Afro-Asian Journal of Scientific Research (AAJSR)
المجلة الأفروآسيوية للبحث العلمي
E-ISSN: 2959-6505
Volume 4, Issue 1, 2026
Page No: 41-47
Website: https://aajsr.com/index.php/aajsr/index
SJIFactor 2024: 5.028 ISI 2025: 0.915 معامل التأثير العربي (AIF) 2025: 0.76

Study the Effect of Cryogenic Cooling Technology using Refrigerant Gas R134a on Surface Roughness During Turning Processes of Aluminum Alloy

Mustafa M. Abdulgadir[1*], Bashar A. Aisha[2], Zakaria S. Ibrahim[3]
[1,2,3]College of Engineering Technologies, Al Qubbah, Libya

دراسة تأثير تقنية التبريد العميق باستخدام غاز التبريد *R134a* على خشونة السطح خلال عمليات الخراطة لسبيكة المومنيوم

مصطفى محمود عبدالقادر محمود[1*]، بشار أحمد عائشة[2]، زكريا صالح إبراهيم[3]
[1،2،3]كلية التقنيات الهندسية، القبة، ليبيا

*Corresponding author: elgubba2008@gmail.com

Received: November 08, 2025 | Accepted: December 25, 2025 | Published: January 26, 2026

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Abstract:
Surface roughness is one of the most important quality parameters in turning operations, as it directly affects the mechanical and frictional properties of the final component. Factors affecting surface roughness include spindle speed, feed speed, and the cooling system used. This study aimed to evaluate and analyze the differences in surface roughness between dry machining and cryogenic machining using R134a gas, across a range of variable spindle and feed speeds. Cutting parameters used were: spindle speeds: 600, 800, 1000 rpm; feed speeds: 0.10, 0.15, 0.20 mm/rev and depth of cut 1mm the workpiece was aluminum alloy 2024; cooling type: dry machining without cooling and cryogenic cooling using a continuous spray of R134a gas at a pressure of 5 bar, directed directly onto the cutting area. Surface roughness (Ra) was measured using a roughness meter, and roughness values were measured from three readings for each machining condition. Measurements showed a significant decrease in Ra values when using deep cooling compared to dry machining. The measurements also showed that reducing the feed rate had the greatest effect on reducing surface roughness, followed by increasing the cutting speed. Therefore, for optimal surface quality, a low feed rate and a high cutting speed are recommended.

Keywords: Turning process, Machining parameters, Cryogenic cooling, Al 2024, Surface roughness.

الملخص:
تعتبر خشونة السطح (Surface Roughness) من أهم معايير جودة القطع في عمليات الخراطة، حيث تؤثر بشكل مباشر على خصائص ميكانيكية واحتكاكية للمكوّن النهائي. من العوامل المؤثرة على خشونة السطح: سرعة الدوران، سرعة التغذية، ونظام التبريد أو التشحيم المستخدم. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم وتحليل الفروق في خشونة السطح بين حالتي التشغيل الجاف (Dry Machining) والتبريد العميق باستخدام غاز R134a (Cryogenic Cooling)، عبر مجموعة من سرعات الدوران والتغذية المتغيرة، حيث استخدمت معاملات القطع: سرعات دوران: 600 rpm، 800، 1000، سرعات تغذية:mm/rev 0.10، 0.15، 0.20، وعمق قطع ثابت بمقدار 1 mm والعينة المشغلة كانت من سبيكة الألومنيومAL2024، نوع التبريد: تشغيل جاف بدون تبريد وتبريد عميق عبر رذاذ مستمر من غاز R134a بضغط 5 بار، موجه مباشرة إلى منطقة القطع. تم قياس خشونة السطح Ra باستخدام جهاز قياس الخشونة، واحتُسبت قيم

الخشونة من ثلاث قراءات لكل حالة تشغيل. أظهرت القياسات انخفاضًا ملحوظًا في قيم Ra عند استخدام التبريد العميق مقارنة بالتشغيل الجاف. كما بينت القياسات أن تقليل معدل التغذية له التأثير الأكبر في تقليل خشونة السطح، يليه زيادة سرعة القطع. بالتالي، للحصول على أفضل جودة سطح، يُوصى باستخدام معدل تغذية منخفض وسرعة قطع عالية.

الكلمات المفتاحية: عملية الخراطة، معاملات التشغيل، التبريد العميق، سبيكة الومنيوم Al 2024، خشونة السطح.

المقدمة (Introduction):

تُعد خشونة السطح أحد أهم العوامل المؤثرة في جودة الأجزاء المصنعة بالطرق التقليدية، لاسيما في عمليات الخراطة، حيث تؤثر بشكل مباشر على خصائص المنتج مثل الاحتكاك، التآكل، والتماسك السطحي. وفي السنوات الأخيرة، حظي التبريد العميق باستخدام النيتروجين السائل (LN_2) أو ثاني أكسيد الكربون السائل (CO_2) باهتمام كبير كوسيلة فعّالة لتحسين جودة السطح وتقليل التأثيرات السلبية المرتبطة بدرجات الحرارة العالية أثناء القطع.

تشير العديد من الدراسات إلى أن التبريد العميق أثناء عمليات الخراطة يقلل بشكل ملحوظ من خشونة السطح (Ra) الناتجة عن العملية. والسبب يعود إلى تقليل درجة الحرارة في منطقة القطع، ما يؤدي إلى تقليل التصاق المادة المشغولة على أداة القطع(BUE) ، والحفاظ على حد القطع حادًا، وتقليل الاهتزازات الناجمة عن تآكل الأداة.

أظهرت دراسة لـ (Kumaresan et al., 2019) أن التبريد العميق باستخدام LN_2 أدى إلى انخفاض كبير في خشونة السطح لسبائك الألومنيوم Al-6061، حيث بلغت قيمة Ra حوالي 0.69 ميكروميتر مقارنة بـ 2.23 ميكروميتر في الخراطة الجافة، أي تحسن بنسبة تصل إلى 69%. في دراسة أخرى نشرها (Domenico Umbrello et al., 2012)، أظهر التبريد العميق باستخدام LN_2 تحسنًا ملحوظًا في الخشونة السطحية أثناء خراطة سبيكة الفولاذ المقسى AISI52100، حيث بلغ أدنى مستوى للخشونة حوالي 0.24 ميكروميتر عند التشغيل الجاف مقارنة بـ 0.16 ميكروميتر باستخدام LN_2، مما يشير إلى فعالية التبريد العميق، لا سيما عند استخدام ضغط عالٍ للغاز.

أشار (Balaji et al., 2021) في مراجعتهم أن استخدام التبريد العميق أدى إلى تقليل تكوّن (Built-Up Edge) وتحسين جودة السطح النهائي وزيادة عمر الحد القاطع وتقليل قوى القطع وتحسين عملية إنتاج الرائش، وهو ما انعكس إيجابًا على تقليل قيم Ra بشكل واضح. كما أشار (Yakup Yildiz et al., 2008) في مراجعتهم إلى أن عمليات القطع باستخدام التبريد العميق عند المقارنة مع القطع الجاف والتبريد التقليدي، لوحظ تحسين كبير في عمر الأداة ودقة أبعاد تشطيب السطح من خلال تقليل تآكل الأداة من خلال التحكم في درجة حرارة التشغيل بشكل مرغوب فيه في منطقة القطع.

في ذات السياق، أظهرت دراسة لـ (Shane Y. Hong et al., 2006) أن LN_2 يُنتج تزييت عن طريق توليد غشاء هيدروديناميكي، ذو معاملات احتكاك منخفضة جدًا. ويُنتج هذا الغشاء الهيدروديناميكي نفس تأثير التزييت بغض النظر عن نوع المادة المشغلة، حيث يعمل كمشحم صلب، ويُوفر تزييتًا فعالًا خصوصاً مع عدد القطع الغير مطلية.

يُعد استخدام غاز R134a كتقنية تبريد عميق في عمليات القطع تطورًا مهمًا نحو تحقيق أداء تشغيلي فائق وكفاءة إنتاجية محسّنة، مع الحفاظ على جودة عالية للأسطح المصنعة وتقليل الاعتماد على سوائل التبريد التقليدية ذات التأثير البيئي السلبي. يمتاز R134a بخواص حرارية مناسبة تُمكّنه من امتصاص الحرارة بسرعة من منطقة القطع، مما يساهم في تقليل درجة الحرارة، والحد من تآكل الأداة، وتحسين جودة السطح النهائي. ومع التقدم في تقنيات التحكم في تدفق الغاز، وإعادة تدويره بشكل فعال وآمن، تزداد إمكانية اعتماد هذه التقنية على نطاق واسع، خاصة في الصناعات الدقيقة والمعادن ذات القساوة العالية أو صعبة التشغيل مثل سبائك الألومنيوم والتيتانيوم. ومن المتوقع أن يساهم الاستخدام الموسع لهذه التقنية في تحقيق الاستدامة البيئية وتقليل الانبعاثات المرتبطة بعمليات التشغيل التقليدية.

التجارب المعملية (Experiments):

العينة المستخدمة (Sample Used):

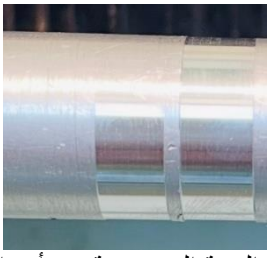
تم تجهيز عينة من سبيكة الألومنيوم AL 2024 بقطر 20mm وطول 150mm وذلك لغرض إجراء عمليات الخراطة عليها حسب التجارب التي تم تصميمها وفقاً لظروف التشغيل.

جدول (1): يبين التركيب الكيمائي لسبيكة Al2024

العنصر		الومنيوم	سيليكون	حديد	نحاس	منجنيز	مغنيسيوم	كروم	زنك	تيتانيوم	أخرى
Wt. %	min	Bal	-	-	3.8	0.3	1.2	-	-	-	-
	max	Bal	0.5	0.5	4.9	0.9	1.8	0.1	0.25	0.15	0.05

جدول (2): يبين الخصائص الميكانيكية السبيكة Al2024

Density	2.78 g/cc
Tensile strength	483 MPa
yield strength	345 MPa
Modulus of elasticity	73.1 GPa



الشكل (1): يوضح العينة المستخدمة بعد أجراء عمليات التشغيل.

الآلـة المستخدمـة في عمليـة الخراطـة (CNC Machine used):

تم استخدام آلة تحكم رقمي الحاسوب (CNC) نوع: (PC Controlled CNC Turning Center, Type Boxford T220)

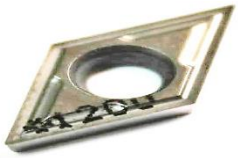
الشكل (2): يوضح آلة الخراطة المستخدمة.

جدول (3): يبين مواصفات آلة CNC المستخدمة التجارب.

1	**swing over bed**	210 mm
2	**X axis travel**	150 mm
3	**Z axis travel**	350 mm
4	**Spindle motor**	1,1 KW
5	**spindle speed**	200-4000 RPM
6	**feed rate**	0-1500 mm\min

عدة القطـع المستخدمـة (Carbide insert used):

تم استخدام لقم كربيديه ماسية الشكل رقم (DCGT090202N-SC) تصنيع شركة (Sumitool) حيث تم استخدام لقمة كربيديه جديدة لكل اختبار.



الشكل (3): يوضح شكل اللقم الكربيدية المستخدمة.

جدول (4): يبين مواصفات اللقم الكربيدية المستخدمة.

D	**Diamond shape**
C	clearance angle: 7° (positive rake).
G	Tolerance class (high precision).
T	Insert with hole and chip breaker.
09	mm -9.7insert size: length of cutting edge
02	Insert thickness: 2.3 mm
02	mm 0,2 : Nose radius
N	chip breaker type

غـاز التبـريـد المستخـدم R134a:

تم استخدام غاز R134a في حالة التبريد العميق ذو الاستعمال الامن فهو غير سام وغير قابل الاشتعال ولا يسبب تأكل لعدة القطع وللمادة المشغلة، حيث أنه يتحول من سائل إلى غاز عند إطلاقه بالبيئية المحيطة وذلك لأن درجة غليانه هي (-26.1C°).

جدول (5): يبين خصائص غاز التبريد R134a.

1	**Boiling Point**	-26.1 C°
2	**Auto - Ignition Temp.**	770 C°
3	**Ozone Depletion level.**	0

الشكل (4): يوضح تركيب فوهة امداد غاز التبريد R134a.

جهاز قياس خشونة السطح (Surface roughness instrument):

تم استخدام جهاز نوع Mitutoyo SJ-210 لقياس خشونة السطح المشغل R_a حسب المواصفات القياسية (ISO1997) ولمسافة تحرك للمستشعر قدرها 5mm ذهابا ورجوعاً وبسرعة 0.25mm/s، حيث تم أخذ القياسات في ثلاثة مواضع مختلفة على سطح الأسطوانة تم اخذ المتوسط الحسابي.

الشكل (5): يوضح الجهاز المستخدم لقياس خشونة السطح نوع Mitutoyo SJ-210.

معاملات القطع المستخدمة (Cutting parameters):

تم استخدام معاملات القطع الموضحة بالجدول التالي:

جدول (6): يبين معاملات القطع المستخدمة بالتجارب.

المستوى	سرعة القطع (rpm)	سرعة التغذية (mm/rev)	عمق القطع (mm)	نوع التبريد
1	600	0.1	1	جاف – تبريد عميق
2	800	0.15	1	جاف – تبريد عميق
3	1000	0.2	1	جاف – تبريد عميق

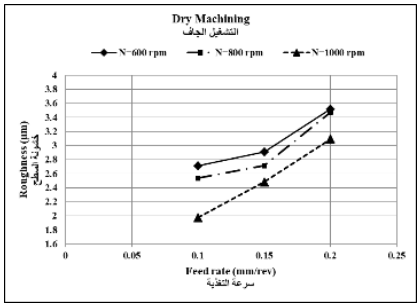
استخدمت طريقة تاقوشي (Taguchi Orthogonal Array Design) (3^3) L9 لتصميم التجارب لعدد متغيرين وهم سرعة القطع وسرعة التغذية وبعدد ثلاثة مستويات لكل منها حسب مع عمق قطع ثابت كما هو موضح بالجدول السابق كما تم استخدام تحليل تاقوشي (Taguchi analysis) لتحليل النتائج بطريقة (Means) وطريقة (signal to noise ratios) لتحديد ترتيب وتأثير المتغيرات المستخدمة.

النتائج - تحليل النتائج (Results – Analysis of Results):

بعد إجراء التجارب العملية وفقاً لمستويات معاملات القطع وعند التشغيل الجاف بدون استخدام وسيط تبريد وعند استخدام تبريد عميق عن طريقة استخدام غاز التبريد R134a، وبعد أخذ قياسات خشونة السطح للعينات، تم الحصول على النتائج التالية:

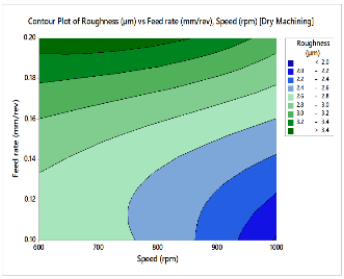
1. التشغيل الجاف (بدون وسيط تبريد) (Dry Machining):

يبين الشكل (6) تأثير سرعة التغذية على خشونة السطح في حالة التشغيل الجاف وعند سرعات دوران (600، 800، 1000 rpm)، نلاحظ أن زيادة سرعة التغذية من (0.1mm/rev) الي (0.2mm/rev) تؤدى إلى زيادة واضحة في خشونة السطح لجميع سرعات القطع المستخدمة. وهذا بسبب ان زيادة معدل التغذية تؤدى إلى زيادة سمك الرائش (chip thickness) ما ينتج عنه سطح أكثر خشونة.



الشكل (6): بين الشكل العلاقة بين سرعة التغذية وخشونة السطح عند التشغيل الجاف وعند سرعات القطع (600، 800، 1000 rpm).

كما نلاحظ إنه عند معدل تغذية ثابت، فإن زيادة سرعة الدوران تؤدى الى تقليل خشونة السطح، فعند استخدام سرعة تغذية 0.1mm/rev نلاحظ عند N=600 rpm كانت الخشونة 2.715µm وعند N=1000 rpm كانت الخشونة 1.974µm، وهذه النتيجة تدل على أن السرعات الأعلى تقلل من الاهتزازات وتحسن جودة عملية القطع وبالتالي الحصول على سطح أقل خشونة. نستنتج أن زيادة سرعة التغذية تزيد من خشونة السطح بشكل عام، وزيادة سرعة الدوران تحسن جودة السطح، ولهذا فأن التوازن بين سرعة التغذية وسرعة الدوران ضروري للوصول لنتائج مثلى.



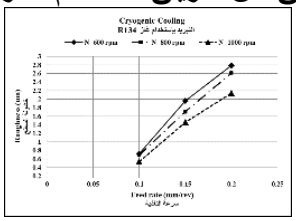
الشكل (7): يبين مخطط كنتوري (contour plot) يوضح العلاقة بين خشونة السطح وسرعة التغذية وسرعة الدوران في حالة التشغيل الجاف.

في الشكل (7)، المخطط الكنتوري (contour plot) يوضح العلاقة بين خشونة السطح وسرعة التغذية وسرعة الدوران في حالة التشغيل الجاف. تظهر الألوان المختلفة مستويات خشونة السطح، حيث تمثل الألوان الزرقاء القيم الأقل (جودة سطح أفضل) في حيث تمثل الألوان الخضراء الداكنة القيم الأعلى (جودة سطح أقل). أقل خشونة أصغر من mm 2، تم الحصول عليها عند سرعة دوران 1000 rpm وسرعة تغذية 0.1mm /rev.

وعند سرعة تغذية ثابتة، نلاحظ أن زيادة سرعة الدوران تقلل من خشونة السطح. يتضح ذلك من الانتقال التدريجي من اللون الأخضر إلى اللون الأزرق كلما اتجهنا يمينا في المحور الأفقي (أي نحو سرعات دوران أعلى). نلاحظ عند سرعة دوران ثابتة، فإن سرعة التغذية تؤدى إلى زيادة الخشونة، وهذا واضح من تصاعد اللون الأزرق إلى الاخضر كلما صعدنا في المحور الرأسي (أي نحو سرعات تغذية أعلى).

فالمنطقة المثلى للحصول على خشونة أقل (اللون الازرق) في الزاوية السفلية اليمين من المخطط وهي تمثل الظروف التشغيلية المثالية للحصول على أقل خشونة، سرعة دوران عالية (أكبر من أو تساوي 950 rpm) مع سرعة تغذية منخفضة (أقل من أو تساوي 0.11mm/rev).

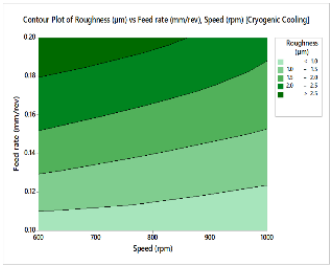
2. التشغيل باستخدام تقنية التبريد العميق من طريق استخدام غاز R134a (Cryogenic Cooling):



الشكل (8): بين الشكل العلاقة بين سرعة التغذية وخشونة السطح تحت ظروف التبريد العميق باستخدام غاز R134a وعند سرعات الدوران (600، 800، 1000 rpm).

يبين الشكل (8)، تأثر سرعة التغذية على خشونة السطح تحت ظروف تقنية التبريد العميق باستخدام غاز R134a وعند مستويات سرعة الدوران (600،800، 1000 rpm). نلاحظ وجود علاقة طردية واضحة بين سرعة التغذية وخشونة السطح، فعند زيادة سرعة التغذية من (0.1mm/rev) الي (0.2mm/rev) ترتفع خشونة السطح لجميع سرعات الدوران، وهذا يعزى إلى الزيادة في سمك الرائش عند زيادة قيم سرعة التغذية، كما نلاحظ إنه عند نفس سرعة التغذية، تقل خشونة السطح بزيادة سرعة الدوران، وهذا يدل على أن سرعة الدوران الأعلى تنتج سطحاً انعم بسبب تحسين ظروف

التبريد وتقليل الاحتكاك بين عدة القطع والرائش الناتج. يظهر الشكل ان التبريد العميق باستخدام غاز R134a يحقق انخفاضاً ملحوظاً من خشونة السطح وذلك لان التبريد العميق يقلل درجة حرارة منطقة القطع مما يحسن من كفاءة القطع وتقلل تأكل أداة القطع. أفضل جودة سطح تم الحصول عليها عند سرعة دوران عالية 1000 rpm وسرعة تغذية منخفضة عند 0.1 mm/rev.



الشكل (9): يبين مخطط كنتوري (contour plot) يوضح العلاقة بين خشونة السطح وسرعة التغذية وسرعة الدوران في حالة التبريد العميق باستخدام الغازR134a .

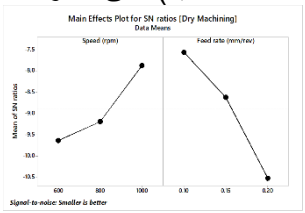
يظهر المخطط الكنتوري بالشكل (9) تحكماً جيداً في الخشونة (أغلب قيم الخشونة أقل من 2.5µm) مما يؤكد فاعلية التبريد العميق لتقليل التأثير الحراري وتحسين جودة السطح. فزيادة سرعة الدوران تقلل خشونة السطح عند سرعات تغذية منخفضة، وذلك لأنه سرعات القطع العالية تقلل قوى القطع مما يحد من الاهتزازات والتشوهات السطحية، وزيادة سرعة التغذية تزيد من قيم خشونة السطح، فعند زيادة سرعة التغذية من (0.10mm/rev) الي (0.20mm/rev) نلاحظ ارتفاع قيم خشونة السطح بنسبة تصل إلى 100%، وهذا يرجع لارتفاع قيم قوى القطع مما يسبب زيادة في الاهتزازات وبالتالي زيادة الاحتكاك. المنطقة المثلى (سرعة دوران أكبر من أو تساوي 900 rpm) و (سرعة تغذية أصغر من أو تساوي 0.12mm/rev).

أظهرت بيانات القياس انخفاضا ملحوظا في قيم (Ra) عند استخدام التبريد العميق مقارنة بالتشغيل الجاف. ففي أسرع حالة (1000 rpmو0.10mm/rev)، انخفضت الخشونة من 1.95 µm (جاف) إلى R134 a (0.45 µm) أي تحسن يفوق 75%. كما إنه في التشغيل الجاف، أدى رفع سرعة الدوران من 600rpm إلى 1000 rpm إلى خفض (Ra) بمقدار 0.8 µm عند سرعة تغذية ثابتة (0.15 mm/rev)، وفي حالة التبريد العميق كان المنحنى أكثر انحدارا، مما يشير إلى فعالية التبريد في تقليل حرارة القطع وتثبيط التصاق الرائش.

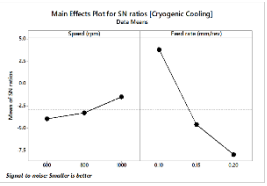
في حالتي التشغيل الجاف والتشغيل باستخدام تقنية التبريد العميق، كلما زادت التغذية ارتفعت Ra. لكن معدل الزيادة في الخشونة كان أقل حدة عند استخدام R134a حيث قلت التأثيرات السلبية الرائش السميك على السطح. فللقيم القصوى عند 0.20 mm/rev، سجّل التشغيل الجاف Ra=3.5 µm ، بينما لم تتجاوز Ra في التبريد العميق 2.80 µm ، أي تحسن نسبي يصل إلى 20% في أسوا الظروف.

طريقة تاقوشي (Taguchi analysis) لتحليل النتائج:

تم استخدام طريقة تحليل تاقوشي (Taguchi analysis) لتحليل النتائج بطريقةsignal to noise ratios وذلك لتحديد مراتب تأثير المتغيرات (سرعة القطع، معدل التغذية) على خشونة السطح.



الشكل (10): يبين رسم بياني لتأثيرات نسبة (S / N) في حالة التشغيل الجاف.



الشكل (11): يبين رسم بياني لتأثيرات نسبة(S / N) في حالة التبريد العميق باستخدام غاز R134a.

في الشكلين البيانيين الموضحين، تم تحليل تأثير كل من سرعة القطع (Speed) ومعدل التغذية (Feed rate) على نسبة (S/N ratio) لقيم "خشونة السطح"، في حالتين مختلفتين: التشغيل الجاف والتبريد العميق Cryogenic Cooling يشير معيار (Smaller is better) إلى أن القيم الأعلى S/N (ratio) تعني خشونة سطح أقل وأداء أفضل.

اظهرت النتائج أن زيادة سرعة القطع تؤدي إلى تحسن ملحوظ في نسبة S/N في كلتا الحالتين، مع تفوق واضح للتبريد العميق، حيث سجلت أعلى قيمة عند سرعة 1000 rpm، بالمقابل اتضح أن زيادة معدل التغذية تؤدي إلى تدهور نسبة S/N مما يعكس تزايدًا في خشونة السطح، وكان هذا التأثير أكثر حدة في التشغيل الجاف مقارنة بالتبريد العميق. ويُستنتج من ذلك أن التبريد العميق يُساهم في تحسين جودة السطح، خاصة عند السرعات العالية ومعدلات التغذية المنخفضة، مما يجعله خيارًا مفضلا في تطبيقات التشغيل الدقيقة.

3. في حالة التشغيل الجاف:

يعرض جدول (7) نتائج طريقة تاقوشي (Taguchi Analysis) لتقييم تأثير سرعة القطع (Speed) ومعدل التغذية (Feed rate) على خشونة السطح (Roughness) باستخدام معيار (smaller is better) مما يعني أن القيم الأعلى لنسبة (S/N) تعكس جودة سطح أفضل (خشونة أقل).

جدول (7): الاستجابة لنسبة (S/N Ratios).

المتغير	Delta	الترتيب (Rank)
سرعة القطع	1.759	2
معدل التغذية	2.964	1

تشير نتائج تحليل تاقوشي إلى أن معدل التغذية هو العامل الأكثر تأثيرًا في تحسين جودة السطح، حيث أن خفضه يؤدي بوضوح إلى تقليل الخشونة السطحية. وعلى الرغم من أن سرعة القطع لها تأثير، إلا أنه أقل نسبيًا.

4. في حالة التبريد العميق باستخدام غاز R134a:

التحليل باستخدام طريقة تاقوشي (Taguchi Analysis) لخشونة السطح (Roughness) وفقا لسرعة القطع (Speed) ومعدل التغذية (Feed rate) يشير إلى الآتي:

جدول (8): الاستجابة لنسبة (S/N Ratio).

المتغير	Delta	الترتيب (Rank)
سرعة القطع	2.466	2
معدل التغذية	11.798	1

وفقًا لقاعدة (smaller is better) تمثل القيم الأعلى لنسبة S/N)) نتائج أفضل (أي خشونة أقل) فمعدل التغذية له التأثير الأكبر على خشونة السطح، حيث سجل أعلى فرق (Delta = 11.798) بين المستويات وسرعة القطع جاءت في المرتبة الثانية، لكنها لا تزال مؤثرة بدرجة ملحوظة. يُظهر تحليل تاقوشي أن تقليل معدل التغذية له التأثير الأكبر في تقليل خشونة السطح، يليه زيادة سرعة القطع بالتالي، الحصول على أفضل جودة سطح يُوصى باستخدام معدل تغذية منخفض وسرعة قطع عالية.

الاستنتاجات (Conclusions):

1. يوفر استخدام التبريد العميق باستخدام غاز التبريد R134a تحسنًا كبيرًا في جودة السطح مقارنة بالتشغيل الجاف عبر مجموعة واسعة من ظروف القطع.
2. يُنصح بالجمع بين سرعات دوران عالية (≥ 900 rpm) وتغذية منخفضة (≤ 0.12mm/rev) عند استخدام التبريد العميق لتحقيق أدنى قيم خشونة.
3. النتائج تدعم تطبيقات التصنيع الدقيق في الصناعات التي تتطلب سطوحًا عالية النعومة مثل الدفاع والفضاء.
4. تشير نتائج تحليل تاقوشي إلى أن معدل التغذية هو العامل الأكثر تأثيرًا في تحسين جودة السطح، حيث أن خفضه يؤدي بوضوح إلى تقليل الخشونة السطحية. وعلى الرغم من أن سرعة القطع لها تأثير، إلا أنه أقل نسبيًا.

المصادر العلمية (References):

1. Kumaresan, G. et al. (2019). Effect of cryogenic cooling on machining performance : A review. Materials Today : Proceedings, 16, 857–864.
2. Domenico Umbrello et al. (2012). The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining : A comparison with dry machining. CIRP Annals - Manufacturing Technology 61 (2012) 103–106.
3. V. Balaji et al. (2021). Review of the cryogenic machining in turning and milling process. IJRET, Eissn :2319-1163.
4. Yakup Yildizet al. (2008). A review of cryogenic cooling in machining processes. International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 947–964.
5. Shane Y. Hong et al. (2006). Lubrication mechanisms of LN2 in ecological cryogenic machining. Machining Science and Technology, 10 :133–155, DOI : 10.1080/10910340500534324