulu ile değişimi

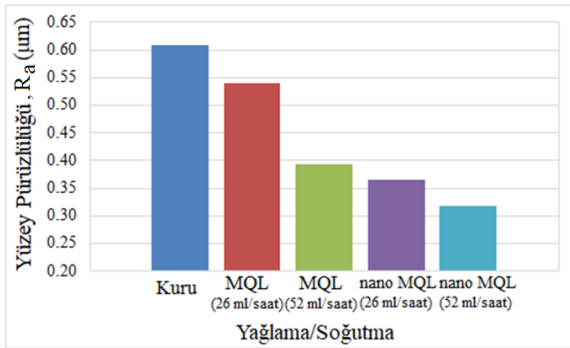
MQL yönteminde, aerosol debisinin kesme ve ilerleme kuvvetleri üzerine etkili olduğu Şekil 2 ve Şekil 3’den görülmektedir. MQL yönteminde, debi 26 ml/saat’den 52 ml/saat’e çıkartıldığında kesme kuvveti %3.9 oranında ve ilerleme kuvveti %7.1

oranında azalmıştır. Aerosol debisindeki artışın kesme kuvvetlerine etkisi, nano katkılı MQL yöntemlerinde de görülmüştür. Nano MoS<sub>2</sub> katkılı debinin 26 ml/saat'den 52 ml/saat'e çıkartıldığında kesme ve ilerleme kuvvetleri sırasıyla %6.2 ve %7.4 oranında azalmıştır.

MQL yönteminde yağa nano katkısı kesme ve ilerleme kuvvetlerini etkilemiştir. MQL yönteminde nano katkı olarak MoS<sub>2</sub> kullanımı, nano parçacıkların takım-iş parçası ve takım-talaş ara yüzeylerine nüfuziyeti ile oluşan tabaka sayesinde, yağlama performansını arttırmış ve kesme ve ilerleme kuvvetlerini düşürmüştür. Debi değerinin 26 ml/saat olduğu nano MoS<sub>2</sub> katkılı MQL yönteminde, katkısız yöntemle göre kesme kuvveti %9.7 oranında azalırken ilerleme kuvveti %26.5 oranında azalmıştır. Debi değerinin 52 ml/saat olduğu nano MoS<sub>2</sub> katkılı MQL yönteminde ise katkısız MQL yöntemine göre kesme kuvveti %11.8 oranında ve ilerleme kuvveti %26.7 oranında düşmüştür.

### Yüzey Pürüzlülük Sonuçları

Yüzey pürüzlülük değerlerinin yağlama/soğutma şartları ile değişimi Şekil 4'de görülmektedir. MQL yönteminde nano MoS<sub>2</sub> katkısının takım-iş parçası ara yüzüne nüfuziyeti sonucu, nano MoS<sub>2</sub> parçacıkların yuvarlanma ve parlatma etkisi yüzey kalitesinin artmasında rol oynamaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm değerlerine göre minimum yüzey pürüzlülük değeri uygulanan MQL debisinin 52 ml/saat olduğu nano MoS<sub>2</sub> katkılı MQL yönteminde elde edilirken maksimum yüzey pürüzlülük değeri ise kuru işlemede ölçülmüştür.



Şekil 4. Yüzey pürüzlülüğünün yağlama/soğutma koşulu ile değişimi

MQL debisinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi bulunmaktadır. MQL yönteminde debinin 26 ml/saat'den 52 ml/saat'e çıkartılmasıyla yüzey pürüzlülüğü %27.1 oranında düşmüştür. Nano MoS<sub>2</sub> katkılı 26 ml/saat debili MQL yönteminde, debinin 52 ml/saat'e çıkartılmasıyla yüzey pürüzlülüğü %12.9 oranında azalmıştır.

MQL yönteminde yağa nano katkısı, nano MoS<sub>2</sub> parçacıkların yağlayıcılık etkisinden dolayı yüzey pürüzlülüğü değerlerini de etkilemiştir. Nano MoS<sub>2</sub> katkılı MQL yönteminde 26 ml/saat ve 52 ml/saat debi değerlerinde yüzey pürüzlülükleri, katkısız kesme sıvısının kullanıldığı duruma göre sırasıyla %32.4 ve %19.2 oranlarında azalmıştır.

### SONUÇ

Bu deneysel çalışmada, Alüminyum 6061 malzemesi, kuru işleme ve MQL yöntemi kullanılarak sabit kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme değerlerinde frezelenmiştir. MQL yönteminde, katkısız ve nano MoS<sub>2</sub> katkılı bitkisel kesme sıvıları kullanılmıştır. Yağlama/soğutma şartlarının kesme ve ilerleme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- MQL yöntemi ile frezelemede, kuru işlemeye göre yüzey pürüzlülüğü azalmış, kesme ve ilerleme kuvvetleri düşmüştür.
- MQL yöntemi ile frezelemede debi arttırıldıkça, nano MoS<sub>2</sub> katkılı ve katkısız durumlarda yüzey pürüzlülükleri ve kesme ve ilerleme kuvvetleri azalmıştır.
- MQL yönteminde kesme sıvısına nano MoS<sub>2</sub> katkıları işleme performansını arttırmıştır. Nano MoS<sub>2</sub> parçacıklarının yağlama özelliklerini artırması ve takım-iş parçası sürtünme yüzeyine daha iyi nüfuziyet sağlaması sayesinde yüzey pürüzlülüğünün azalmasına ve kesme ve ilerleme kuvvetlerinin düşmesine neden olmuştur.

### INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF NANO MOS<sub>2</sub> REINFORCED CUTTING FLUID ON CUTTING FORCES AND SURFACE ROUGHNESS IN MILLING OF ALUMINUM 6061 BY USING MQL METHOD

In this study, Aluminum 6061 material was machined under dry and MQL (minimum quantity lubrication) conditions. In the MQL method, both pure and nano MoS<sub>2</sub> (Molybdenum disulfide) reinforced vegetable cutting fluids were used and cutting force components and surface roughness were investigated. Milling operations were performed at the CNC vertical machining center at constant depth of cut (1.5 mm), feed (0.1 mm/rev) and cutting speed (250 m/min). In the MQL method, the cutting fluid was pulverized to the cutting zone through a single nozzle at two different MQL flow rates as 26 ml/h and 52 ml/h. Based on the experimental studies, it was determined that the nanofluid sent to the cutting zone at high MQL flow rate decreased the cutting forces and surface roughness in MQL method.

**Keywords:** Minimum Quantity Lubrication, Aluminum 6061, Nano MoS<sub>2</sub>, Surface Roughness, Cutting Forces

## KAYNAKÇA

1. Suresh, R.K., Krishnaiah, G. ve Venkataramaiah, P., An Experimental Investigation with Minimum Quantity Lubrication and its Comparison with Various Vegetable Oil Based Cutting Fluids during Turning, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 8758-8768.
2. Sharma, A.K., Tiwari, A.K. ve Dixit, A.R., Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Machining Processes using Conventional and Nano Fluid Based Cutting Fluids: A Comprehensive Review, *Journal of Cleaner Production*, 127 (2016), 1-18.
3. Liu, Z., An, Q., Xu, J., Chen, M. ve Han, S., Wear Performance of (nc-ALTiN)/(a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) Coating and (nc-ALCrN)/(a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) Coating in High Speed Machining of Titanium Alloys under Dry and Minimum Quantity Lubrication (MQL) Conditions, *Wear*, 305 (2013), 249-259.
4. Maruda, R.W., Krolczyk, G.M., Feldshtein, E., Nieslony, P., Tyliczszak, B. ve Pusavec, F., Tool Wear Characterizations in Finish Turning of AISI1045 Carbon Steel for MQCL Conditions, *Wear*, 372-373 (2017), 54-67.
5. Pereira, O., Martín-Alfonso, J.E., Rodríguez, A., Calleja, A., Fernandez-Valdivielso, A. ve Lopez de Lacallei, L.N., Sustainability Analysis of Lubricant Oils for Minimum Quantity Lubrication Based on Their Tribo-rheological Performance, *Journal of Cleaner Production*, 164 (2017), 1419-1429.
6. Benedicto, E., Carouc, D. ve Rubio, E.M., Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems used in Machining Processes, *Advances in Material & Processing Technologies Conference, Procedia Engineering*, 184 (2017), 99-116.
7. Ginting, Y.R., Boswell, B., Biswas, W. ve Islam, N., Advancing Environmentally Conscious Machining, *12<sup>th</sup> Global Conference on Sustainable Manufacturing, Procedia CIRP*, 26 (2015), 391-396.
8. Tai, B.L., Stephenson, D.A., Furness, R.J. ve Shih, A.J., Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Automotive Powertrain Machining, *6<sup>th</sup> CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014, Procedia CIRP*, 14 (2014), 523-528.
9. Niketh, S. ve Samuel, G.L., Drilling Performance of Micro Textured Tools under Dry, Wet and MQL Condition, *Journal of Manufacturing Processes*, 32 (2018), 254-268.
10. Sivaiah, P. ve Chakradhar, D., Effect of Cryogenic Coolant on Turning Performance Characteristics during Machining of 17-4 PH Stainless Steel: A Comparison with MQL, Wet, Dry Machining, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21 (2018), 86-96.
11. Rahim, E.A. ve Dorairaju, H., Evaluation of Mist Flow Characteristic and Performance in Minimum Quantity Lubrication (MQL) Machining, *Measurement*, 123 (2018), 213-225.
12. Stachurski, W., Sawicki, J., Wojcik, R. ve Nadolny, K., Influence of Application of Hybrid MQL-CCA Method of Applying Coolant during Hob Cutter Sharpening on Cutting Blade Surface Condition, *Journal of Cleaner Production*, 171 (2018), 892-910.
13. Mia, M., Mathematical Modeling and Optimization of MQL Assisted End Milling Characteristics Based on RSM and Taguchi Method, *Measurement*, 121 (2018), 249-260.
14. Viswanathan, R., Ramesh, S. ve Subburam, V., Measurement and Optimization of Performance Characteristics in Turning of Mg Alloy under Dry and MQL Conditions, *Measurement*, 120 (2018), 107-113.
15. Patole, P.B. ve Kulkarni, V.V., Optimization of Process Parameters based on Surface Roughness and Cutting Force in MQL Turning of AISI 4340 using Nano Fluid, *Materials Today: Proceedings*, 5 (2018), 104-112.
16. Marques, A., Guimarães, C., da Silva, R.B., Fonseca, M.P.C., Sales, W.F. ve Machado, A.R., Surface Integrity Analysis of Inconel 718 after Turning with Different Solid Lubricants Dispersed in Neat Oil Delivered by MQL, *Procedia Manufacturing*, 5 (2016), 609-620.
17. Paturi, U.M.R., Maddu, Y.R., Maruri, R.R. ve Narala, S.K.R., Measurement and Analysis of Surface Roughness in WS<sub>2</sub> Solid Lubricant Assisted Minimum Quantity Lubrication (MQL) Turning of Inconel 718, *Procedia CIRP*, 40 (2016), 138-143.
18. Rahim, E.A., Ibrahim, M.R., Rahim, A.A., Aziz, S. ve Mohid, Z., Experimental Investigation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) as a Sustainable Cooling Technique, *Procedia CIRP*, 26 (2015), 351-354.
19. Ekinovic, S., Prcanovic, H. ve Begovic, E., Investigation of Influence of MQL Machining Parameters on Cutting Forces during MQL Turning of Carbon Steel St52-3, *Procedia Engineering*, 132 (2015), 608-614.
20. Kedare, S.B., Borse, D.R. ve Shahane, P.T., Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Surface Roughness of Mild Steel of 15HRC on Universal Milling Machine, *Procedia Materials Science*, 6 (2014), 150-153.

21. Joshi, K.K., Behera, R.K. ve Anurag, Effect of Minimum Quantity Lubrication with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid on Surface Roughness and its Prediction using Hybrid Fuzzy Controller in Turning Operation of Inconel 600, *Materials Today: Proceedings*, 5 (2018), 20660-20668.
22. Ramana, M.V., Optimization and Influence of Process Parameters on Surface Roughness in Turning of Titanium Alloy under Different Lubricant Conditions, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 8328-8335.
23. Sekhar, K.C., Reddy, V.V.R., Srikiran, S., Daniel, M. ve Kumar, S., Investigating the Effect of Nano Crystalline MoS<sub>2</sub> Particles on the Surface Integrity of Turned Components, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 7527-7532.
24. Kumar, S., Singh, D. ve Kalsi, N.S., Analysis of Surface Roughness during Machining of Hardened AISI 4340 Steel using Minimum Quantity Lubrication, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 3627-3635.
25. Sharma, A.K., Tiwari, A.K., Dixit, A.R. ve Singh, R.K., Investigation into Performance of SiO<sub>2</sub> Nanoparticle Based Cutting Fluid in Machining Process, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 133-141.
26. Sharma, A.K., Tiwari, A.K., Singh, R.K. ve Dixit, A.R., Tribological Investigation of TiO<sub>2</sub> Nanoparticle based Cutting Fluid in Machining under Minimum Quantity Lubrication (MQL), *Materials Today: Proceedings*, 3 (2016), 2155-2162.
27. Sharma, A.K., Tiwari, A.K., Singh, R.K. ve Dixit, A.R., Characterization and Experimental Investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticle based Cutting Fluid in Turning of AISI 1040 Steel under Minimum Quantity Lubrication (MQL), *Materials Today: Proceedings*, 3 (2016), 1899-1906.
28. Iqbal, A., Al-Ghamdi, K.A. ve Hussain, G., Effects of Tool Life Criterion on Sustainability of Milling, *Journal of Cleaner Production*, 139 (2016), 1105-1117.
29. Elmunafi, M.H.S., Kurniawan, D. ve Noordin, M.Y., Use of Castor Oil as Cutting Fluid in Machining of Hardened Stainless Steel with Minimum Quantity of Lubricant, *Procedia CIRP*, 26 (2015), 408-411.