

VREDNOTENJE TRAJNOSTNEGA RAZVOJA V INDUSTRIJSKEM OKOLJU

ŠTEFAN ŽUN,¹ DUŠAN MEŽNAR²

¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede, Kranj, Slovenija
stefan.zun@guest.um.si

² Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede, Kranj, Slovenija
dusan.meznar@um.si

Koncept trajnostne proizvodnje se razvija s spremembami, ki jih narekujejo novi industrijski modeli. Za doseganje cilja trajnostne proizvodnje je potrebno slediti opredeljenim načelom, ki opredeljujejo trajnostno proizvodnjo na prehodu krožnega in digitaliziranega gospodarstva in doseganje cilja trajnostnega razvoja 12 (SDG12). To je mogoče doseči tudi s povečanjem učinkovitega obvladovanja snovnih in energijskih tokov v procesih odrezavanja. Pristopi so lahko različni. Osredotočili smo se na metode hlajenja in mazanja postopkov odrezavanja. Obravnavamo kriogene tehnologije obdelave, ki omogočajo znižanje proizvodnih stroškov procesov odrezavanja in izboljšanje konkurenčnosti z zmanjšanjem porabe virov in ustvarjanjem manj odpadkov. Vrednotenje obdelave odrezavanja je povzeto po raziskavah materialov (Inconel 718). Dokazano je, da stroški orodja močno prispevajo k skupnim proizvodnim stroškom in da kriogena obdelava odrezavanja ponuja čisto in stroškovno učinkovito pot za izboljšanje trajnostne učinkovitosti v primerjavi s konvencionalno obdelavo odrezavanja.

DOI

[https://doi.org/
10.18690/um.fov.2.2024.10](https://doi.org/10.18690/um.fov.2.2024.10)

ISBN

978-961-286-821-5

Ključne besede:

doseganje ciljev trajnostnega
razvoja (SDG),
trajnostna proizvodnja,
krožno gospodarstvo,
tehnološki parametri
odrezavanja,
hlajenje in mazanje



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.fov.2.2024.10](https://doi.org/10.18690/um.fov.2.2024.10)

ISBN
978-961-286-821-5

Keywords:

achieving the goals of
sustainable development
(SDG),
sustainable production,
circular economy,
technological parameters of
cutting,
cooling and lubrication

EVALUATION OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE INDUSTRIAL ENVIRONMENT

ŠTEFAN ŽUN,¹ DUŠAN MEŽNAR²

¹ University of Maribor, Faculty of Organizational Sciences, Kranj, Slovenia
stefan.zun@guest.um.si

² University of Maribor, Faculty of Organizational Sciences, Kranj, Slovenia
dusan.meznar@um.si

The concept of sustainable production is evolving with changes dictated by new industrial models. In order to achieve the goal of sustainable production, it is necessary to follow the defined principles that define sustainable production at the transition of the circular and digitized economy and the achievement of Sustainable Development Goal 12 (SDG12). This can also be achieved by increasing the effective management of material and energy flows in cutting processes. Approaches can be different, we focused on methods of cooling and lubrication of cutting processes. We are dealing with cryogenic processing technologies that allow cutting production costs to be reduced and competitiveness to be improved by reducing resource consumption and creating less waste. The evaluation of the cutting process is based on the material research (Inconel 718). It has been shown that tooling costs are a major contributor to overall manufacturing costs and that cryogenic process offers a clean and cost-effective route to improve sustainable performance compared to conventional cutting processes.



1 Uvod

Predelovalni sektor je pomemben del svetovnega in nacionalnega gospodarstva in služi kot steber industrijskega razvoja. Potrebni so jasni okvirji in kazalniki za doseganje trajnostnega razvoja predelovalne industrije ob upoštevanju dejstva, da se omejitve virov in okolja zaostrejo.

Za doseganje ciljev trajnostne proizvodnje je pomembno spodbujati inovacije, celovito izkoriščati že obstoječo tehnologijo, učinkovito upravljati procese in povečevati konkurenčne prednosti. Osredotočiti se moramo na preoblikovanje modela rasti, izboljšanje učinkovitosti rabe virov in slediti industrijski preobrazbi ter nadgradnji. Razmerja med industrijskim razvojem in varstvom okolja naj bodo v ravnovesju, zato je potrebno spodbujati zeleno proizvodnjo in izboljšati energetske učinkovitost, izboljšati socialno vzdržnost dobavne verige in spodbujati podjetja k proaktivnemu prevzemanju družbene odgovornosti (Quan, 2021).

Z jasno opredeljenimi načeli trajnostne proizvodnje (SP Sustainable Production) lahko prispevamo k doseganju dvanajstih ciljev trajnostnega razvoja (SDG12) »Zagotoviti trajnostne načine proizvodnje in porabe«. Organizacija združenih narodov (United Nations) je opredelila 17 ciljev in jih predstavlja, kot kaže slika 1.



Slika 1: Cilji trajnostnega razvoja

Vir: United Nations.

V EU kazalniki spremljajo in merijo predvsem napredek v ločevanju okoljskih vplivov od gospodarske rasti, napredek v zmanjševanju porabe energije in napredek v reševanju problema nastajanja odpadkov in v ravnanju z njimi. Cilj 12 se nanaša na zagotavljanje vzorcev trajnostne potrošnje in proizvodnje, kar je ključnega

pomena za ohranjanje preživetja sedanjih in prihodnjih generacij. Netrajnostni vzorci potrošnje in proizvodnje povzročajo podnebne spremembe, izgubo biotske raznovrstnosti in povečujejo onesnaževanje okolja.

Politični odločevalci in posamezniki bi morali sodelovati pri povečevanju učinkovite rabe virov, zmanjšanju količine odpadkov in onesnaževanja ter oblikovanju novega krožnega gospodarstva.

Inovacije so gonilna sila za omogočanje trajnostne proizvodnje, osnovni cilj proizvodnega sektorja je doseganje stopnje trajnostne proizvodnje. Intenzivna proizvodnja v predelovalnem sektorju je vir velikih pritiskov na okolje, zato je potrebno takšen pristop spremeniti in sprejeti omejitve virov in okolja ter pri razvoju upoštevati tudi socialne koristi.

2 Načela trajnostne proizvodnje

Načela trajnostne proizvodnje ne zajemajo samo načrtovanja in uporabe tehnoloških procesov, temveč tudi sprejemanje in upravljanje tehnologij, skrb za ljudi in vodenje, medsebojno odvisnost in komunikacijo med proizvajalci in drugimi deležniki vrednostne verige ter prispevek k skupnosti.

Razvoj tehnoloških inovacij in vpliv podnebnih sprememb, skupaj z novim gospodarskim, političnim in družbenim kontekstom, kažejo na potrebo po prožnih proizvodnih sistemih, ki olajšajo in pospešijo razvoj trajnostnih pobud, ki so lahko posledica upoštevanja načel trajnostne proizvodnje (Dwivedi, 2021). Povzetek načel trajnostne proizvodnje predstavljamo v tabeli 1 (Viles, 2022).

Sodobna trajnostna proizvodnja daje poudarek analizi trenutnega stanja, (na primer mehanski obdelavi), s ciljem varčne rabe energije in snovi ter zagotavljanja okolju prijaznejše proizvodnje z uporabo okolju prijaznejših metod hlajenja obdelave odrezavanja, kot so suhi, konvencionalni hladilni sistemi, najmanjša količina maziva (MQL), najmanjša količina hladilnega mazanja (MQCL), nanotekočine, biorazgradljiva rastlinska olja, kriogeno mazanje in visokotlačno hlajenje (HPC). Konstantno je potrebno spremljati sodobne trende okoljsko učinkovitih tehnologij, ki zagotavljajo trajnostno proizvodnjo (zaprti energijski in snovni tokovi).

Tabela 1: Načela trajnostne proizvodnje (Viles, 2022)

	Cilji	Načelo	Aktivnost
1	Izdelki in embalaža so zasnovani tako, da so varni in ekološko neoporečni v celotnem življenjskem ciklu, storitve so zasnovane tako, da so varne in ekološko neoporečne.	Zasnova za krožno gospodarstvo.	Izdelke in proizvodni proces oblikujemo in embaliramo tako, da se porablja minimalno naravnih virov v celotnem življenjskem ciklu, ki naj se po možnosti obnavlja. Pozornost je namenjamo razgradnji im omogočamo: recikliranje, popravilo, predelavo, obnovo ali predelavo.
2	Energijski in snovni tokovi se ohranjajo. Raba ustreznih virov za doseganje cilja.	Ohranjanje snovnih in energijskih tokov.	Ohranjamo vire in njihovo vrednost. Uporabljamo ustrezne obnovljive vire energije in snovi. Vrednost virov ohranjamo čim dlje v proizvodnih procesih (zaprti energijski in snovni tokovi) in upoštevamo koncept trajnosti pri rabi virov (trajnostno zunanji energijski in snovni tokovi).
3	Odpadki in ekološko nezdružljivi stranski produkti se stalno zmanjšujejo, izločajo ali reciklirajo.	Trajnostno ravnanje z odpadki.	Trajnostno ravnanje z odpadki v zaprtem in odprtem krogu. Aktivnosti usmerjamo v preprečevanje nastajanja odpadkov, ponovna uporaba virov v zaprtem krogu. Pri ravnanju z odpadki uvajamo strategije po hierarhiji zmanjšanja količine odpadkov, ponovna uporaba in recikliranje. Pri čemer zmanjšujemo poti odlaganja (odpadek obdelamo kjer nastane), vključno z minimalnim odlaganjem na odlagališčih in energijsko izrabo.
4	Kemične snovi, fizikalni dejavniki, tehnologije in proizvodne procese, ki predstavljajo nevarnost za zdravje ljudi ali okolje opuščamo ali zmanjšujemo.	Prizadevanje za okolje brez tveganja.	Opustitev ali zmanjšanje rabe kemičnih snovi, fizikalnih dejavnikov in tehnologije, ki predstavljajo tveganje za okolje. Zmanjšanje emisij toplogrednih plinov s ciljem doseganja stopnje ničelne neto emisije.
5	Delovna mesta so oblikovana tako, da zmanjšajo ali odpravijo fizične, kemične, biološke in ergonomske nevarnosti.	Skrb za dobro počutje zaposlenih.	V vsakodnevno prakso uvajamo aktivnosti, ki spodbujajo dobro počutje zaposlenih in ohranjajo fizično, funkcionalno in psihološko udobje zaposlenih.
6	Zavezanost vodstva k odprtemu, participativnemu procesu nenehnega ocenjevanja in izboljševanja trajnostnih proizvodnih procesov, osredotočeno tudi na dolgoročno (ekonomska, okoljska,	Vodstvo je zavezano trajnostni proizvodnji.	Krepitev zavezanosti vodstva k trajnostnim procesom. Vzpostavitev organizacijske kulture, ki omogoča trajnostno uspešnost. Opolnomočenje in motiviranje zaposlenih za razvijanje njihovih sposobnosti in talentov. Spodbujanje raznolikosti, pravičnosti in vključenosti na delovnem mestu.

	Cilji	Načelo	Aktivnost
	socialno) uspešnost podjetja.		
	Delo je organizirano tako, da ohranjamo in krepimo učinkovitost in ustvarjalnost zaposlenih.		
	Varnost in dobro počutje vseh zaposlenih sta na prvem mestu ter nenehen razvoj njihovih talentov.		
7	Delovna mesta so v lokalni skupnosti, v kateri podjetje deluje, spoštovana. Prisotnost podjetja je vzrok za boljšo ekonomsko, socialno, kulturno in infrastrukturno stanje okolja v skupnosti. Krepi se pravičen odnos do lokalne skupnosti.	Podjetje pozitivno prispeva k skupnosti.	Aktivnosti v podjetju naj pozitivno prispevajo k boljšim ekonomskim, okoljskim, socialnim, kulturnim in infrastrukturnim rezultatom skupnosti, v katerih podjetje deluje. Upoštevanje tudi posrednih vplivov.
8	Sprejeti vizijo trajnostne oskrbovalne verige.	Trajnostne oskrbovalne verige.	Spodbujati sodelovanje deležnikov v oskrbovalni verigi. Vzpostavite učinkovito komunikacijo in sodelovanje z vsemi deležniki oskrbovalne s ciljem narediti proizvodne procese in izdelke bolj trajnostne.
9	Meritve, vrednotenje in optimiziranje trajnostnih procesov.	Optimiziranje trajnostnih procesov.	Merjenje in optimizacija (trajnostnih) proizvodnih procesov. Določitev kazalcev uspešnosti za vrednotenje optimizacije proizvodnih procesov. Kratkoročno in dolgoročno spremljanje trajnosti proizvodnega sistema s spodbujanjem digitalizacije.
10	Pospešeno uvajanje trajnostnih tehnoloških procesov in tehnologij.	Raba trajnostnih tehnoloških procesov in tehnologij.	Izboljšati ali nadomestiti obstoječe tehnologije in tehnološke procese z bolj trajnostnimi. Pridobiti informacije o predvidenih koristih in tveganjih za trajnostno proizvodnjo. Primerjava razpoložljivih tehnologij in tehnoloških procesov, ki vključuje vrednotenje trenutne tehnologije z upoštevanjem celotnega življenjskega kroga.

Vir: Viles, 2022.

Opomba: Modro so označena načela, katerih cilje neposredno dosegamo z uporabo trajnostnih metod hlajenja in mazanja pri postopkih odrezavanja.

2.1 Opredelitev lastnosti načel trajnostne proizvodnje

Načela morajo odražati osnovne značilnosti trajnostne proizvodnje ob upoštevanju naslednjih področij, ki jih je potrebno spremljati in dopolnjevati (Veleva, 2001):

- raba energije in snovi (virni),
- naravno okolje,
- socialna pravičnost in razvoj družbe kot celote,
- gospodarska uspešnost,
- dobro počutje zaposlenih in
- snovanje in raba izdelkov (življenjski cikel).

V literaturi (Veleva, 2001; Viles, 2022) so ta področja upoštevana in predlagana so načela trajnostne proizvodnje ob upoštevanju principa krožnega gospodarstva.

Okoljska načela so v preteklosti spodbujala zmanjšanje, ponovno uporabo in recikliranje, kar ne zadošča, če sistem obravnavamo v sistemu krožnega gospodarstva. Širše strategije vključujejo tudi možnost opustitve nekaterih izdelkov in po postopku sočasnega inženirstva oblikovanje trajnostnih izdelkov. Koncept trajnostne proizvodnje predvideva, da se proizvodni procesi stalno spremljajo, vrednotijo in posodablajo v smeri trajnostne proizvodnje (Velenturf, 2021). Digitalizacijo trajnostne proizvodnje usmerjamo v doseganje trajnostnih ciljev z uporabo zelenih računalniških sistemov in zelenih algoritmov (Lannelongue, 2021).

Socialno področje trajnosti ne vključuje samo zdravstvenega varstva in krepitve učinkovitosti zaposlenih, temveč tudi stopnjo vključenosti organizacije, glede na delovno mesto, spol, starostno skupino, kulturno identiteto ter upoštevanje primanjkljajev.

Koncept trajnostnega krožnega gospodarstva je potrebno obravnavati s celostnega vidika sistema, ob upoštevanju okoljskih, socialnih in človeških vidikov lokalnega konteksta (Velenturf, 2021). Proizvodnja je del vrednostne verige izdelka ali storitve in je zato nikoli ne bi smeli obravnavati kot ločen sistem od preostale vrednostne verige.

Nekatere tehnologije industrije 4.0 se razvijajo za doseganje bolj trajnostne proizvodnje. Vendar pa tehnologija ni trajnostna, če služi samo doseganju ali učinkovitosti življenjskega kroga izdelka ali procesa ali poskuša zmanjšati porabo virov. Trajnostna tehnologija je skladna s temeljnimi načeli trajnosti na vseh nivojih (snovanje, implementacija, uporaba in razgradnja). Še vedno je premalo poudarka na družbenih vplivih novih tehnologij.

Določitev jasnih ciljev pri določanju definicije trajnosti moti odločevalce v podjetjih, ki so tradicionalno osredotočeni na merjenje ekonomskih rezultatov (Henaó, 2022). Rast novih tehnologij, povezanih z znanostjo o podatkih, bi morala voditi k uporabi merilnih tehnologij in določiti obvladljiv nabor kazalnikov, ki bi vodjem podjetij omogočili, da v postopke odločanja vključijo načela trajnosti in omogočajo spremljanje celotnega sistema v procesu nenehnega izboljševanja.

Predelovalna industrija je v zadnjih treh desetletjih doživela ogromne spremembe v strategijah upravljanja, proizvodni in procesni tehnologiji, pričakovanih potrošnikov, odnosu dobaviteljev in konkurenčnem ravnanju. V celotni verigi so pomanjkljivosti v smislu učinkovite rabe virov, nadzora nad odpadki, varčevanja z energijo, vplivov na okolje in stroškov. To je še posebej izrazito pri konvencionalnih postopkih odrezavanja, zato je potrebno vrednotiti in preoblikovati tehnološke postopke za doseganje trajnostne proizvodnje. Na ta način se bo omejila raba naravnih virov, predvsem fosilnih goriv.

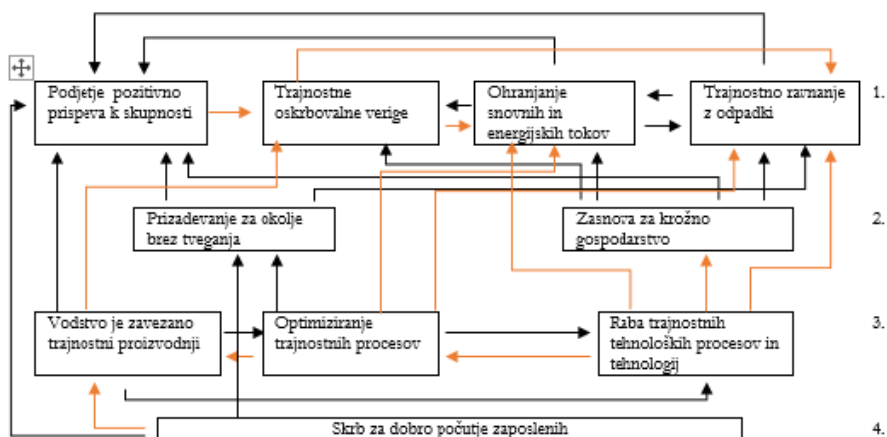
Trajnostna proizvodnja je z družbenega vidika neposredno povezana s področji, kot so kvaliteta življenja, izobraževanja in zdravja. V predelovalni industriji dolgotrajna izpostavljenost nevarnim plinom, strupenim aerosolom in kovinskim delcem ogroža zdravje zaposlenih.

Pri tehnologiji odrezavanja proizvajalci želijo čim bolj učinkovit tehnološki proces. Ob upoštevanju načel trajnostne proizvodnje je poleg ekonomskih in okojskih zahtev potrebno upoštevati še družbene učinke (zaposleni, stranke, deležniki v dobavni verigi in skupnosti), saj tehnološke zahteve lahko vplivajo na socialno interakcijo.

Na sliki 2 prikazujemo povezanost in medsebojni vpliv posameznih načel. Načela so razdeljena na štiri ravni, kar ne pomeni prednostne razvrstitve pri uporabi načel trajnostne proizvodnje, ampak usmeritev, da razvoj nekaterih načel omogoča razvoj ostalih:

- Prva raven: podjetje pozitivno prispeva k skupnosti, trajnostne oskrbovalne verige, ohranjanje snovnih in energijskih tokov, trajnostno ravnanje z odpadki;
- Druga raven: prizadevanje za okolje brez tveganja, zasnova za krožno gospodarstvo;
- Tretja raven: vodstvo je zavezano trajnostni proizvodnji, optimiziranje trajnostnih procesov, raba trajnostnih tehnoloških procesov in tehnologij;
- Četrta raven: skrb za dobro počutje zaposlenih.

Načela na najvišji ravni (1) so najbolj odvisna od ostalih, spodnja raven (4) pa je najbolj gonilno in neodvisno načelo, ki vodi preko posrednih načel na tretji in drugi stopnji k doseganju ciljev, ki jih predstavljajo načela na prvi ravni.



Slika 2: Povezanost in medsebojni vpliv posameznih načel trajnostnega razvoja (ključne povezave so obarvane rdeče)

Vir: Viles, 2022.

Avtonomna načela so: skrb za dobro počutje zaposlenih, optimiziranje trajnostnih procesov, raba trajnostnih tehnoloških procesov in tehnologij.

Močno povezana načela so: zasnova za krožno gospodarstvo, podjetje pozitivno prispeva k skupnosti in trajnostne oskrbovalne verige. Ta načela so odvisna od drugih načel in imajo šibko gonilno vlogo, imajo precejšen vpliv na celotni sistem, vendar ta nanje šibkeje vpliva, občutljivi so pa na aktivnosti vplivnih načel.

Odvisna načela so: ohranjanje snovnih in energijskih tokov in trajnostno ravnanje z odpadki. Ta načela imajo močan vpliv na sistem, vendar sistem nanje nima vpliva. Vsaka aktivnost teh načel močno vpliva na druga načela, ki so od njih odvisna; na primer: skrb za dobro počutje zaposlenih, optimiziranje trajnostnih procesov in raba trajnostnih tehnoloških procesov in tehnologij.

Neodvisni načeli sta: vodstvo je zavezano trajnostni proizvodnji in prizadevanje za okolje brez tveganja.

2.1.1 Povezanost načel

Načela trajnostne proizvodnje, prikazana v tabeli 1 (5, 6, 9, 10), so na videz neodvisna, ker nobeno drugo načelo ne pomaga izpolnjevati teh načel. Vendar pa ta štiri načela delujejo kot gonilne sile trajnostne proizvodnje in pomagajo vzpostaviti idealno okolje za izboljšanje razvoja preostalih načel.

Načela 2, 3 in 7 imajo največ koristi od razvoja drugih načel.

Poudariti je treba, da načela 5 in 6 upoštevajo tudi socialno področje in krepijo ostala načela. V preteklosti je bilo preučevanje na področju proizvodnje bolj usmerjeno v ekonomsko in okoljsko področje. To razmerje upoštevamo za raziskave o tem, kako razvoj socialnega področja trajnosti na področju proizvodnje pomaga doseči razvoj načel, ki so tesneje povezana z okoljsko dimenzijo.

Razvoj načel 6 in 5 spodbuja razvoj načela 8.

Načelo 7 pomaga doseči načelo 8, zato ker načelo 7 izrecno poudarja pomen pozitivnega prispevanja k trajnostnemu razvoju v kraju, kjer podjetje deluje, kot tudi v krajih, na katere vplivajo strateške in operativne odločitve podjetja. To dejstvo proizvajalce spodbujanja k tesnejšemu sodelovanju z deležniki v celotni dobavni verigi.

Razvoj načela 8 pomaga pri izpolnjevanju načela 2 in 3; aktivno sodelovanje z dobavitelji pozitivno vpliva na okoljsko uspešnost organizacij.

Pri obravnavi načela 9 zaključimo, da možnost merjenja procesov pomaga pri izpolnjevanju načela 2, 3 in 6.

Načelo 6 spodbuja vzpostavitev jasne strategije in ciljev za celotno organizacijo v povezavi s trajnostnim razvojem. To načelo je ključno, saj je pomanjkanje podpore upravljanja ovira pri izvajanju trajnostnih praks (Tanco, 2021).

Načelo 10 izhaja iz ugotovitve, da lahko tehnološki razvoj pospeši prehod na sisteme trajnostne proizvodnje. Uvajanje novih trajnostnih tehnologij na področju proizvodnje omogoča izpolnjevanje načel 1, 2, 3 in 9. Na primer (Ghobakhloo, 2021): digitalizacija energetskega sektorja, digitalizacija proizvodne industrije in uvedba novih, pametnejših in bolj trajnostnih izdelkov so glavne priložnosti za doseganje trajnostne rabe energije, ki jo opredeljujemo kot tiste vrste energije, ki je najučinkovitejša in uravnotežena kombinacija gospodarskih, socialnih in okoljskih vplivov.

Pri primerjavi medsebojnih vplivov obravnavanih načel trajnostne proizvodnje s pristopom Evropske komisije, ki spodbuja pristop k industriji 5.0, povzamemo, da je v industriji 5.0 dobro počutje delavca postavljeno v središče proizvodnega procesa ob uporabi novih tehnologij za zagotavljanje blaginje, ki presega zaposlovanje in rast, in ob spoštovanju proizvodnih omejitev planeta (Commission, 2021).

Pri primerjavi cilja trajnostnega razvoja SDG12 (United Nations) ugotovimo, da obravnavana načela trajnostne proizvodnje lahko prispevajo k doseganju trajnostnega upravljanja in učinkovite rabe naravnih virov s strani proizvodnih podjetij (SDG 12.2), k zmanjšanju izpustov onesnaževal, zlasti kemikalij (SDG12.4), in k zmanjševanju odpadkov (SDG 12.5) s spodbujanjem uporabe krožnih in trajnostnih strategij načrtovanja in ravnanja z odpadki po hierarhiji ravnanja z odpadki. Proizvodnje ne smemo obravnavati kot od preostale vrednostne verige izolirane dejavnosti. Proizvodne dejavnosti spodbujajo aktivno sodelovanje vseh deležnikov v vrednostni verigi, upoštevajoč cilja pospeševanja trajnosti z bolj celostno vizijo in zavezo k pozitivnemu prispevku skupnostim, v katerih proizvodna podjetja delujejo. Zavedati se je potrebno, da so potrošniki pomembni dejavnik na

področju trajnosti in krožnega gospodarstva. Upamo, da se bo potrošnja usmerila v okoljsko odgovorno in trajnostno ob zagotavljanju kakovosti novih izdelkov.

Jasna opredelitev načel trajnostne proizvodnje in upoštevanje medsebojnega vpliva lahko pripomore podjetjem razviti prehod proizvodnih procesov na trajnostno proizvodnjo in na ta način prispevati k doseganju SDG 12. Vsa načela naj bodo standardna praksa v podjetju, ker jih je na ta način mogoče stalno vrednotiti. Zato je treba iskati najprimernejši način za merjenje napredka proizvodnih sistemov v smeri bolj trajnostnih modelov, ob zavedanju, da vsa načela trajnostne proizvodnje ne delujejo neodvisno.

2.2 Kazalci trajnostne proizvodnje

Kazalci so razdeljeni v tri nivoje (tabela 2). Vsi, razen emisije odpadne vode, izpustov v zrak in odlaganje odpadkov, so pozitivni. Vrednost podatkov za večje statistično obdelane opazovane sisteme lahko črpamo iz statističnih podatkov SURSa, na manjših opazovalnih skalah pa iz letnih poročil podjetij.

Glede na stopnjo inovativnosti in razvoja proizvodnje na državnem nivoju lahko kazalce trajnostne proizvodnje razvrstimo po šestih področjih (Quan, 2021). Prikazujemo jih v tabeli 2.

- Inovacije so gonilna sila pri trajnostni proizvodnji, spremljamo investicije v inovacije in njihove rezultate.
- Intenzivnost rabe virov je primarni kazalec trajnostne proizvodnje, upoštevamo omejitve rabe virov in učinkovitost rabe virov ter tudi učinkovitost investicij, dela in energije.
- Posodabljanje proizvodnje povezujemo s preходом na trajnostno proizvodnjo z vključitvijo trajnostnih izdelkov in storitev.
- Spremljanje in optimizacija koristi v ekonomskem, socialnem in ekološkem okolju.
- Spremljanje vplivov v okolju, kot so emisije odpadne vode, izpustov v zrak in odlaganje odpadkov.
- Prosta trgovina, spremljanje celotne oskrbovalne verige s pogleda proste trgovine in tujih naložb.

Tabela 2: Kazalci trajnostne proizvodnje

	1. nivo	2. nivo	3. nivo	Izračun kazalca
1	Inovacije	Vlaganje v inovacije	Investicijska intenzivnost raziskav in razvoja	Število zaposlenih v industrijskih raziskavah in razvoju
			Talenti	Število zaposlenih v proizvodnji.
			Investicijska intenzivnost raziskav in razvoja.	Izdatki za industrijske raziskave in razvoj / BDP
		Rezultati vlaganj v inovacije	Število patentov / zaposlenega	Število patentov / število apliciranih patentov
			Število novih izdelkov / zaposlenega	Prihodek od novih industrijskih izdelkov / celoten prihodek
		Učinkovitost kapitala	Produktivnost kapitala	Dodana vrednost / skupna naložba v proizvodnjo – osnovna sredstva
2	Intenzivnost rabe virov	Učinkovitost dela	Produktivnost dela	Dodana vrednost / zaposlenega
		Učinkovita raba energije	Energetska produktivnost	Dodana vrednost / porabo energije
		Učinkovita raba površine	Pozidana površina	Dodana vrednost / pozidano površino
		Posodabljanje izdelkov	Število posodobitev izdelka	Število posodobljenih izdelkov
3	Posodabljanje proizvodnje	Posodabljanje podjetja	Uvajanje novih tehnologij	Vlaganje v nove tehnologije / celoten prihodek
			Vlaganje v raziskave v podjetju	Vlaganje v raziskave in razvoj / celoten prihodek
		Ekonomске koristi	Dobiček	Dobiček / zaposlenega
4	Spremljanje in optimizacija koristi	Socialne koristi	Vlaganje v lokalno skupnosti – plačilo davkov	Vlaganje v lokalno skupnost / zaposlenega
		Okoljske koristi	Zaprta življenjski krog izdelka	Delež recikliranih surovin
		Emisije v vode		Emisije / dodano vrednost

	1. nivo	2. nivo	3. nivo	Izračun kazalca
5	Spremljanje vplivov v okolju	Emisije v zrak		Emisije / dodano vrednost
		Odlaganje odpadkov		Emisije / dodano vrednost Vrednost tujih naložb / vrednost lastnih naložb
6	Prosta trgovina	Tuje naložbe	Odvisnost od tujih naložb	Vrednost tujih naložb / vrednost lastnih naložb
			Odvisnost od uvoza	Vrednost uvoza / vrednost proizvodnje
			Odvisnost od izvoza	Vrednost izvoza / vrednost proizvodnje

Vir: Quan, 2021.

Opomba: Modro so označeni kazalci, po katerih vrednotimo uporabo kriogene metode hlajenja in mazanja pri postopkih odrezavanja kot trajnostno proizvodnjo.

Pobude za trajnostno proizvodnjo so vzpostavljene na politični ravni znotraj ZN, OECD, EU in na nacionalni ravni. Te pobude so dobro umeščene in promovirane na proizvodni makro ravni, vendar pa primanjkuje izvedbenih praks v proizvodnih sistemih, ki se ukvarjajo s postopki mehanske obdelave. Z uvedbo načel trajnosti na ravni proizvodnega obrata imajo uporabniki potencial, da zmanjšajo stroške in izboljšajo svojo okoljsko in družbeno učinkovitost, ob enakem ali zmanjšanem obsegu proizvodnje.

3 Trajnostna proizvodnja v kovinsko predelovalni industriji

Najpomembnejši vidik trajnosti v proizvodnji je ohranjanje energijskih in snovnih tokov in naravnih virov. Za proizvodnjo je pomembno, da so procesi optimizirani tako, da zmanjšujejo negativne vplive na okolje. To je mogoče doseči z:

- učinkovito rabo obnovljivih virov energije,
- zmanjševanjem onesnaževanja, emisij v okolje in odpadkov,
- z uporabo okolju prijaznejših metod hlajenja v procesu obdelave, z uporabo metod, ki zmanjšajo ali odpravijo potrebo po uporabi konvencionalnih hladilno mazalnih sredstev,
- izboljšanjem energetske učinkovitosti mehanske obdelave in

- določanjem optimalnih rezalnih pogojev, ki zagotavljajo optimalno rabo virov s povečanjem produktivnosti mehanske obdelave ali zmanjšanjem količine odrezkov.

V proizvodnih procesih se za potrebe različnih industrij (npr.: v avtomobilski industriji) veliko sestavnih delov izdelava po tehnoloških procesih mehanske obdelave. Izdelek je zasnovan oblikovno z zahtevano obliko, dimenzijsko natančnostjo, stanjem površine ter fizikalnimi in mehanskimi lastnostmi materiala. Najpomembnejša zahteva pri mehanski obdelavi je izdelava izdelkov z ustrezno dimenzijsko natančnostjo in kvaliteto površine. Te zahteve dosegamo z obvladovanjem procesov, ki zahtevajo porabo virov, kot so: poraba materiala, energija in ostali stroški obdelave (visoke zahteve povečajo stroške izdelave). Vsi parametri izdelave so med seboj povezani in zahtevajo kompleksne in optimalne rešitve, ki zagotavljajo sprejemljivo kvaliteto izdelka (Mori, 2011).

3.1 Ravnanje z viri pri obdelavi z odrezavanjem

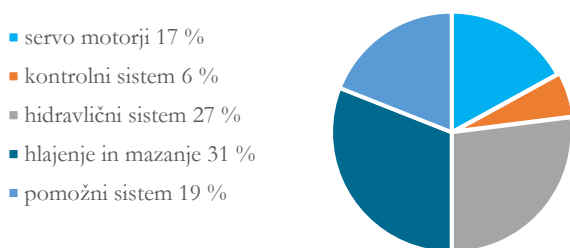
3.1.1 Električna energija

Predelovalni del industrije je velik in nepogrešljiv del svetovnega gospodarstva, kar pomeni, da ta del industrije ustvarja velike pritiske na okolje zaradi porabe energije in snovi. Po izračunih različnih avtorjev (Shokrani, 2016; Bilga, 2016; Pimenov, 2022) je 25 % celotne svetovne industrijske porabe energije pripisanih procesom v predelovalni industriji. Na svetovni ravni je 80 % proizvodnje energije še vedno odvisnih od fosilnih goriv. Povečanje povpraševanja po električni energiji (99%) je bilo predvideno za 1,5 % letno od leta 2007 do leta 2030. Učinkovita raba energije je nujna za zmanjšanje vplivov na okolje. Pri analizi procesa rezkanja na pet osnem obdelovalnem stroju je bilo ugotovljeno (Shokrani, 2016):

- Periferne enote (računalniki, servomotorji, neobremenjeni motorji, hidravlične črpalke) v mirovanju porabijo 1,7 kW moči, kar predstavlja 30 % celotne potrebne moči za napajanje teh komponent.
- 20 – 33 % celotne porabe energije je porabljene za dovod in kroženje hladilno mazalne tekočine. Raziskave kažejo, da uporaba trajnostnih strategij uporabe rezalne tekočine, kot so: mazanja z minimalno količino

hladilne tekočine (MQL), neposredne dobave rezalnega olja v obliki kapljic olja in kriogene rezalne tekočine, zmanjšajo porabo energije v primerjavi s konvencionalnim pristopom oskrbe s hladilno mazalno tekočino.

Energijsko učinkoviti obdelovalni stroji ne znižujejo samo skupnih proizvodnih stroškov z zmanjšano porabo električne energije in povečano produktivnostjo, temveč tudi zmanjšajo vplive na okolje zaradi nižje porabe energije. Povprečna poraba energije obdelovalnih strojev in poraba energije perifernih enot obdelovalnega stroja sta prikazani na sliki 3.



Slika 3: Povprečna raba energije na obdelovalnih strojih po komponentah

Vir: Pimenov, 2022.

Na svetovni ravni je 38 % skupnih emisij CO₂ iz proizvodne dejavnosti (Zhou, 2019). Potrebna energija za postopke odrezavanja je približno 50 % večja kot pri drugih proizvodnih postopkih, kot so preoblikovanje, kovanje in litje. Zato imajo postopki mehanske obdelave velik potencial za zmanjšanje CO₂ emisij. Pristop optimizacije naj bo celosten; začne se z izdelavo strojev, porabo energije med procesom obdelave, obvladovanje hlajenja in mazanja, materialom orodja in uporabe energijsko učinkovitega obdelovalnega sistema za delovanje pri višjih parametrih rezanja z nižjimi zahtevami po moči v mirovanju.

Porabo električne energije obdelovalnih strojev lahko razdelimo na več faz: porabo energije v fazi mirovanja, med nastavljanjem rezalnega orodja in obdelovanca, med obdelavo brez hlajenja in mazanja, med obdelavo s hlajenjem in mazanjem. Skupna moč obdelovalnega stroja je odvisna od moči vretena in vrste obdelovalnega stroja in je vedno večja kot potrebne moči za tehnološko operacijo odrezavanja. Energijska učinkovitost obdelovalnih procesov odrezavanja je nizka. Boljše izkoristke

dosegamo pri visoko hitrostnih obdelavah (glede na volumen odrezanega materiala v časovni enoti, mm³/s).

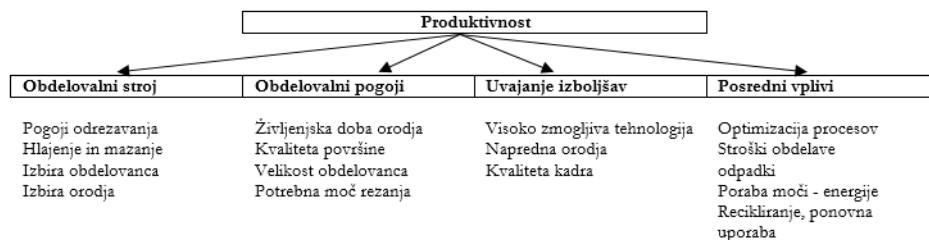
Potrebna moč za postopek odrezavanja brez hlajenja in mazanja je konstantna in je odvisna od hitrosti vretena in hitrosti podajanja. Potrebno moč zmanjšamo z uporabo hladilno-mazalne tekočine med fazo rezanja. S tem se zmanjša koeficient trenja in posledično tudi potrebna moč rezanja. V literaturi so dostopne raziskave na področju hladilno mazalnih tehnologij. Različni avtorji (Markopoulos, 2020; Hegab, 2018; Zhou, 2016) pri različnih postopkih odrezavanja ter različnih metodah hlajenja in mazanja (konvencionalni hladilni sistemi, najmanjša količina maziva (MQL), najmanjša količina hladilnega mazanja (MQCL), nanotekočine, biorazgradljiva rastlinska olja, kriogeno mazanje in visokotlačno hlajenje (HPC)) ugotavljajo, da je z uporabo hladilnih in mazalnih sredstev potrebna moč odrezavanja manjša za 15 %.

Pri ocenjevanju trajnosti proizvodnje po kazalcih, kot so na primer metoda ekoloških sledi (Žun, 2014) ali metoda CO₂ odtisa, pri obravnavi mehanske obdelave upoštevamo neposredno porabo električne energije in vplive na okolje, ki so posledica snovnih tokov (material, transport). Te vplive na okolje lahko zmanjšamo z rabo obnovljivih virov energije in z recikliranjem odpadnih surovin za pridobivanje osnovnega materiala.

3.1.2 Produktivnost

Visoka produktivnost in nizki proizvodnimi stroški sta glavna cilja, ki povečujeta konkurenčnost v svetovni konkurenci. Strožje zakonske zahteve za zmanjšanje vplivov na okolje in uvajanje okolju prijaznih izdelkov so prisilile proizvajalce k novim pristopom za obvladovanje tehnoloških postopkov. Tehnologija odrezavanja se spreminja v smeri trajnostne proizvodnje. Visoka produktivnost zahteva visoke parametre obdelave in učinkovite ter zmogljive obdelovalne stroje, da zadosti zahtevam kakovosti in nizke cene izdelkov. To v praksi pomeni zamenjavo tri osnih obdelovalnih strojev s pet osnimi stroji in uporabo kriogenskih tekočin za hlajenje obdelovalnih postopkov. Stroški kapitala in pomanjkanje široko dostopnih tehnologij so izzivi za proizvajalce obdelovalnih strojev za doseganje trajnostne proizvodnje. Želimo, da večja produktivnost ob ohranjanju kakovosti izdelkov znižuje proizvodne stroške in zmanjšuje porabo energije. Kombinacija visoko

produktivnih in trajnostnih tehnoloških procesov prispeva k zmanjšanju negativnega vpliva na okolje. Na produktivnost vplivajo parametri, prikazani na sliki 4.



Slika 4: Vplivni parametri na produktivnost odrezavanja

Vir: Lasten.

Produktivnost, ki je povezana s trajnostno proizvodnjo, lahko definiramo kot razmerje med snovnim tokom na izhodu in vhodu, kar je bistven kazalec tehnoloških procesov odrezavanja. Lahko ga merimo z MRR (metal removal rate) ali številom izdelanih kosov na časovno enoto (Hatim, 2020). Najpogosteje uporabljena strategija za povečanje produktivnosti je povečanje MRR (Abbas, 2019) s povečanjem rezalne hitrosti, podajalne hitrosti ali globine rezanja. Višji MRR ne vodi vedno do višje produktivnosti. Višji MRR vodi do višjih stopenj obrabe orodja, s čimer se poveča število menjav orodja, kar ima za posledico daljši čas izdelave. To pomeni, da je potrebno doseči višji MRR brez povečanja stopnje obrabe orodja. Za doseg tega cilja so bile razvite izboljšave (Pimenov, 2022):

- obdelovalnih strojev,
- geometrije rezalnih orodij in materialov,
- tehnik hlajenja in mazanja: Produktivnost obdelave titanove zlitine se ob uporabi hibridnih kriogenih sistemov in sistemov in z minimalno količino mazanja (MQL), ki so neškodljivi za okolje in delavce, poveča za 10 do 40 % v primerjavi s konvencionalnim hlajenjem in mazanjem (Pimenov, 2022).
- rezalnih strategij, na primer optimizacija poti orodja.

Povečanje produktivnosti v obdelovalnih procesih zmanjša njihove družbene in okoljske vplive in s tem poveča trajnost proizvodnih procesov. S povečanjem izdelanih kosov na časovno enoto se zmanjša potreba po povečanju strojnih

kapacitet, s tem pa je manjša potreba po energiji in proizvodni površini objektov (Schneider, 2019).

Produktivnost in stroški so povezani, zato je potrebno vrednotiti stroške proizvodnje. Nekateri avtorji (Khan, 2020) navajajo, da strošek hladilno mazalnih sredstev predstavlja 7 do 17 % skupnih stroškov; potrebno je poudariti, da tega podatka ni mogoče posplošiti. Delež stroškov rabe različnih virov ni enak pri vseh tehnoloških procesih in za različne materiale. Obdelava trših in zahtevnejših kosov je dražja.

3.1.3 Stroški

Proizvodni stroški so v glavnem odvisni od stroškov energije, stroškov obdelave, režijskih stroškov, stroškov hladilno mazalnih sredstev, stroškov materiala obdelovanca in orodja. Stroški energije so majhen del skupnih stroškov, večji vpliv imajo parametri rezanja, med njimi pa rezalna hitrost in način hlajenja in mazanja. Na primer: cena nano tekočine je manjša od cene običajne emulzije (Balogun, 2018). Gibanje cen električne energije negativno vpliva na izračun stroškov na proizvedeno enoto. Seštevati in optimizirati je potrebno:

- stroške strojne ure in dela,
- stroške orodja,
- stroške hlajenja in mazanja ter
- stroške energije in vplivov na okolje.

Stroški obdelave z odrezavanjem so ključni dejavnik, ki je povezan z ekološkimi vprašanji. Vključujejo stroške časa, surovin in odpadkov. Z usposobljenimi kadri in zmogljivimi obdelovalnimi stroji je potrebno zagotavljati konstantno kvaliteto izdelkov, kar pa v konkurenci svetovnih proizvajalcev lahko predstavlja dodatne stroške. Te dodatne stroške je možno nadomestiti z uporabo naprednih orodij in novih metod hlajenja in mazanja. Odrezke je možno na okolju prijazen način reciklirati ali jih uporabiti pri tehnoloških procesih kompozitnih materialov. Čas obdelave in življenjsko dobo orodja lahko zmanjšamo z uporabo naprednih tehnologij. Povečanje rezalnih parametrov za 20 % zmanjša skupne stroške za 15% (Pimenov, 2022).

3.1.4 Odpadki

Z odpadki je potrebno ravnati po hierarhiji: preprečevati nastanek odpadkov, ponovna uporaba, recikliranje, zmanjševanje količine odloženih odpadkov. Najpomembnejši pristop k zmanjševanju količine odpadkov je učinkovita raba virov, vključno z rezalnimi orodji in materiali za obdelovance. Dobro in učinkovito načrtovanje tehnoloških procesov prepreči nepričakovane zastoje proizvodnje, ki so posledica nesreč in lomov orodja. V praksi lahko količino odpadkov zmanjšamo:

- z uporabo tehnologije (MQL minimum quantity of cooling lubrication), katere namen je zmanjšati uporabo hladilnih in mazalnih sredstev;
- z recikliranjem kovinskih odpadkov (odrezki, slabi kosi, izrabljeno orodje);
- z uvajanjem novih učinkovitih sistemov za spremljanje stanja orodja, ki uporabljajo več senzorjev za spremljanje stanja rezalnih ploščic; to preprečuje premajhno rabo orodja in prezgodnjo menjavo orodja;
- s hladilno mazalnimi sredstvi je potrebno po uporabi ustrezno rokovati.

Zagotavljanje ustrezne oblike odrezka (zmanjšanje odpadnih izmetnih kosov) je pomembno za spremljanje in obvladovanje tehnoloških postopkov odrezavanja, (Yılmaz, 2020), zato je potrebno lomljenje odrezkov, kar lahko dosežemo, na primer, s spreminjanjem parametrov rezanja in posebnimi oblikami na rezalnem orodju.

Dodelava ali popravilo, če je možno, je ponovitev tehnološkega postopka, pri katerem izdelek ni bil izdelan v zahtevanih lastnostih. Zmanjšano število neustreznih kosov je tudi vodilo k trajnostni proizvodnji, saj so ti proizvodni procesi učinkovitejši. Če slabega izdelka ni mogoče popraviti, potem predstavlja odpadek. Vitka proizvodnja predstavlja korak pred trajnostno proizvodnjo. Skupne značilnosti vitke in trajnostne proizvodnje ter njune povezave so prikazane v tabeli 3. Tako vitki kot zeleni pristop delujeta v smeri uresničevanja ciljev odstranjevanja odpadkov v proizvodnih procesih. V konceptu vitke proizvodnje odprava odpadkov pomeni povečevanje dobička, pri pristopu trajnostne proizvodnje pa pomeni zmanjšanje pritiskov na okolje (Vinodh, 2011). Koncept vitke proizvodnje upošteva tudi zmanjšanje porabe materiala, zmanjšanje porabe energije, onesnaževanja okolja in vode, kar so skupne točke s konceptom trajnostne proizvodnje.

Tabela 3: Skupne značilnosti vitke in trajnostne proizvodnje ter njune povezave

Pristop	Glavni cilj	Načini zmanjševanja količine odpadkov	Orodje za implementacijo
Pristop vitke proizvodnje	Konstantno zmanjševanje količine odpadkov za povečanje profita	Zmanjševanje odpadkov v tehnoloških procesih, ki nastanejo zaradi prekomerne proizvodnje, čakanje na transport, napačne obdelave, nepotreben inventar	Minimalizacija zalog, maksimalna izraba virov, just in time, krajši dobavni čas
Pristop trajnostne proizvodnje	Odprava ne trajnostne rabe virov za zmanjševanje pritiskov na okolje	Ponovno snovanje izdelka, nadomeščanje, podaljševanje rabe, popravilo, ponovno embalaranje, recikliranje	Učinkovita raba virov, zmanjševanje odpadkov

Vir: Vinodh, 2011.

3.1.4 Kvaliteta zraka in vode

Kvaliteta zraka in vode vpliva na varnost in zdravje vseh udeleženi v proizvodnem procesu. Med obdelavo se delci in aerosoli suspendirajo v zraku. Le-ti vključujejo kovinski prah in meglo hladilno mazalne tekočine, ki se lahko odlaga v pljuča zaposlenih. Koncentracije trdih, tekočih in plinastih snovi lahko ob daljši izpostavljenosti ogroža zdravje delavcev. Ta izpostavljenost lahko vodi do bolezni, kot so respiratorna insuficienca, bronhitis in astma. Masna koncentracija prahu se povečuje z večjim odvzemom materiala (povečanjem rezalne hitrosti, pomika in globine rezanja). Skrajševanje časa proizvodnje in čistejša proizvodnja si nasprotujeta.

Nastanek prašnih delcev ali aerosolov v zraku je težava v različnih obdelovalnih procesih odrezavanja. Aerosoli so sestavljeni iz mikroskopskih trdnih delcev v kovinskem prahu in tekočih delcih v obliki meglic, ki poslabšajo kakovost zraka in imajo lahko negativen vliv na: zdravje operaterjev strojev, delovno okolje ter dele strojev in orodij. V tabeli 4 predstavljamo vire in načine obvladovanja negativnih vplivov aerosolov in prašnih delcev.

Hladilno mazalna sredstva pripomorejo k učinkovitosti proizvodnje, vendar lahko aerosoli v hladilno mazalni tekočini, razpršeni z območja rezanja, povzročijo kožne bolezni, kot sta rak in draženje kože. Mehanska obdelava brez hladilno mazalnih sredstev je prednostna. Sui postopki mehanske obdelave in MQL predstavljajo okvire zelene proizvodnje.

Tabela 4: Viri in načini obvladovanja negativnih vplivov aerosolov in prašnih delcev na zaposlene in okolje

Emisije v zraku	Vir nastanka	Vzrok nastanka	Vpliv na zdravje zaposlenih in okolje	Način obvladovanja negativnih vplivov
Prašni delci	Mehanska obdelava brez hlajenja in mazanja	Trenje med orodjem in obdelovalcem	Akutni učinki na pljuča, blage bolezni dihal do hude disfunkcije pljuč in rakavih obolenj	Filtri zraka, prezračevalni sistemi, primerno kombinacijo obdelovalnih parametrov rezanja in pogojev mikroklima
Oljna megla	Konvencionalna obdelava in uporaba hladilno mazalnih sredstev pod mokrimi pogoji, hlajenje pod visokim pritiskom, MQL obdelava	Uparjanje in kondenzacija, atomizacija rezalnih tekočin	Draženje oči, nosu, grla in kože, kronični bronhitis, astma, pnevmonitis in izguba pljučne funkcije	Mehansko zmanjšanje pršenja, ščitniki proti škropljenju, ohišja, zbiralniki megle, filtri, odesovalci in ventilatorji ter ustrezna kombinacija obdelovalnih parametrov, Kmrišno zmanjšanje megle, nehlapljiva hladilno mazalna sredstva, organski dodatki proti rosenju

Vir: Zhao, 2012.

Zmanjšanje onesnaževanja vode v industriji in pri tehnoloških procesih odrezavanja je bistven korak k doseganju trajnostne proizvodnje. Vodo neposredno porabljamo pri pripravi hladilno rezalne tekočine ter pri postopkih čiščenja in razmaščevanja (Zhao, 2012). Potrebno je upoštevati še porabljeno energijo pri črpanju vodnih virov

in pri distribuciji vode. Onesnaževanje vode pri postopkih mehanske obdelave je možno zmanjšati z zamenjavo konvecionalne uporabe hladilno mazalnih sredstev ter recikliranje industrijske vode (zaprt vodni krog).

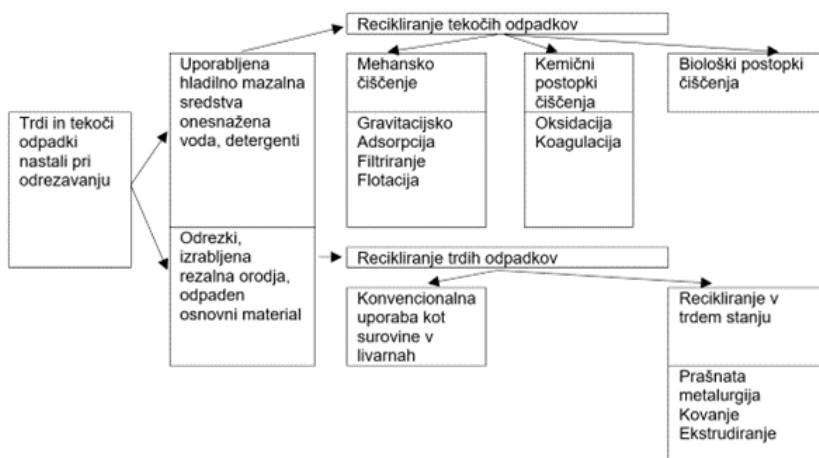
3.1.5 Recikliranje in ponovna uporaba

Po mehanski obdelavi so odrezki in uporabljena hladilna mazalna tekočina primerni za recikliranje. Rezalno orodje pa je v nekaterih primerih mogoče tudi ponovno uporabiti. Rezalne ploščice se na primer uporabijo za manj zahtevne obdelave (Pasko, 2021). Ponovna uporaba predstavlja prihranek ob upoštevanju stroškov orodja glede na skupne stroške obdelave. Pri oplasčenih rezalnih orodjih je mogoče prevleko odstraniti in ponovno naostriti orodje.

Zaradi toksičnosti uporabljenih hladilno mazalnih sredstev se pojavljajo bakterije in neprijeten vonj, ki lahko povzročajo kožne in pljučne bolezni operaterja stroja. Recikliranje hladilno mazalnih sredstev je možno z uporabo čistilnih sistemov ali z ustrezno predelavo v posebnih obratih za recikliranje s postopki filtracije in ločevanja z odpravo kontaminacije.

Obvladovanje snovnega toka industrijskih odpadkov izboljšuje uspešnost krožnega gospodarstva. Recikliranje in ponovna uporaba odpadkov, ki nastanejo med operacijami odrezavanja sta pomembna dejavnika trajnostne proizvodnje v povezavi s postopki mehanske tehnologije. Odpadke lahko razdelimo na trde in tekoče. Trdi odpadki so odrezki, odpadni material in izrabljena rezalna orodja. Uporabljene in razgrajene hladilne in mazalne tekočine ter onesnažena voda so tekoči odpadki. Na sliki 5 prikazujemo odpadke, ki nastajajo pri tehnoloških procesih odrezavanja, in načine ravnanja z njimi.

V odpadnih hladilno mazalnih tekočinah so odrezki, obrabljeni delci orodja, olja in drugi delci. Čiščenje hladilno mazalnega sredstva je pomembno tudi zaradi zagotavljanja optimalnih pogojev rezanja in vzdrževanja stroja, kljub temu pa imajo ta sredstva omejeno življenjsko dobo in jih je potrebno pred odlaganjem ustrezno obdelati (Cheng, 2005).



Slika 5: Ravnanje z odpadki, ki nastanejo pri tehnoloških postopkih odrezavanja

Vir: Pasko, 2021.

Pretaljevanje odrezkov je povezano tudi z izgubo materiala, s stroški energije in z dodatnimi emisijami v okolje, zato optimiziramo tudi postopke SSR (solid state recycling, prašnata metalurgija, ekstrudiranje) (Simon, 2017). Recikliranje in ponovna uporaba materialov pri obdelavi z odrezavanjem prinašata prihranke, zmanjšujeta pritiske na okolje in zaposlene ter zmanjšujeta porabo virov, kar vodi k ciljem trajnostne proizvodnje.

4 Okoljski vidiki in varčevanje z viri pri obdelavi z odrezavanjem

Med samimi tehnološkimi procesi odrezavanja nastajajo odpadki. Snovni in energijski tokovi bi bili lahko boljše (trajnostno) izkoriščeni. Trajnostna proizvodnja ima prednosti in slabosti:

- Izbira rezalnih orodij vpliva na porabo energije in le-to vpliva na optimiziranje proizvodne verige.
- Optimizacija rezalnih parametrov povečuje produktivnost, izboljšuje kvaliteto površine obdelanih kosov, podaljša življenjsko dobo orodja, zmanjša rezalne sile in temperaturo v rezalni coni. Obdelava brez hladilno mazalnih tekočin je najbolj skrajna rešitev za trajnostno obdelavo, vendar je potrebno izbrati kompromisno pot z alternativnimi tehnologijami hlajenja

- in mazanja in doseči ravnovesje med trajnostno proizvodnjo in vplivi na okolje in zaposlene.
- Odpadne materiale, ki nastanejo med postopki odrezavanja razvrstimo na trde in tekoče, ki jih je mogoče reciklirati, ponovno uporabiti ali okoljsko neoporečno odložiti. Recikliranje in ponovna uporaba zmanjšujeta skupne stroške proizvodnje. Tekoči odpadki negativno vplivajo na okolje in zdravje zaposlenih, zato jih je potrebno primerno obdelati.
 - Tehnološki procesi odrezavanja so energijsko potratni. Pri skrbi za učinkovito rabo energije je potrebno upoštevati tudi produktivnost procesov.
 - Obdelava brez hladilno mazalnih sredstev je okolju najbolj prijazna, če vrednotimo tehnološke procese odrezavanja samo iz pogleda hlajenja in mazanja. Potrebno je izbrati kompromisno pot z alternativnimi tehnologijami hlajenja in mazanja in doseči ravnovesje med trajnostno proizvodnjo in vplivi na okolje in zaposlene.

Proizvodnja in poraba hladilno mazalnih tekočin na svetovni ravni narašča. V procesu odrezavanja se več kot 90 % vložene energije pretvori v toploto, posledica je visoka temperatura v rezalni coni, ki ima za posledico neželene učinke: zmanjšanje trdote rezalnega orodja, krajša življenjska doba orodja, slabša kvaliteta površine in dimenzijska nenatančnost obdelovanca.

4.1 Konvencionalni hladilno mazalni sistemi

Konvencionalno hlajenje in mazanje je vbrizgavanje velike količine hladilno mazalnih sredstev v cono rezanja in na ta način hlajenje orodja, odrezka in obdelovanca. Večinoma uporabljamo hladilno mazalna sredstva pridobljena iz nafte, kar predstavlja tveganje za okolje. Po nekaterih podatkih (Pimenov, 2022) do 50 % odpadnih hladilno mazalnih sredstev konča v okolju. Uporaba hladilno mazalnih sredstev zahteva, da se odrezki pred transportom posušijo.

Hladilno mazalna sredstva lahko zamenjamo s sredstvi na osnovi rastlinskega olja, vendar še vedno obstajajo stroški nakupa, vzdrževanja, odlaganja ter tveganja za okolje in zdravje delavcev.

Konvencionalni postopki hlajenja in mazanja so še vedno najbolj robustna in prilagodljiva metoda hlajenja in mazanja. Uporabljajo se lahko v različnih obdelovalnih procesih in so združljivi s skoraj vsemi materiali, kar zagotavlja dobro produktivnost in ustrezno kvaliteto obdelovanca (Ross, 2022). Praktična prednost te metode je, da ima večina strojev že standardno vgrajen konvencionalni sistem za hlajenje in mazanje in ne zahteva nobenih sprememb v obdelovalnem postopku. Na ta način nimamo stroškov prilagajanja na nov sistem hlajenja in mazanja.

4.2 Postopki odrezavanja brez hladilno mazalnih sredstev

Obdelava brez hladilno mazalnih sredstev je najboljša možnost, ko se osredotočamo na varčevanje z viri v obdelovalnih procesih odrezavanja. Takšen način obdelave predstavlja ekonomske, okoljske in družbene prednosti v primerjavi s konvencionalnimi ali alternativnimi metodami hlajenja in mazanja v obdelovalnih procesih odrezavanja. Uporaba hladilno mazalnih sredstev zvišuje proizvodne stroške zaradi nabavnih stroškov in stroškov, povezanih z njihovo pripravo, vzdrževanjem in odstranjevanjem, ki lahko celo presežejo nabavne stroške in skupaj predstavljajo 7–17 % celotne obdelave odrezavanja (Benedicto, 2017). Upoštevati je potrebno še stroške nabave, vzdrževanja in porabe energije sistema za mazanje. Obdelava brez hladilno mazalnih sredstev odpravlja vsa okoljska tveganja, ki so povezana z uporabo maziv.

Obdelava brez hladilno mazalnih sredstev ni mogoča za vse postopke, še posebej pri obdelavi materialov, ki jih je težko rezati, kot so zlitine Ti in Ni (Goindi, 2017). Posledica obdelave brez hladilno mazalnih sredstev je povečanje temperature rezanja in rezalnih sil, ki vplivajo na hrapavost površine in zmanjšajo produktivnost in krajšajo obstojnost orodja.

4.3 Hlajenje in mazanja po metodi MQL

Z načinom hlajenja in mazanja po tehnologiji MQL (minimum quantity of lubricant, MQL) izboljšamo rezalne pogoje, vplivi na okolje pa so manjši v primerjavi z konvencionalnimi metodami. Način hlajenja in mazanja po metodi MQL v primerjavi z metodami: kriogeno, visokotlačno, s trdnimi delci ali plinom, daje dobre rešitve za okoljske probleme (Krolczyk, 2018).

Z uporabo MQL metode za 15 % zmanjšamo celotne stroške, za 62 % zmanjšamo emisije aerosolov in 10 % znižamo temperature v rezalni coni (Zhao-hui, 2020).

Metodo MQL je mogoče nadgraditi z metodo MQCL (minimum quantity of cooling lubrication, MQCL) z dodatkom nanodelcev, ki vodi do tehnologije nanotekočin. Metoda MQCL vključuje enak princip kot MQL ob dodajanju komprimiranega zraka pri kriogeni temperaturi.

Pri metodah MQL in MQCL povečamo toplotno prevodnost, ki nastane zaradi spremembe toplotne prevodnosti medfaznega medija z uporabo nanoflidne tehnologije. Pri uporabi te metode je obraba orodja za 70 % manjša pri struženju in 45 % pri brušenju (Alves, 2018). Povzetek prednosti pri uvajanju trajnostne proizvodnje, ki jih prinaša metoda MQL z izboljšavami, prikazujemo v tabeli 5.

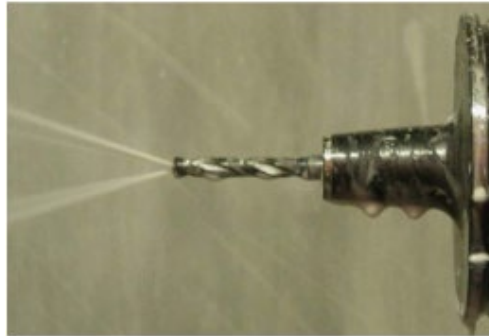
Tabela 5: Prednosti MQL

MQL				
ergonomija in stroški		obdelava		
stroški hladilno mazalnih sredstev	emisije aerosolov	zmanjšanje temperature v rezalni coni	rezalna sila	zmanjšanje obrabe orodja
-15%	-62%	-10%	boljša kvaliteta površine	-30 – 70%

Vir: Alves, 2018.

4.4 Visokotlačno hlajenje (HPC, High-Pressure Cooling)

Uporaba tehnologije HPC povečuje produktivnost, ker učinkovito zmanjša sile rezanja, porabo energije, temperaturo rezanja in hrapavost površine, poveča lomljivost odrezkov in življenjsko dobo orodja. Poraba hladilno mazalne tekočine je zelo velika, kar predstavlja velike pritiske na okolje. Pri konvencionalnem načinu hlajenja in mazanje je pretok tekočine med 3–6 l/min, pri HPC tehnologiji pa do 94 l/min (Mia, 2016). V primeru pa, da hladilno mazalno sredstvo dovajamo skozi orodje (slika 6, sveder), je zmanjšanje porabe hladilno mazalnih tekočin do 50 % (Kranjc, 2020).



Slika 6: Visokotlačno dovajanje hladilno mazalne tekočine skozi sveder
Vir: lasten.

4.5 Biorazgradljiva rastlinska olja

Zaradi negativnih vplivov hladilno mazalnih sredstev na osnovi nafte obstaja potreba po razvoju trajnostnega pristopa hladilno mazalnih sredstev, ki ne bi zmanjševal produktivnosti mehanske obdelave in ne bi imel negativnega vpliva na okolje in zdravje zaposlenih. Biološko razgradljiva hladilno mazalna sredstva na rastlinski osnovi izpolnijo zahteve trajnostne mehanske obdelave in hkrati izpolnjujejo ekonomske, okoljske in zdravstvene pogoje.

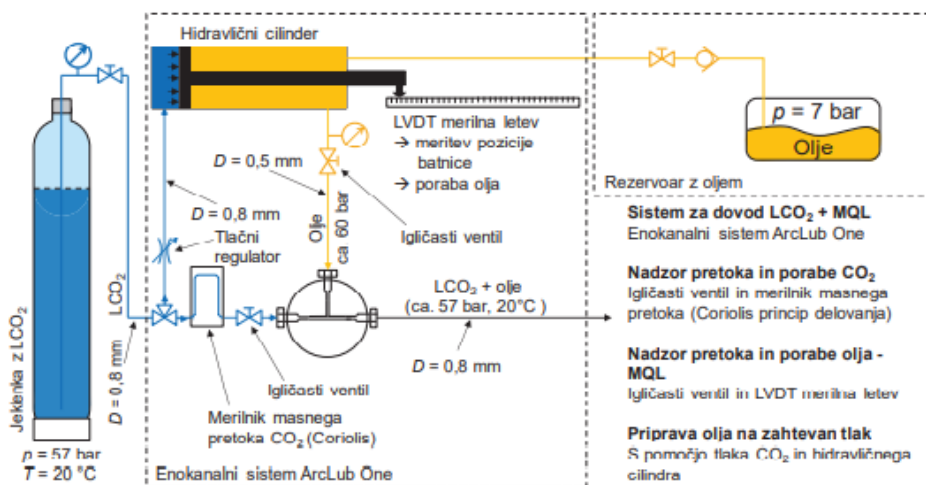
Uporaba hladilno mazalnih sredstev na osnovi rastlinskega olja izboljša zmogljivost obdelave. Za omogočanje rabe hladilno mazalnih sredstev na rastlinski osnovi pa je potrebno upoštevati tudi vpliv na okolje v fazi pridelave (kmetovanja).

4.6 Kriogeno mazanje (CL)

Kriogeno odrezavanje (ang. cryogenic machining) predstavlja alternativo konvencionalnim odrezovalnim procesom v smeri trajnostnega razvoja, kjer se za hlajenje in mazanje namesto emulzij na bazi olja uporabljajo različni kriogeni mediji. Beseda »krio« izhaja iz starogrške besede κρύος (kryos), kar pomeni »hladno«. Pojem »kriogenika« pa na splošno označuje znanost o zelo nizkih temperaturah. Avtorji navajajo, da se kriogeno področje začne pod $-153.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (120 K), drugi pa omenjajo temperature pod $-173.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (100 K) (Grguraš, 2020).

Kriogeno odrezavanje se uveljavlja v industrijskem okolju. Tudi industrija vse bolj podpira razvoj kriogenih sistemov z namenom izboljšanja celostne učinkovitosti procesov odrezavanja in obenem skuša zmanjšati stroške proizvodnje v primerjavi s proizvodnjo, katera uporablja konvencionalna hladilno mazalna sredstva. Če želimo, da je kriogena tehnologija učinkovita, je potrebno (Grguraš, 2020):

- Kriogeni medij dovajamo neposredno in samo na področje, kjer se nahaja izvor generirane toplote, kar se doseže z dovodom kriogenega medija skozi rezalno orodje neposredno v rezalno cono.
- Glede na količino generirane toplote med odrezovalnim procesom varčujemo z energijo s pomočjo adaptivnega krmiljenja dovoda kriogenega medija za doseg optimalne temperature odrezavanja, ko so odrezovalne razmere najugodnejše, ter na ta način minimaliziramo porabo kriogenega medija.
- Naredimo opremo za kriogeno odrezavanje, primerno za nadgradnjo obstoječih strojev, ki je predstavljena na sliki 7.



Slika 7: Shematski prikaz delovanja razvitega enokanalnega sistema CL

Vir: Grguraš, 2020.

5 Pristopi k trajnostnim postopkom odrezavanja zlitine Inconel 718

Pobude za trajnostno proizvodnjo so vzpostavljene na politični ravni znotraj ZN, OECD, EU in na nacionalni ravni. Te pobude so dobro umeščene in promovirane na proizvodni makro ravni, vendar primanjkuje izvedbenih praks v podjetjih, ki se ukvarjajo z obdelavo z odrezavanjem. Z uvedbo načel trajnosti na ravni podjetja imajo uporabniki možnost, da zmanjšajo stroške in izboljšajo okoljsko in družbeno učinkovitost tudi v primeru, ko proizvodnja ostane v enakem ali zmanjšanem obsegu.

Zlitina Inconel 718 je precipitacijska zlitina nikelj-krom-železo, ki vsebuje niobij in molibden. Ima visoko trdnost, dobro žilavost in odpornost proti koroziji pri visokih in nizkih temperaturah pod 650 °C. Kemična sestava je predstavljena v tabeli 6.

Tabela 6: kemična sestava Inconel 718

element	Ni	Mo	Al	Mg	Cr	Si	Ti	Nb	Co
%	55 – 56	3,7 – 3,9	0,3 – 0,4	0,1 – 0,2	17 – 18	0,2 – 2,5	0,8 – 0,9	4,5 – 4,6	0,1- 0,2

Vir: Pušavec, 2011.

Zlitina Inconel 718 je zaradi odličnih mehanskih lastnosti, odpornosti proti oksidaciji in odpornosti proti koroziji uporabna v jedrskih elektrarnah in obrambni industriji, zlasti v letalstvu in vesoljski tehniki. Med zlitinami na osnovi niklja je največ uporabljena; Ni-Cr-Fe avstenitna (γ) je super zlitina.

Pri postopkih odrezavanja teh zlitin nastanejo težave, ki se izražajo v nizki obstojnosti orodja, nizki učinkovitosti obdelave in povečani porabi energije, zaradi prekomernega ustvarjanja toplote, povečane rezalne sile, deformacijskega utrjevanja in lomljenja odrezkov. Kljub hitremu napredku nekaterih novih tehnologij, kot je aditivna proizvodnja, je odrezavanje zaradi svoje prilagodljivosti in kvalitetne obdelave površine še vedno pomembno v proizvodnji (Kshitij, 2022).

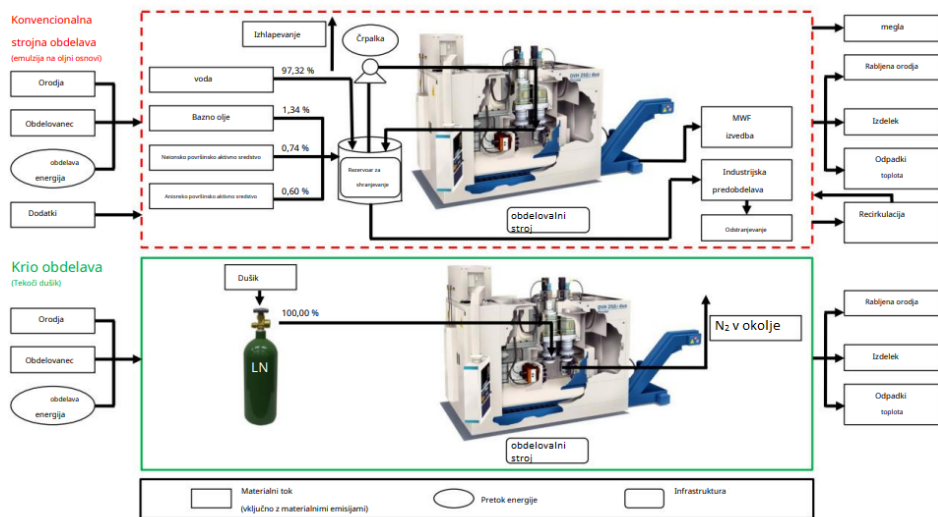
Med odrezavanjem se velik del vložene mehanske energije pretvori v toploto kot posledica trenja med orodjem, obdelovancem in odrezkom ter plastično deformacijo obdelovanca. Približno 60 – 80 % celotne proizvedene toplote je odpadna toplota v odrezkih. V obdelovanec se odvede 10–20 % toplote, v rezalno orodje pa približno

10 % toplote. Kljub temu, da se večino ustvarjene toplote odvede v odrezke, ima lahko preostala toplota negativne posledice za obdelovanec, rezalno orodje in učinkovitost obdelave. Visoke temperature vplivajo na obrabo orodja, na obdelovancu lahko prihaja do dimenzijske netočnosti in oksidacije. Zato je zelo pomembna uporaba visokokakovostnih rezalnih orodij, metod hlajenja in mazanja ter optimizacija pogojev rezanja za doseganje visoke učinkovitosti obdelave.

Rezalne hitrosti se v obdelovalnih procesih odrezavanja povečujejo tudi zaradi napredka v tehnologiji rezalnih orodij. Vendar večja temperatura rezalne cone in večje hitrosti obdelave skrajšajo življenjsko dobo rezalnih orodij in kvaliteto obdelane površine (Imran, 2013), kar pa ima za posledico slabši izkoristek snovnih in energijskih tokov. Vpliv temperature na orodje in obdelovanec je pri Inconel 718 pomemben. Uporaba hladilno mazalnih rezalnih tekočin izboljša kakovost obdelanih delov in podaljša življenjsko dobo rezalnih orodij. Rezalne tekočine na osnovi nafte, ki se še vedno pogosto uporabljajo in predstavljajo precejšen del trga, niso skladne s konceptom trajnosti proizvodnje ob upoštevanju vplivov na okolje in zdravje zaposlenih, kar pomeni, da je uporaba trajnostnih hladilno mazalnih sredstev tekočin v procesih trajnostne proizvodnje odrezavanja nujna. Tekoči dušik (LN_2) in tekoči ogljikov dioksid (LCO_2) sta glede na njune učinke trajnostna alternativa običajnim rezalnim tekočinam (Pušavec, 2011, Khanna, 2022). Primerjavo med kriogenim in konvencionalnim obdelovalnim sistemom prikazujemo na sliki 8 in tabeli 7 (Pušavec, 2011).

Uvajanja kriogene obdelave z odrezavjem je namenjeno prehodu k trajnostni proizvodnji na ravni podjetja. Pri tem moramo upoštevati in optimizirati procese na naslednjih področjih:

- načrtovanje, oblikovanje in razvoj trajnostnih kriogenih tehnologij za različne postopke obdelave,
- optimizacija sistema za dovajanje, kriogene tekočine z nadzorovanim tlakom, masnim pretokom in fazo pretoka (tekočina ali plin),
- optimizacija šob za selektivno doziranje tekoče fazne kriogene tekočine,
- vrednotenje kriogene obdelave v različnih primerih in
- identifikacija prednosti in slabosti.



Slika 8: Primerjava kriogenega in konvencionalnega obdelovalnega sistema
 Vir: Pušavec, 2011.

Tabela 7: Primerjava kriogenega in konvencionalnega obdelovalnega sistema

Vplivni faktor	Konvencionalni način hlajenja in mazanja	Kriogeni način
Priprava hladilno mazalnega sredstva	Hladilno mazalna sredstva na osnovi nafte se večinoma uporabljajo kot emulzije, ki vsebujejo mineralno olje in površinsko aktivne snovi na osnovi nafte, proizvodnja teh komponent zahteva destilacijo in predelavo surove nafte, ki ustvarja več stranskih produktov	Tekoči dušik je utekočinjen atmosferski plin, ki se industrijsko proizvaja v velikih količinah s frakcijsko destilacijo zraka, vložek električne energije je približno 0,5 kWh/kg (energetsko intenziven proces) in hladilne vode (50 l/kg pri 15 °C), ni drugih odpadkov, kot so CO ₂ , SO ₂
Zagotavljanje hladilno mazalnega sredstva v rezalno cono	Hladilno mazalna sredstva krožijo v zaprtem krogu	Hladilno mazalna sredstva dovedemo enkratno, takojšnje izhlapevanje ob dovodu
	Črpalka z močjo 500 w, ki zagotavlja tlak 0,2 mpa in volumenski pretok v območju od 0 do 8 l/min, poraba je odvisna od pretoka hladilno mazalnega sredstva	Rezervoar tekočega dušika je pod tlakom, zato ni potrebna dodatna črpalka
Razgradnja	Dodatno stroški za razgradnjo hladilno mazalnega sredstva in obdelavo odrezkov	Večje porabe energije in čistejši postopek obdelave, trajnostni proces samo v primeru, da

Vplivni faktor	Konvencionalni način hlajenja in mazanja	Kriogeni način
		uporabimo energijo iz obnovljivih virov
Vpliv na zdravje zaposlenih	Vdihavanje meglic na osnovi olja predstavlja tveganje za zdravje zaposlenih	Nizka temperatura cevi, ki dovaja tekoči dušik lahko povzroči fizične opekline v primeru stika, vdihavanje kovinskih aerosolov
Odpadki	Kopičenje oljne usedline	0
Čas obdelave	Enak	Enak

Vir: Pušavec, 2011.

5.1 Analiza objavljenih študij parametrov odrezavanja Inoncel 718

V študiji parametrov odrezavanja (Kshitij, 2022) so se poskusi izvajali na stružnem centru Mac power VX 200 CNC s kriogenem načinom hlajenja (tekoči ogljikov dioksid, LCO₂). LCO₂ se v cono rezanja dovaja z uporabo visokotlačne termoplastične cevi. Ko se LCO₂ dovaja v območje rezanja, pride do fazne transformacije iz tekočega v plinasto stanje. Ta dobava LCO₂ poteka pri zelo nizki temperaturi pri atmosferskem tlaku. Za študijo so bile uporabljene cilindrične palice Inconel 718 premera 50 mm in rezalno orodje, CNMG 120408 PR 1535. Parametri rezanja so predstavljeni v tabeli 8.

Tabela 8: Parametri odrezavnja materiala Inconel 718

začetni parametri				
hitrost rezanja	m/min	70		
podajanje	mm/vrt	2		
globina rezanja	mm	0,2		
optimizirani parametri				
hitrost rezanja	m/min	60	70	80
podajanje	mm/vrt	0,125	0,125	0,125
globina rezanja	mm	0,2	0,2	0,2

Vir: Kshitij, 2022.

Pri raziskavi so bili merjeni naslednji parametri:

- obraba orodja se meri z mikroskopom Mitutoyo Toolmaker, z merili ISO3685,
- porabljen energija med postopkom obdelave se beleži s 3-faznim analizatorjem moči Fluke 435 (serija II),

- hrapavost površine (R_z) s kontaktnim merilnikom hrapavosti površine Sutronic S128 Taylor Hobson se uporablja za merjenje vrednosti hrapavosti.

Kot je razvidno iz literature (Kshitij, 2022), so poizkusi izvedeni pri začetnih parametrih materiala Inconel 718 v kriogenem okolju, LCO₂ zniža temperaturo območja rezanja, kar poveča učinkovitost obdelave. Poskusi so se nadaljevali pri parametrih, kot je prikazano v tabeli 7, da bi dosegli boljše rezultate na področju obrabe orodja, porabe energije in hrapavosti površine.

Vrednotenje trajnosti proizvodnje vključuje ekonomske in okoljske vidike trajnosti v smislu skupnih stroškov strojne obdelave in skupnih emisij v okolje.

Obraba orodja neposredno pomaga pri določanju življenjske dobe orodja med procesom obdelave. Prispeva k ekonomskemu vidiku trajnosti, saj ima pomembno vlogo pri določanju skupnih stroškov obdelave. V skladu z merili ISO3685 je bila obdelava izvedena, dokler obraba boka ni dosegla največje vrednosti 0,3 mm, ki je pri eksperimentalnih pogojih dosežena pri dolžini obdelave 50 mm. LCO₂ je znatno znižal temperaturo rezalne cone, kar pomaga povečati življenjsko dobo orodja.

Za doseglo boljše učinkovitosti obdelave materiala Inconel 718, so bili parametri odrezavanja regulirani (zmanjšanje podajanja in globine rezanja). Povprečna obraba orodja 0,3 mm je bila dosežena pri dolžini obdelave 200 mm (hitrost rezanja 70 m/min), 100 mm (hitrost rezanja 80 m/min), oziroma 200 mm (hitrost rezanja 60 m/min), optimalna hitrost rezanja je 70 m/min.

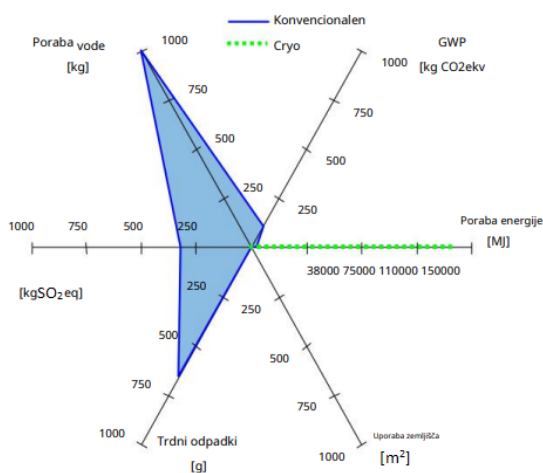
Po vrednosti hrapavosti površine vrednotimo kakovost izdelka in končne obdelave površine. Za raziskavo je bila izmerjena vrednost R_z , ki predstavlja največjo višino vrha do najnižje točke doline znotraj izmerjene dolžine. Vrednosti R_z so za 7 % višje pri obdelavi 80 m/min v primerjavi s 70 m/min in 9 % pri obdelavi 80 m/min v primerjavi s 60 m/min. Povečanje hitrosti rezanja povzroči večjo proizvodnjo toplote in večje trenje, kar povzroči povečanje hrapavosti površine.

Specifična poraba energije se povečuje s povečanjem hitrosti rezanja, vendar to ne pomeni, da bo povečanje porabe energije povzročilo zmanjšanje energetske učinkovitosti. S povečanjem hitrosti rezanja se bo stopnja odstranjevanja odrezkov

povečala, kar bo sorazmerno povečalo energijsko učinkovitost. Takšno vrednotenje porabe energije glede na specifično porabo energije zagotavlja učinkovito vrednotenje trajnosti obdelave. V študiji (Kshitij, 2022) je razvidno, da se s povečevanjem rezalne hitrosti specifična poraba energije zmanjšuje. Specifična poraba energije se zmanjša za približno 14 % (hitrost rezanja 70 m/min) in 25 % (hitrost rezanja 80 m/min), v primerjavi s hitrostjo rezanja 60 m/min.

Vrednotenje trajnosti proizvodnje vključuje ekonomske in okoljske vidike trajnosti pri upoštevanju skupnih stroškov obdelave z odrezavanjem in skupnih emisij v okolje. Skupni stroški obdelave so nižji pri rezalni hitrosti 70 m/min in 60 m/min za približno 35 % oziroma 26 % v primerjavi s hitrostjo rezanja 80 m/min. Emisije iz LCO₂ vrednotimo kot nične, saj se LCO₂, ki se uporablja med odrezavanjem, ne proizvaja ločeno, delovni prostori pa morajo biti ustrezno prezračeni. Odrezki, ki nastanejo pri kriogenem odrezavanju, so primernejši za nadaljnjo predelavo. Količina energije, potrebna za recikliranje Inconela 718 v mokrem okolju, je 92,97 kWh/kg, v kriogenem okolju 26,03 kWh/kg (Kshitij, 2022).

Z optimizacijo parametrov odrezavanja materiala Inconela 718 je ugotovljeno, da so emisije v okolje nižje pri hitrosti rezanja 70 m/min in 60 m/min za približno 10 %, oziroma 7 % v primerjavi s hitrostjo rezanja 80 m/min (slika 9).



Slika 9: Obremenitve na okolje konvencionalen način hlajenja in mazanja / kriogeni način

Vir: Pušavec, 2011.

Obdelava brez hladilno mazalnih sredstev zaradi ekonomskih razlogov ni mogoča.

Pri izračunu stroškov proizvodnje odrezavanja, prikazanih v tabeli 9, je življenjska doba orodja ključni dejavnik. Izvedeni so bili poskusi (Pušavec, 2011) struženja palic Inconel 718 s premerom 40 mm in dolžino 100 mm. Pri obdelavi so bili uporabljeni orodni vložki iz karbidne trdine razreda SANDVIK GC 1105, oznaka geometrije orodja CNMG120408-23 ISO. Življenjska doba orodja je bila ocenjena v skladu s standardom ISO3685, ki ureja povprečno merilo življenjske dobe orodja, $VB_{max} = 0,4$ mm. Obraba orodja je bila merjena z optičnim mikroskopom. Konvencionalni način hlajenja in mazanja je bil izveden z oljem na rastlinski osnovi (6,7 % emulzija), s pretokom 6 l/min. Kriogena obdelava je bila izvedena z uporabo LN pod tlakom 1 MPa in hitrostjo pretoka približno 0,6 kg/min.

Iz predstavljenih rezultatov (Pušavec, 2011) je razvidno, da je konvencionalna obdelava bistveno dražja od kriogene obdelave, pri manjših rezalnih hitrostih je konvencionalna obdelava lahko najcenejša, vendar ta proizvodnja ni optimalna. Kriogeni način obdelava omogoča visoko učinkovitost in visoko produktivnost.

Tabela 9: Primerjava stroškov konvencionalen in kriogene proizvodnje odrezavanje zlitine Inconel 718

stroški	konvencionalni način hlajenja in mazanja	kriogeni način
urna postavka	31,13 (€/h)	36,54 (€/h)
stroški hladilno mazalnega sredstva	0,17 (€/h)	7,51 (€/h)
		kriogena obdelava je kljub temu, da je priprava LN energetsko zelo intenziven proces, energetsko učinkovitejša od konvencionalne obdelave na račun podaljšanja življenjske dobe orodja in s tem manjše porabe rezilnega orodja
odpadki	ločevanje olja in odrezkov	0
	ločevanje ne emulgiranih olj s posnemanjem, ločevanje trdih delcev s filtracijo, ločevanje emulzije in obdelavo odpadne vode	0
	transport odrezkov	transport odrezkov
	stiskanje odrezkov	stiskanje odrezkov

stroški	konvencionalni način hlajenja in mazanja	kriogeni način
stroški / kos rezalna hitrost $v_c = 90$ m/min podajanja $f=0,25$ mm/vrt globina rezanja $a_p=1,2$ mm	4,69 (€/kos)	1,45 (€/kos)
število kosov / življenjski dobo orodja	1	6
čas menjave orodja (s/kos)	180	30
čas obdelovalnega cikla (s/kos)	243,6	93,5
število izdelanih kosov (kos/uro)	14,8	38,5
cena strojne ure na kos (€/kos)	2,11	0,95
cena orodja na kos (€/kos)2,50	0,42	
cena hladilno mazalnega sredstva na kos (€/kos)	0,002	0,07
čas priprave na kos (s/kos)	210	66
raba električne energije na kos (kWh/kos)	0,076	0,055
čiščenje kosa (€/kos)	0,063	0
obdelava odrezkov (€/kos)	0,015	0,004

Vir: Pušavec, 2011

6 Zaključki

Trajnostno vrednotenje proizvodnega procesa podaja ugotovitev, da bo prihodnost trajnostne proizvodnje vključevala uporabo kriogene tehnologije obdelave za zmanjšanje okoljskih obremenitev in zdravstvenih tveganj, hkrati pa povečala zmogljivost in stroškovno učinkovitost obdelave z odrezavanjem.

Trajnostna kriogena tehnologija obdelave ima velik potencial za znižanje proizvodnih stroškov in izboljšanje konkurenčnosti z zmanjšanjem porabe virov in ustvarjanjem manjše količine odpadkov. Iz predstavljenih rezultatov je razvidno, da je konvencionalna obdelava bistveno dražja od kriogene obdelave. Pri manjših rezalnih hitrostih je konvencionalna obdelava lahko najcenejša, vendar ta proizvodnja ni optimalna. Kriogeni način obdelave omogoča visoko učinkovitost in visoko produktivnost.

Vrednotenje obdelave z odrezavanjem, ki je predstavljeno v eksperimentalni študiji (Pušavec, 2011; Kshitij, 2022), ki se nanaša na obdelavo visokotemperaturne Nizlitine (Inconel 718), dokazuje, da stroški orodja močno prispevajo k skupnim proizvodnim stroškom in da kriogena obdelava ponuja čisto in stroškovno učinkovito pot za izboljšanje trajnostne učinkovitosti v primerjavi s konvencionalno obdelavo z odrezavanjem.

Ugotavljamo, da je kriogeni način hlajenja postopkov odrezavanja trajnostna tehnologija v primerjavi z uporabo konvencionalnih načinov hlajenja in mazanja odrezovalnih postopkov, saj je opustitev hladilno mazalnih sredstev na osnovi nafte premik k trajnostni proizvodnji.

Upoštevati je potrebno, da je priprava tekočega dušika energijsko potraten proces. Primerjalne analize in izračun celotne porabe energije pa kažejo, da je lahko kriogena obdelava energijsko učinkovitejša od klasične obdelave, kar je posledica drastičnega zmanjšanja porabe rezilnega orodja.

Kljub večjim začetnim stroškom in pripravam, povezanih s sistemom kriogene obdelave, takšen način odrezavanja predstavlja trajnostne koristi s krajšimi proizvodnimi cikli in nižjimi stroški, potrebnimi za obdelavo izdelka, ter poveča produktivnost zaradi večje proizvodnje. Kriogeni način obdelave poveča zanesljivost obdelave odrezavanja (Pušavec, 2011), ohranja tolerance dimenzij in izboljša kvaliteto obdelane površine. Potrebna je industrijska implementacija kriogenega sistema, ki zmanjšuje porabo (stroške), okoljske obremenitve in zdravstvena tveganja ob hkratnem povečanju zmogljivosti strojev.

V primerjavi s proizvodnimi postopki, kot so problikovanje, kovanje in litje, obdelava po postopkih odrezavanja porabi več energije in s tem povzroča večje vplive na okolje. Optimizacija postopkov odrezavanja in obvladovanje snovnih in energijskih tokov v teh postopkih predstavlja izzive in pot k trajnostni proizvodnji.

Aktivnosti za doseganje trajnostne proizvodnje je potrebno usmeriti v:

- snovanje izdelkov (manjša raba osnovnega materiala), upoštevajoč celotni življenjski cikel izdelka,
- izbiro rezalnih materialov, uvajanje okolju prijaznejših tehnologij hlajenja in mazanja,
- po metodi sočasnega inženirstva sprotno optimiziranje tehnoloških procesov,
- usposabljanje zaposlenih, kar je bistvenega pomena pri doseganju tega cilja trajnostne proizvodnje,

- obratno sorazmerje med visoko produktivnostjo in trajnostno (zeleno) proizvodnjo, kar je potrebno upoštevati pri določevanju rezalnih parametrov in uporabi hladilno mazalnih tekočin,
- pri uvajanju novosti je potrebno upoštevati prednosti in slabosti, ki jih nova tehnologija prinaša na področja produktivnosti, okolja in zaposlenih,
- povečanje produktivnosti tehnološkega procesa odrezavanja mora povečati obseg proizvodnje ob zmanjšanju porabe virov, kar vodi k trajnostnim proizvodnim procesom.

Pri vrednotenju postopka kriogenega načina hlajenja pri postopkih odrezavanja glede na doseganje načel trajnostne proizvodnje, predstavljenih v tabeli 1 (Načela trajnostne proizvodnje, Viles, 2022), ugotovimo, da takšen način proizvodnje neposredno ustreza načelom: 2, 3, 4, 5, 9 in 10. Na ostala načela ima posredne vplive.

Vrednotenje postopka kriogenega načina hlajenja pri postopkih odrezavanja glede na doseganja kazalcev trajnostne proizvodnje, predstavljenih v tabeli 2 (Kazalci trajnostne proizvodnje, Vir: Quan, 2021), podaja zaključke, da je po kazalcih: 1, 2, 3, 4 in 5 takšna proizvodnja trajnostna.

Literatura

- Abbas, A.T., Pimeno, D.Y., Erdako, I.N., Mikołajczyk, T., Soliman, M.S., Rayes, M.M. (2019). Optimization of cutting conditions using artificial neural networks and the Edgeworth-Pareto method for CNC face-milling operations on high-strength grade-H steel. 2019, *Int J Adv Manuf Technol* 2019;105:2151–65. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-04327-4>
- Alves, S.M., Silva e Mello, V., Sinatora, A. (2018), Nanolubrication mechanisms: influence of size and concentration of CuO nanoparticles. *Mater Perform Charact* 2018;7: 20170064. <https://www.astm.org/mpc20170064.html> and case study, *Sustainable Materials and Technologies* Volume 34, December 2022, e00507, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221499372200121X?via%3Dihub>
- Balogun, V.A., Edem, I.F., Gu, H., Mativenga, P.T. (2018), Energy centric selection of machining conditions for minimum cost. *Energy* 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.020>
- Benedicto, E., Carou, D., Rubio, E.M. (2017). Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling systems used in machining processes. *Procedia Eng* 2017;184:99–116. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.075>
- Bilga PS., Singh S., Kumar R. (2016). Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method. *Journal Clean Prod* 2016;137: 1406–17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.220>
- Cheng, C., Phipps, D., Alkhaddar, R.M., (2005). Treatment of spent metalworking fluids. *Water Res* 2005;39:4051–63. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.07.012>

- Commission E, (2019). A Clean Planet for All. A European Long-term Strategic Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy. <https://europa.eu/capacity4dev/policy-forum-development/documents/european-commission-communication-clean-planet-all-european-strategic-long-term-vision>
- Dwivedi, A., Agrawal, D., Jha, A., Gastaldi, M., Paul, S.K., D'Adamo, I. (2021). Addressing the challenges to sustainable initiatives in value chain flexibility: implications for sustainable development goals. *Glob. J. Flex. Syst. Manag.* <https://doi.org/10.1007/s40171-021-00288-4>
- Ghobakhloo, M., Fathi, M. (2021). Industry 4.0 and opportunities for energy sustainability. *Journal Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126427>
- Goindi, G.S., Sarkar, P. (2017). Dry machining: a step towards sustainable machining – challenges and future directions. *J Clean Prod* 2017;165:1557–71. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.235>
- Grguraš, D. (2020). *Odrezovalne razmere pri procesu kriogenega freziranja z uporabo tekočega CO₂* [na spletu]. Doktorska disertacija. Ljubljana : Univerza v Ljubljani. [Dostopano 28 januar 2023]. Pridobljeno s: <https://repositorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=113709>
- Hatim, Q.Y., Saldana, C., Shao G., Kim, D.B., Morris, K.C., Witherell, P. (2020). A decision support methodology for integrated machining process and operation plans for sustainability and productivity assessment, *Int J Adv Manuf Technol* 2020;107: 3207–30. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04268-y>
- Hegab, H., Umer, U., Deiab, I, Kishawy, H. (2018), Performance evaluation of Ti–6Al–4V machining using nano-cutting fluids under minimum quantity lubrication. *Int J Adv Manuf Technol* 2018;95:4229–41. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1527-z>
- Henao, R., Sarache, W. (2022). Sustainable performance in manufacturing operations: the cumulative approach vs. trade-offs approach. *Int. J. Prod. Econ.* 244, 108385. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108385>
- Imran, M., Mativenga, P.T., Gholinia, A., Withers, P.J.(2013), Comparison of tool wear mechanisms and surface integrity for dry and wet micro-drilling of nickel-base superalloys, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 76 (2014) 49–60, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.10.002> industry within the framework of the green economy concept: An overview
- Khan, A.M., Gupta, M.K, Hegab, H., Jamil M., Mia, M., He, N. (2020). Energy-based cost integrated modelling and sustainability assessment of Al-GnP hybrid nanofluid assisted turning of AISI52100 steel. *J Clean Prod* 2020;257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120502>
- Khanna, N., Agrawal, C., Pimenov, D.Y., Singla, A.K., Machado, A.R., da Silva, L.R.R., Gupta, M.K., Sarikaya, M., Krolczyk, G.M., (2022) Review on design and development of G. Kshitij et al. *Sustainable Materials and Technologies* 34 (2022) e00507 21 cryogenic machining setups for heat resistant alloys and composites, *J. Manuf. Process.* 68 (2021) 398–422, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.053>
- Kranjc, U. (2020), *Vrtanje z uporabo visokotlačnega hlajenja skozi orodje* [na spletu]. Diplomsko delo. Ljubljana : Univerza v Ljubljani. [Dostopano 28 januar 2023]. Pridobljeno s: <https://repositorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=118040>
- Krolczyk, G.M., Maruda, R.W., Krolczyk, J.B., Nieslony, P., Wojciechowski, S., Legutko, S. (2018). Parametric and nonparametric description of the surface topography in the dry and MQCL cutting conditions. *Measurement* 2018;121:225–39. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.052>
- Kshitij, G. Khanna, N., Vakkas Yildirim Ç.V., Daglı, S., Sarikaya, M. (2022). Resource conservation and sustainable development in the metal cutting
- Lannelongue, L., Grealey, J., Inouye, M. (2021). Green algorithms: quantifying the carbon footprint of computation. *Adv. Sci.* <https://doi.org/10.1002/adv.202100707>
- Markopoulos, A.P., Karkalos, N.E., Mia, M., Pimenov, D.Y., Gupta, M.K., Hegab, H.. (2020). Sustainability assessment, investigations, and modelling of slot milling characteristics in eco-

- benign machining of hardened steel. *Metals* 2020;10:1650.
<https://doi.org/10.3390/met10121650>
- Mia, M., Dhar, N.R. (2016). Prediction of surface roughness in hard turning under high pressure coolant using Artificial Neural Network. *Measurement* 2016;92:46–74,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224116303402>
- Mori, M., Fujishima, M., Inamasu, Y., Oda Y. (2011). A study on energy efficiency improvement for machine tools. *CIRP Ann* 2011;60:145–8. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.099>
- Pasko, N.I., Antsev, A.V., Antsev, V.Y. (2021). Resource management of a cutting tool in case of its reuse. *Mater Today Proc* 2020.,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320360090>
- Pimenov, D.Y., Mia, M., Gupta, M.K., Machado, A. R., Pintaude, G., Unune, D. R., Khanna, N., Khan, A.M., Tomaz, I., Wojciechowski, S., Kuntoğlu, M. (2022), Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: A review and future prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 166, September 2022, 112660, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122005524>
- Pušavec, F., Kopač, J. (2011), Sustainability assessment: cryogenic machining of inconel 718, *Stroj. Vestnik/Journal, Mech. Eng.* 57 (2011) 637–647, <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.249>
- Quan, Z., Renyan, M., Yue, H., Lu, Z., Zhen, Z., Chunjiao, L. (2021). Measurement of sustainable development index in China's manufacturing industry based on Er-xiang Dual theory, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 60, Issue 6, December 2021, Pages 5897-5908, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821002453>
- Ross, N.S., Gopinath, C., Nagarajan, S., Gupta, M.K., Shanmugam, R., Kumar, M.S. (2022), Impact of hybrid cooling approach on milling and surface morphological characteristics of Nimonic 80A alloy. *J Manuf Process* 2022;73:428–39. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.018>
- Sangwan, K.S., Sihag, N. (2019). Multi-objective optimization for energy efficient machining with high productivity and quality for a turning process. *Procedia CIRP* 2019;80: 67–72.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.022>
- Schneider, F., Das J., Kirsch, B., Linke, B., Aurich, J.C. (2019). Sustainability in ultra precision and micro machining: a review. *Int J Precis Eng Manuf Technol* 2019;6:601–10.
<https://doi.org/10.1007/s40684-019-00035-2>
- Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S.T. (2016), Energy conscious cryogenic machining of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2018;232: 1690–706.
<https://doi.org/10.1177/0954405416668923>
- Simon, J., Moraes, C.A.M., Modolo, R.C.E, Vargas, M., Calheiro, D., Brehm, F.A. (2017), Recycling of contaminated metallic chip based on eco-efficiency and eco-effectiveness approaches. *J Clean Prod* 2017;153:417–24. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.058>
- Tanco, M., Kalemkerian, F., Santos, J. (2021). Main challenges involved in the adoption of sustainable manufacturing in Uruguayan small and medium sized companies. *Journal Clean. Prod.* 293, 126139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126139>
- Theorizing the Principles of Sustainable Production in the context of Circular Economy and Industry 4.0, Sustainable Production and Consumption,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550922002305>
- United Nations, 17 Goals to Transform Our World, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>
- Velenturf, A.P.M., Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustain. Prod. Consum.* 27, 1437–1457. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018>
- Veleva, V., Ellenbecker, M. (2001). Indicators of sustainable production: framework and methodology. *Journal Clean. Prod.* [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00010-5](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00010-5)
- Viles, E., Kalemkerian, F., Garza-Reyes, J., Antony, J., Santos, J. (2022). Theorizing the Principles of Sustainable Production in the context of Circular Economy and Industry 4.0, Sustainable Production and Consumption,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550922002305>

- Vinodh, S., Arvind, K.R., Somanaathan, M. (2011). Tools and techniques for enabling sustainability through lean initiatives. *Clean Technol Environ Policy* 2011;13: 469–79. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0329-x>
- Yılmaz, B. S., Karabulut, Güllü, A. (2020). A review of the chip breaking methods for continuous chips in turning. *J Manuf Process* 2020;49:50–69. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.10.026>
- Zhao, F., Ogaldez, J., Sutherland, J.W. (2012). Quantifying the water inventory of machining processes. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2012;61:67–70. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.027>
- Zhao-hui, L., Wei-min, Z., Zhong-yue, X., Jia-bin, S., Dongdong, L. (2020). Research on extended carbon emissions accounting method and its application in sustainable manufacturing. *Procedia Manuf* 2020;43:175–82. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.132>
- Zhou, G., Lu, Q., Xiao, Z., Zhou, C., Tian, C. (2019), Cutting parameter optimization for machining operations considering carbon emissions. *Journal Clean Prod* 2019;208: 937–50. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261833213X>
- Zhou, L., Li J., Li F., Meng, Q., Li J., Xu, X. (2016). Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. *Journal Clean Prod* 2016;112:3721–34. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.093>,
- Žun, Š., 2014, Sistemsko okoljsko vrednotenje trajnostnega razvoja poselitvenih območij Mestne občine Kranj = Systemic environmental evaluation of sustainable development of settlement areas in Kranj urban municipality, Dela, <https://journals.uni-lj.si/Dela/article/view/dela.42.2.21-49/2784>