

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Črtomir ROSIĆ

**VPLIV GOSTOTE IN KINEMATSKIH
PARAMETROV KONTINUIRANEGA STRUŽENJA
NA TEMPERATURO REZILA**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2006

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Črtomir ROSIĆ

**VPLIV GOSTOTE IN KINEMATSKIH PARAMETROV
KONTINUIRANEGA STRUŽENJA NA TEMPERATURO REZILA**

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

**IMPACT OF DENSITY AND TURNING KINEMATICS
PARAMETERS ON TOOL TEMPERATURE**

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2006

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za mehanske obdelovalne tehnologije lesa, Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval doc. dr. Bojana Bučarja za recenzentko pa doc. dr. Dominiko Gornik Bučar.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Črtomir Rosić

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

| | |
|----|--|
| ŠD | Vs |
| DK | UDK 621.941 |
| KG | temperatura rezanja/struženje/MDF/kinematski parametri/gostota |
| AV | ROSIĆ, Črtomir |
| SA | BUČAR, Bojan (mentor)/GORNIK BUČAR Dominika (recenzentka) |
| KZ | SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34 |
| ZA | Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo |
| LI | 2006 |
| IN | VPLIV GOSTOTE IN KINEMATSKIH PARAMETROV KONTINUIRANEGA STRUŽENJA NA TEMPERATURO REZILA |
| TD | Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij) |
| OP | XII, 40 str. 6 pregl., 28 sl., 28 pril., 24 vir. |
| IJ | sl |
| JI | sl/en |
| AI | V procesu odrezavanja MDF kompozitnega materiala se zaradi trenja med obdelovalcem in orodjem razvija toplota, ki segreva orodje. Prekomerni razvoj toplotne energije je običajno posledica neustrezne kombinacije obdelovalnih parametrov. Analizirali smo vpliv gostote in kinematskih tehnoloških parametrov na temperaturo rezila v procesu kontinuiranega struženja MDF. Eksperiment smo izvedli na stružnici Centauro TC 1200 in uporabili stružno orodje z rezilom iz karbidne trdine K05. Temperaturo smo merili s termo členom tipa E, nameščenim med rezilno ploščico in nosilom orodja. Podatke o temperaturi smo zajemali z merilno kartico PCI-6014, vstavljeni v osebni računalnik. Programska oprema, uporabljena za meritev in nadzor vseh parametrov, je bila LabView. Rezultati opravljenih analiz kažejo, da je temperatura v tesni korelaciji s tehnološkimi parametri odrezavanja, v našem primeru pomikom in rezalno hitrostjo ter gostoto obdelovanega materiala kot fizikalnim parametrom. Temperatura orodja je v pozitivni korelaciji, tako s podajalno hitrostjo kakor tudi gostoto obdelovanega materiala. Rezalna hitrost ima na temperaturo orodja dokaj neizrazit in nesignifikanten vpliv. |

KEY WORDS DOCUMENTATION

| | |
|----|---|
| DN | Vs |
| DC | UDC 621.941 |
| CX | tool temperature/turning/MDF/kinematics parameters/density |
| AU | ROSIĆ, Črtomir |
| AA | BUČAR, Bojan (supervisor)/GORNIK BUČAR Dominika (co-advisor) |
| PP | SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34 |
| PB | University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology |
| PY | 2006 |
| TI | IMPACT OF DENSITY AND TURNING KINEMATICS PARAMETERS ON TOOL TEMPERATURE |
| DT | Graduation Thesis (Higher professional studies) |
| NO | XII, 40 p. 6 tab., 28 fig., 28 ann., 24. ref. |
| LA | sl |
| AL | sl/en |
| AB | In the cutting process of MDF composite material, because of the friction between the work piece and tool, heat develops, which warms the tool. Excessive heat is generally the consequence of unsuitable combination of processing parameters. The influence of density and kinematics of technological parameters on the temperature of cutting tools in the process of MDF continual turning was analysed. Wood turning experiment was performed on the Centauro TC 1200 lathe. For the processing a turning tool with a cutter of K05 carbide steel was used. The temperature was measured with an E type thermal element, placed between the cutting plate and tool bearer. The data on temperature were collected using the measurement PCI-6014 card, placed in a personal computer. The software, used for the measurement and control of all parameters, was designed by LabView. The analysis shows the temperature to be in a close correlation to the technological parameters of cutting, in our case the feed and cutting speed, and the density of the work material, as physical parameters. The temperature of the tool is in positive correlation to both, feeding speed and density of material. The cutting speed has a very incisive and insignificant influence on the temperature of the tool. |

KAZALO VSEBINE

| | Str. |
|---|-----------|
| Ključna dokumentacijska informacija (KDI) | III |
| Key words documentation (KWD) | IV |
| Kazalo vsebine | V |
| Kazalo preglednic | VIII |
| Kazalo slik | IX |
| Kazalo prilog | XI |
| 1 UVOD | 1 |
| 2 ODREZAVANJE | 2 |
| 2.1 TEORIJE IN TEHNIKE ODREZAVANJA | 2 |
| 2.2 ZGODOVINSKI PREGLED TEORIJ | 2 |
| 2.3 MODEL ORTOGONALNEGA ODREZAVANJA | 4 |
| 2.4 TEMPERATURNE RAZMERE PRI ODREZAVANJU | 5 |
| 2.5 TRENJE IN TEORIJA PLUŽNEGA EFEKTA | 7 |
| 2.6 GEOMETRIJSKI PARAMETRI ODREZAVANJA IN SILE PRI ODREZAVANJU | 8 |
| 2.7 MERJENJE TEMPERATUR PRI ODREZAVANJU | 10 |
| 2.8 STRUŽENJE | 11 |
| 2.9 KARBIDNE TRDINE | 14 |
| 2.10 VLAKNENE PLOŠČE SREDNJE GOSTOTE – MDF KOT MATERIAL ZA ODREZAVANJE | 15 |
| 3 MATERIALI IN METODE | 16 |
| 3.1 VRSTA REZALNEGA ORODJA IN GEOMETRIJA ORODJA | 16 |
| 3.2 VPENJANJE STRUŽNEGA NOŽA IN REZALNE PLOŠČICE | 16 |
| 3.3 DOLOCITEV GOSTOTNEGA PROFILA | 17 |
| 3.4 METODA MERJENJA TEMPERATURE | 17 |
| 3.5 DOLOCITEV IN IZRAČUN PARAMETROV ODREZAVANJA | 18 |
| 3.5.1 Določitev in izračun odrezovalnih parametrov pri obdelovancu št. 1 | 18 |
| 3.5.1.1 Določitev znanih parametrov | 18 |
| 3.5.1.2 Izračun dejanskega števila vrtljajev | 18 |
| 3.5.1.3 Izračun hitrosti pomika | 18 |
| 3.5.1.4 Izračun povprečnih rezalnih hitrosti | 18 |
| 3.5.2 Določitev in izračun odrezovalnih parametrov pri obdelovancu št. 2 | 19 |
| 3.5.2.1 Določitev znanih parametrov | 19 |
| 3.5.2.2 Izračun dejanskega število vrtljajev | 19 |
| 3.5.2.3 Izračun hitrosti pomika | 19 |
| 3.5.2.4 Izračun povprečnih rezalnih hitrosti | 20 |

| | | |
|--------------|---|----|
| 3.5.3 | Določitev in izračun odrezovalnih parametrov pri obdelovancu št. 3 | 20 |
| 3.5.3.1 | Določitev znanih parametrov | 20 |
| 3.5.3.2 | Izračun dejanskega število vrtljajev | 20 |
| 3.5.3.3 | Izračun hitrosti pomika | 21 |
| 3.5.3.4 | Izračun povprečnih rezalnih hitrosti | 21 |
| 3.5.4 | Določitev in izračun odrezovalnih parametrov pri obdelovancu št. 4 | 21 |
| 3.5.4.1 | Določitev znanih parametrov | 21 |
| 3.5.4.2 | Izračun dejanskega število vrtljajev | 22 |
| 3.5.4.3 | Izračun hitrosti pomika | 22 |
| 3.5.4.4 | Izračun povprečnih rezalnih hitrosti | 22 |
| 3.6 | EKSPERIMENTALNI SISTEM | 22 |
| 3.6.1 | Proces odrezavanja | 22 |
| 3.6.2 | Merjenje temperature odrezavanja | 23 |
| 4 | REZULTATI | 24 |
| 4.1 | KORELACIJA MED IZMERJENIMI MAKSIMALNIMI IN MINIMALNIMI TEMPERATURAMI TER POMIKOM | 24 |
| 4.2 | KORELACIJA MED IZMERJENIMI MAKSIMALNIMI IN MINIMALNIMI TEMPERATURAMI TER REZALNIMI HITROSTMI | 25 |
| 4.2.1 | Korelacija med izmerjenimi temperaturami T_{max} in T_{min} ter rezalnimi hitrostmi v_r pri podajalni hitrosti orodja $v_p=0,12\text{m/min}$ | 25 |
| 4.2.2 | Korelacija med izmerjenimi temperaturami T_{max} in T_{min} ter rezalnimi hitrostmi v_r pri podajalni hitrosti orodja $v_p=0,24\text{m/min}$ | 26 |
| 4.2.3 | Korelacija med izmerjenimi temperaturami T_{max} in T_{min} ter rezalnimi hitrostmi v_r pri podajalni hitrosti orodja $v_p=0,48\text{m/min}$ | 26 |
| 4.2.4 | Korelacija med izmerjenimi temperaturami T_{max} in T_{min} ter rezalnimi hitrostmi v_r pri podajalni hitrosti orodja $v_p=0,72\text{m/min}$ | 27 |
| 4.3 | KORELACIJA MED IZMERJENIMI TEMPERATURAMI IN GOSTOTNIM PROFILOM MDF-PLOŠČE | 28 |
| 4.3.1 | Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=6,66\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 28 |
| 4.3.2 | Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 29 |
| 4.3.3 | Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=6,54\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 30 |
| 4.3.4 | Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,79\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 31 |
| 4.3.5 | Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,52\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 32 |

| | | |
|--------------|---|----|
| 4.3.6 | Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=5,76\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 33 |
| 4.3.7 | Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,55\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 34 |
| 4.3.8 | Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 35 |
| 5 | RAZPRAVA IN SKLEPI | 37 |
| 5.1 | VPLIV PODAJALNE HITROSTI ORODJA | 37 |
| 5.2 | VPLIV REZALNE HITROSTI | 37 |
| 5.3 | VPLIV GOSTOTNEGA PROFILA MDF | 37 |
| 6 | POVZETEK | 38 |
| 7 | VIRI | 39 |
| | PRILOGE | |

KAZALO PREGLEDNIC

| | str. |
|---|------|
| Preglednica 1: Kombinacija vodnikov standardnih termočlenov | 11 |
| Preglednica 2: Izvleček iz standarda ISO 513 za karbidne trdine | 15 |
| Preglednica 3: Izmerjeni podatki gostotnega profila MDF-plošče po gravimetrični metodi postopnega odvzema materiala | 19 |
| Preglednica 4: Prikaz izmerjenih in izračunanih parametrov pri obdelavi obdelovanca štev. 1 | 20 |
| Preglednica 5: Prikaz izmerjenih in izračunanih parametrov pri obdelavi obdelovanca štev. 2 | 21 |
| Preglednica 6: Prikaz izmerjenih in izračunanih parametrov pri obdelavi obdelovanca štev. 3 | 22 |

KAZALO SLIK

| | str. |
|--|------|
| Slika 1: Prikaz plužnega efekta | 7 |
| Slika 2: Prikaz geometrijskih kotov rezila pri procesu obdelave | 9 |
| Slika 3: Princip delovanja termočlena | 11 |
| Slika 4: Prikaz geometrijskih ravnin obdelovalnega sistema | 14 |
| Slika 5: Dimenzijske rezalne ploščice | 16 |
| Slika 6: Gostotni profil MDF plošče | 17 |
| Slika 7: Načrt meritve | 23 |
| Slika 8: Korelacija med izmerjenimi T_{\max} in T_{\min} ter podajalnimi hitrostmi v_p | 24 |
| Slika 9: Korelacija med izmerjenimi T_{\max} in T_{\min} ter rezalno hitrostjo v_r pri podajalni hitrosti $v_p=0,12\text{m/min}$ | 25 |
| Slika 10: Korelacija med izmerjenimi T_{\max} in T_{\min} ter rezalno hitrostjo v_r pri podajalni hitrosti $v_p=0,24\text{m/min}$ | 26 |
| Slika 11: Korelacija med izmerjenimi T_{\max} in T_{\min} ter rezalno hitrostjo v_r pri podajalni hitrosti $v_p=0,48\text{m/min}$ | 26 |
| Slika 12: Korelacija med izmerjenimi T_{\max} in T_{\min} ter rezalno hitrostjo v_r pri podajalni hitrosti $v_p=0,72\text{m/min}$ | 27 |
| Slika 13: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=6,66\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 28 |
| Slika 14: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=6,66\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 29 |
| Slika 15: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 29 |
| Slika 16: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 30 |
| Slika 17: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=6,54\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 30 |
| Slika 18: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=6,54\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 31 |
| Slika 19: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,79\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 31 |
| Slika 20: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,79\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 32 |
| Slika 21: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,52\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ | 32 |

- Slika 22: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,52\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ 33
- Slika 23: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=5,76\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ 33
- Slika 24: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=5,76\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ 34
- Slika 25: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,55\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ 34
- Slika 26: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,55\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ 35
- Slika 27: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ 35
- Slika 28: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$ 36

KAZALO PRILOG

- Priloga 1: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=6,66\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 2: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=6,42\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 3: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=6,18\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 4: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 5: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=5,42\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 6: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=5,17\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 7: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=4,92\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 8: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=6,54\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 9: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=6,29\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 10: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=6,04\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 11: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,79\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 12: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,53\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 13: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,28\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 14: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,02\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 15: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,78\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 16: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,52\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 17: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,27\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 18: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,02\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 19: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=5,76\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 20: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=5,51\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 21: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=5,26\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 22: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,79\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$

- Priloga 23: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,55\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 24: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,30\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 25: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,05\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 26: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 27: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,55\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$
- Priloga 28: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=5,30\text{m/s}$,
 $n=1200\text{min}^{-1}$

1 UVOD

Izdelki iz lesa in lesnih kompozitov so izdelani z različnimi tehnološkimi postopki mehanske obdelave. Ti postopki so razčlenjeni na različne načine, eno od razdelitev pa opisuje tudi mednarodni standard. Pri mehanski obdelavi vedno izhajamo iz začetnega kosa oziroma surovca materiala, ki mu želimo dati zahtevano končno obliko s spremembami geometrijske oblike. Pri tem uporabljamo predvsem:

- postopek s preoblikovanjem, pri katerem se masa surovca ne spremeni, ali pa se spremeni samo neznatno,
- postopek z odvzemanjem mase, pri katerem od celotne mase surovca odstranimo določeno količino mase surovca.

Pri procesih mehanske obdelave lesa z odvzemanjem proizvajalci v lesni industriji dajejo velik poudarek kvaliteti obdelave, kar je pogoj za izdelavo konkurenčnega izdelka in njegovo uveljavljanje na trgu.

Iz prakse je znano, da je ustrezna izbira rezalnega orodja in materiala zelo pomemben dejavnik v procesu mehanske obdelave, ki je povezan tudi z drugimi dejavniki katerih nikakor ne moremo obravnavati ločeno. Pristopi so pomembni že pri nabavi orodja, ki je povezana z določenimi stroški, v času proizvodnje pa jim moramo dodati še druge stroške, kot so:

- čas obdelovalne operacije,
- menjava oziroma nastavitev orodja in stroja,
- prehodni časi med nastavljanjem in menjavanjem orodja,
- brušenje orodja,
- obstojnost orodja.

Prav obstojnost orodja je zelo povezana s kvaliteto materiala izbranega orodja, njegovim vzdrževanjem in seveda pravilnim izborom obdelovalnih parametrov pri določenem procesu obdelave. Neustrezni obdelovalni parametri imajo negativen vpliv na obrabo rezalnega orodja.

V procesu odrezavanja je rezalno orodje obremenjeno s silami pri nastajanju odrezka, med procesom pa se zaradi trenja med obdelovancem in orodjem razvije toplota, ki segreje odrezek in orodje.

V diplomske nalogi smo analizirali korelacijo med temperaturo in rezalnimi parametri pri obdelavi vlaknene plošče srednje gostote (MDF).

2 ODREZAVANJE

2.1 TEORIJE IN TEHNIKA ODREZAVANJA

Večina spoznanj o zakonitostih odrezavanja je bila pridobljena najprej v kovinski industriji z delovnimi izkušnjami, pozneje pa tudi z opazovanjem in poskusi. Tako pridobljeno znanje uporabljam v praksi in ga zato označujemo kot tehniko odrezavanja. Tudi na področju odrezavanja lesa so se v preteklosti izvajali določeni poskusi in študije o dogajanju na področju odrezavanja lesnega tkiva, za osnovo pa so bile znane predvsem teorije oziroma teoretični modeli oblikovanja odrezka.

Pri preoblikovanju je mogoče zakonitosti fizike, nauka o trdnosti in drugih teoretičnih ved zelo koristno uporabiti pri načrtovanju in določanju optimalnega načina obdelave. Zlasti spoznanja iz teorije elastičnosti in plastičnosti so veliko prispevala k današnjemu obravnavanju problemov pri odrezavanju.

Tudi dogajanja pri nastanku odrezka, ki je v bistvu proces preoblikovanja na ozko omejenem prostoru, so skušali na različne načine pojasniti s teorijo, vendar je nastajanje odrezka izredno kompleksen pojav, pri katerem se prepletajo:

- zakonitosti preoblikovanja,
- topotni pojavi,
- fizikalni in kemični vplivi.

2.2 ZGODOVINSKI PREGLED TEORIJ

Prve objave o postopkih odrezavanja in problemih v zvezi z njimi zasledimo že v sredini 19. stoletja. Takrat so se orodja oblikovala, dobivala so obliko, ki ustreza današnjim načelom. Murn (1995) v svoji knjigi Odrezavanje in odnašanje omenja leto 1851, ko je Coquilhat izvedel študije o vrtanju različnih materialov. Pri svojih poskusih je izmeril sile in momente ter določil specifično delo pri odrezavanju.

Avtor omenja tudi, da je enačbo za izračun dela pri odrezavanju objavil leta 1858 Wiebe, leta 1873 pa je Hartig objavil temu ustrezne izmerjene podatke. Leta 1881 je Mallock postavil teorijo, ki je zelo blizu današnjemu poznovanju. Ugotovil je, da do striga prihaja v ozko omejeni strižni ravnini in do trenja vzdolž cepilne ploskve. Ugotovil je tudi, da zmanjšanje trenja poveča strižni kot. Raziskave so temeljile predvsem na opazovanju, kar pa se je spremenilo leta 1892, ko je Haussner izdelal prvi merilnik sil in ugotovil, da poleg glavne sile v smeri rezanja nastopata še dve komponenti.

Na prelomu 20. stoletja je prve raziskave na področju nastajanja odrezka pri odrezavanju lesa izvedel Reuleaux, ki je primerjal tvorbo odrezka s cepljenjem lesa. V svojih raziskavah je postavil hipotezo, da do cepljenja lesnega tkiva prihaja že pred rezalnim robom. Z njegovimi ugotovitvami se ni strinjal Rosenhain, ki je leta 1906 s svojimi študijami to hipotezo zavrnil. V začetku 20. stoletja, točneje leta 1910, so ugotovili, da je temperatura odrezka zelo pomembna. Usachev je leta 1925 v orodje prvi vgradil termometer.

Proces obdelave lesa in nastanek odrezka je bil zaradi strukture lesa velik izviv za mnoge strokovnjake. Večina raziskav, ki so obravnavale obdelovanje lesa, se je osredotočilo na nastanek odrezka. Z raziskavami je bilo ugotovljeno, da se pri odrezavanju pojavljajo tudi deformacije pod ločitveno ravnino odrezka. Študije so pokazale, da se odrezek pojavlja v segmentni diskontinuirani obliki in je močno deformiran.

V procesu nastajanja odrezka se njegova struktura poruši, tvorijo se območja intenzivne deformacije, ki v ekstremnih razmerah povzročijo popolno ločitev materiala. Razlagu nastanka diskontinuiranega odrezka lahko pojmujemo kot hipne spremembe v strukturi materiala obdelovanca in njegovih mehanskih lastnosti. Woodson in Koch sta leta 1970 v svoji študiji z mikrofotografijami prikazala tvorbo segmentne strukture odrezka pri odrezavanju obdelovancev z enotno strukturo, Zeeman pa je s tako imenovano teorijo katastrofe raziskoval procese pri katerih pride do hipnih ireverzibilnih sprememb deformacij odrezka kot spremenljivke procesa odrezavanja.

Bučar (1991) omenja prvi širše sprejet model tvorbe odrezka je za področje obdelovanja kovin, ki sta ga postavila Ernst in Merchant. V skladu z modelom je porušitev materiala posledica nateznih in strižnih napetosti v ravnini, ki poteka poševno od rezalnega roba do površine obdelovanca. V nadaljevanju avtor omenja, da v procesu obdelave kovin, ki imajo kristalno strukturo in so praktično homogene in izotropne, delita Blum in Inasaki celotno deformacijsko območje na:

- primarno (poteka poševno od rezalnega roba do površine obdelovanca),
- sekundarno (leži na stičnem območju rezila in odrezka),
- terciarno deformacijsko območje (pod rezalnim robom rezila in hipotetično rezalno ravnino).

Bučar (1991) omenja Wuja in Matsumota, ki v svoji študiji navajata podobno razdelitev deformacijskega območja. Na osnovi svojih raziskav trdita, da nastopa v osrednjem delu lokaliziranega deformacijskega območja plastična deformacija, v perifernem delu, ki je obsežnejši, pa elasto-plastična deformacija. Wu v svojih študijah tudi navaja, da je pri odrezavanju kovin deformacijsko stanje v lokalnem območju odvisno od mejnih kinematičnih razmer, ki vsebujejo:

- parametre, ki določajo količino materiala, ki prehaja v deformacijsko območje (snovni fluks), ki je odvisno od rezalne hitrosti in debeline odrezka,
- parametre, ki vplivajo na torne razmere v stičnih ravninah odrezka in rezila,
- parametre, ki vplivajo na torne razmere med obdelovancem in rezilom.

Omenjeni sistem mejnih kinematičnih razmer so različni strokovnjaki v svojih poskusih uporabljali tudi pri analizi deformacijskega stanja procesa odrezavanja lesnega tkiva in lesnih kompozitov. Tako je bilo na področju odrezavanja lesnega tkiva v preteklosti narejenih kar nekaj različnih modelov. Izdelali so jih Voskresenski (1955), Franz (1957), McMillin (1958), McKenzie (1960), Sitkei (1983). Glede na specifično zgradbo lesnega tkiva kot naravnega kompozita celuloze, polioz, lignina in akcesornih snovi so se omenjeni modeli nanašali na odrezavanje v treh glavnih smereh, in sicer $0^\circ - 90^\circ$, $90^\circ - 0^\circ$, $90^\circ - 90^\circ$.

Narejene so bile tudi druge študije oziroma raziskave na področju določanja vplivov mehanskih lastnosti in anizotropije lesnega tkiva na proces odrezavanja. V literaturi je tako mogoče zaslediti raziskave več strokovnjakov, kot so Kivimma (1952), McMillin (1958), McKenzie (1960), Stewart (1969), Sitkei (1983), Bučar (1990), Axelsson (1993).

2.3 MODEL ORTOGONALNEGA ODREZAVANJA

Pri skoraj vseh raziskavah je prikazano odrezavanje pri ortogonalnem procesu, saj dovolj dobro predstavlja dogajanje na glavnem rezalnem robu orodja. Dva, za analize najpogosteje uporabljeni načini ortogonalnega odrezavanja, sta pehanje in struženje. Predpostavke, na katerih sloni ta model so:

- orodje je idealno ostro,
- debelina odrezka je konstantna,
- obdelovanec se glede na orodje giblje z enakomerno hitrostjo,
- rezalni rob je ravna linija in je pravokoten na smer glavnega gibanja, ki je odločilno za tvorbo odrezka, poleg tega pa menimo, da je slika v vseh vzporednih ravninah enaka.

Medtem ko je princip ortogonalnega odrezavanja kovin v literaturi obsežno zastopan, je na področju obdelave lesa in lesnih kompozitov, kot je MDF, bilo izvedenih manj študij. Več avtorjev je v svojih študijah raziskovalo deformacijska stanja v lokaliziranem območju odrezavanja. Navajajo, da se lesno tkivo pri odrezavanju pri prehodu skozi deformacijsko območje deformira in poruši na več načinov, pri čemer je način porušitve pogojen z določenimi parametri:

- smer rezanja,
- usmeritve oziroma lege rezalnega roba,
- geometrija rezila in stanja rezalnega orodja,
- debelina odrezka.

Na osnovi tega Bučar (1991) v svoji študiji o ortogonalnem premočrtnem odrezavanju lesa kot naključnem stacionarnem procesu navaja, da v procesu odrezavanja lesnega tkiva nedvomno prihaja do tvorbe deformacijskega območja, katerega obliko in razsežnost je v večini primerov zelo težko določiti.

Pri odrezavanju lesnega tkiva je po avtorjevih trditvah porazdelitev napetosti v osrednjem in perifernem delu deformacijskega območja bolj zapletena, ker je les izrazito anizotropen material, s pogosto zelo spremenljivimi fizikalno-mehanskimi lastnostmi. Avtor je v svoji študiji raziskoval vplive:

- smeri rezanja,
- geometrije rezila,
- geometrije odrezka.

Avtor navaja kot vpliv debeline odrezka, da se z naraščajočo debelino odrezka povečujeta tudi obe komponenti rezalne sile, pri čemer so spremembe pri vzporedni komponenti večje.

Avtorji Dippon, Amara in Altintas (2000) v svoji raziskavi o mehaniki ortogonalnega odrezavanja MDF predstavljajo svojo študijo o povezavi med koeficientom rezalne sile v povezavi s cepilnim kotom, strukturno porazdelitvijo gostote materiala MDF po debelinskem preseku in pomikom. V svoji študiji navajajo, da je drsenje in trenje odrezka MDF in pritisk na cepilni ploskvi orodja v določeni korelaciji z normalno komponento rezalne sile. Pri tem navajajo tudi, da je trenje glavni parameter, ki deluje na rezalni rob orodja, povečanje pomika pa ima za posledico povečanje rezalne sile.

Lemaster (2002) v svoji študiji parametrov obrabe orodja pri obdelavi MDF navaja več vplivov na pojav temperature in obrabe rezalnega orodja, med katerimi omenja tudi učinek globine rezanja. Povečanje globine rezanja po navedbah avtorja vodi do povečane temperature in obrabe orodja.

2.4 TEMPERATURNE RAZMERE PRI ODREZAVANJU

Toplota pri odrezovanju predstavlja enega od kritičnih dejavnikov. Njeno intenzivnost in porazdelitev v območju odrezavanja lesa in lesnih kompozitov, kot je MDF, je zaradi kompleksnosti odrezavanja težko napovedovati, saj na potek odrezavanja vpliva več dejavnikov. Orodje je pri nastajanju odrezka obremenjeno z različnimi silami. Posledica tega je toplota, ki segreva orodje in odrezek, v manjši meri pa tudi obdelovanec.

Toplotni tokovi, ki se pojavijo pri odrezovanju lesa in lesnih kompozitov se razvijejo kot posledica tornih razmer med odrezkom, obdelovancem in rezilom. Drugi vir toplotnih tokov, ki nastajajo kot posledica notranjega trenja v deformirajočem se materialu, je praktično zanemarljiv.

Segrevanje odrezka v procesu odrezovanja lesa in lesnih kompozitov ne predstavlja posebnih težav, prav tako pa ni problematično segrevanje obdelovanca. Največji problem predstavlja segrevanje orodja. Orodja različnih materialov imajo različno temperaturno odpornost, kar pomeni, da pri prekoračitvi določene temperature pada njihova trdota do takšne mere, da se jim zmanjša rezalna sposobnost.

Reid, Stewart in Rapp (1991) v svojih študijah o reakcijah orodja pri visokih temperaturah navajajo, da ima temperaturna degradacija lesa za posledico razkroj štirih elementov, ki lahko vplivajo na obrabo orodja:

- nezgostljivi plini (ogljikov monoksid, ogljikov dioksid, vodik, metan),
- elementi lesnega izvora (zgostljivi elementi razpada lignina, ki vsebuje več kot 50 % vlage)
- smola (brez vlage, kondenzacijska),
- oglje.

Avtorji navajajo, da plini nastajajo pri temperaturah med 200 °C in 450 °C, največjo prostornino pa dosežejo pri 350 °C do 400 °C. Največji odstotek razkroja elementov lesnega izvora nastaja pri 250°C do 300°C, smola pa se pojavi pri 300 °C do 450 °C. Po navedbah drugih avtorjev je bilo pri njihovih študijah destruktivne destilacije lesa najdenih več kot 123 različnih sestavin, nekatere med njimi pa so rezultat sekundarnih reakcij.

Obdelovanje MDF lahko privede do razkroja več elementov, ki lahko neugodno vplivajo na obrabo orodja, saj MDF vsebuje poleg lesa tudi vezivo, kot so urea-formaldehidna smola, katalizator, vosek, utrjevalec ter druge aditive.

Stewart (1989) je v svoji študiji opazoval vidne pojave visoke temperature pri obrabi orodja pri obdelavi MDF. V njej navaja, da sta pojav visoke temperature in oksidacija pri odrezavanju lesa glavna in največja dejavnika obrabe orodja. Opazil je velik vpliv teh dveh dejavnikov v rezalnem območju in rezalnem robu orodja. Ti dejavniki so opazni tudi pri obdelavi trdega masivnega lesa, kjer obdelavo spremljata visoka temperatura in tlak. Analize so pokazale, da temperature na konici orodja lahko dosegajo tudi 800 °C, pri tem pa obstajajo pogoji za številne spremenljive parametre, kot so:

- sestava orodja in obdelovanca,
- mikrostruktura in geometrija orodja ter obdelovanca,
- atmosferski in temperaturni pogoji,
- korozivni pogoji.

Reid et. al., Stewart in Rapp (1991) so v svojih raziskavah o tako imenovani kemični degradaciji orodij iz karbidnih trdin pri obdelavi MDF ugotovili, da korozivna obraba orodij poteka v dveh fazah. Prva faza degradacije se zgodi pri nizkih temperaturah, v zgodnji fazi obdelave, raziskave pa so izvedli pri 325 °C.

Analize so pokazale velike koncentracije žvepla in kobalta na površini obrabljenega vzorca, kjer je bilo opaziti oslabljene vezi zaradi reakcije z MDF. Raziskovalci navajajo te reakcije kot vzrok, da manj reaktivne granule karbidne trdine izpadajo zaradi mehanske obrabe. Druga faza obrabe se pojavi pri visokih temperaturah, ko se orodje segreva v dolgih, neprekinjenih rezih. Pri tem sestavni elementi MDF hlapijo, degradacija orodja pa se nadaljuje z oksidacijo. Avtorji so oksidacijo orodja spremljali pri 650 °C in 850 °C, oksidacijski testi pa so bili izvedeni izotermno. Kinetika je pokazala bistveno odvisnost pojava oksidacije od temperature obdelave.

Japonska raziskovalca Hayashi in Ito (1988) sta v svojih raziskavah prišla do spoznanja, naj bi bila oblika obrabljenega rezalnega orodja odvisna od rezalne hitrosti in pri tem nastale temperature. Avtorja navajata, da sta med odrezavanjem iverne plošče v področju rezanja izmerila različne temperature v odvisnosti od rezalne hitrosti. Pri rezalni hitrosti 45,2 m/s sta izmerila temperaturo 310 °C, pri rezalni hitrosti 22,6 m/s pa 200 °C.

Na osnovi svojih raziskav trdita, da je temperatura v območju obdelave v tesni povezavi z določeno rezalno hitrostjo, oziroma, da se z večjo rezalno hitrostjo veča tudi temperatura in s tem posledično tudi obraba orodja. Avtorja navajata tudi podatek, naj bi za masivni les veljalo, da je pojav večje temperature in s tem obrabe pri višji rezalni hitrosti znatno manjši, kot pri nizki, kar pa za MDF ne velja.

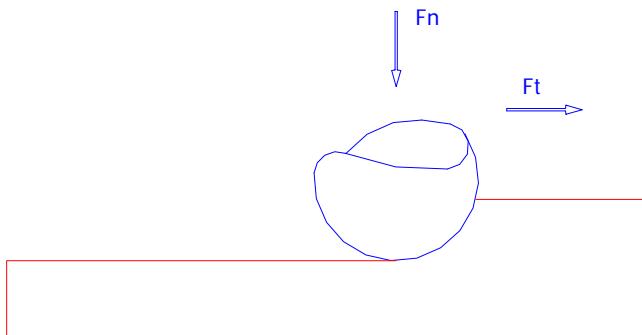
2.5 TRENJE IN TEORIJA PLUŽNEGA EFEKTA

Trenje lahko definiramo kot drsni upor ene površine preko druge. Pri tem se na mestu dotika pojavlja normalna sila F_n in tangencialna sila F_t , ki sta usmerjeni tako, da zavirata medsebojno gibanje. Sili nista odvisni od velikosti stične površine oziroma njenih oblik, temveč sta odvisni od medsebojnega razmerja in koeficiente trenja μ :

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad \dots (1)$$

Ta izraz oziroma enačba velja, če telesi med seboj drsita, sila trenja pa se lahko pojavlja tudi, ko relativno gibanje oziroma drsenje ploskev med ploskvama ni prisotno. Tedaj govorimo o statičnem trenju. Trenje predstavlja določen upor, zato je za premagovanje trenja potrebno vložiti določeno energijo. Pri odrezavanju materialov to pomeni določen strošek, ki ga želimo zmanjšati. Najpogosteje pri tem uporabljamo različna mazivna sredstva, v primeru odrezavanja lesa in lesnih kompozitov pa smo prisiljeni k izboljševanju orodnih materialov. Pojav trenja razлага več teorij, med katerimi je teorija plužnega efekta, ki jo srečujemo tudi pri odrezavanju.

Stare (2004) v svoji diplomski nalogi omenja Bowden-Tabor teorijo plužnega efekta. Avtor plužni efekt omenja kot silo trenja, ki je sestavljena iz dveh neodvisnih komponent adhezije in plužnega efekta. Model plužnega efekta pojasnjuje na primeru polkrogla, ki je postavljen na podlago, nanjo pa delujemo z določeno silo F_n (slika 1). Sila F_n je tako velika, da podlaga pod polkroglo popusti, posledica tega pa je povečanje stične ploskve med polkroglo in podlago.



Slika 1: Prikaz plužnega efekta

Na polkroglo istočasno delujemo s tangencialno silo F_t , s katero jo pričnemo premikati v trenutku, ko je sila večja od adhezijskih sil med polkroglo in podlago. Med horizontalnim premikanjem polkrogla odriva material, pred njo pa se ustvarja material, ki ga tangencialna sila mora premagovati za vzdrževanje prečnega gibanja.

Pri tem moramo poznati še elastičnost materiala δ_e , ki ga odrivamo in površino polkrogla, ki odriva material. Označimo jo z A_p . Z upoštevanjem omenjenih parametrov lahko zapišemo novo enačbo strižne sile med polkroglo in podlago:

$$S_t = \tau \cdot A_p \quad \dots (2)$$

Prerez površine polkrogla, ki je v stiku s podlago, lahko zapišemo z enačbo:

$$A_p = \frac{d^3}{12 \cdot r} \quad \dots (3)$$

Na osnovi tega lahko zapišemo še enačbo za plužni efekt kot produkt med aktivno površino polkrogla in elastičnostjo materiala:

$$P_e = A \cdot \delta_e = \left(\frac{d^3}{12 \cdot r} \right) \cdot \delta_e \quad \dots (4)$$

Če v enačbo za tangencialno silo vstavimo novi enačbi za plužni efekt in strižno napetost, dobimo enačbo:

$$F_t = A_p \cdot (\tau + \delta_e) = \left(\frac{d^3}{12 \cdot r} \right) \cdot (\tau \cdot \delta_e) \quad \dots (5)$$

Iz enačbe je razvidno, da je zelo pomemben parameter premer polkrogla d , ki neposredno vpliva na aktivno površino njenega preseka. Premer polkrogla se tako povečuje z globino vdora polkrogla v podlago. Plužni efekt se bo povečal pri mehkejšem materialu, pri tem pa je res, da je manjši tudi δ_e . Ko enakomerno povečujemo hitrost prečnega gibanja, se površina materiala pred polkroglo povečuje, s tem pa se povečuje tudi odpor.

2.6 GEOMETRIJSKI PARAMETRI ODREZAVANJA IN SILE PRI ODREZAVANJU

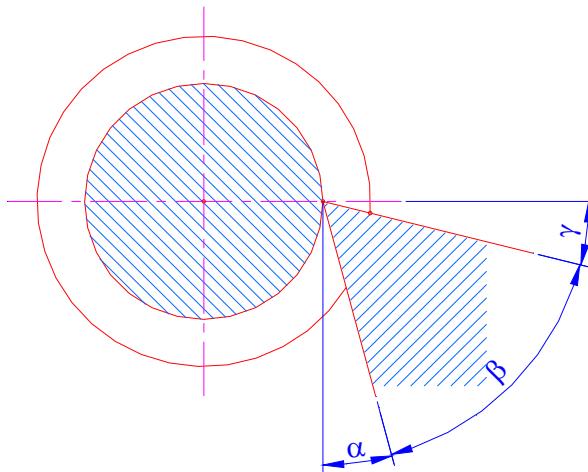
MDF kot lesni kompozit zahteva pri odrezavanju zaradi svoje specifične anatomske zgradbe posebno pozornost. Pri obdelavi MDF krha rezilo hitreje od masivnega lesa in ostalih tvoriv. Pri nastanku in ločevanju odrezka se pojavi odpor, ki ga predstavljajo:

- trdnost lesnega tkiva,
- sila, potrebna za deformacijo odrezka,
- sila trenja med odrezkom in rezilom,
- sila trenja med obdelovalno ravnino in rezilom,
- sila, potrebna za izmet odrezka.

Pri delovanju naštetih sil, ki se pojavljajo v ozkem območju odrezavanja, se pojavljajo visoke temperature. Pri tem imajo svoj vpliv tudi geometrijske značilnosti orodja (slika 2) oziroma rezila, ki so definirane z naslednjimi parametri:

- hrbtni kot α ,
- ostrinski kot oziroma kot klina β ,
- prsni kot γ ,
- bočni prosti kot ε ,
- radij zaobljenosti ρ .

Geometrijske značilnosti orodja oziroma rezila predstavljajo enega od pomembnih vplivov na ločevanje obdelovanega materiala, saj je nastajanje posledica relativnega gibanja med orodjem in obdelovancem. V odrezek prehaja večji del masnega toka materiala, ki se med prehodom skozi deformacijsko območje plastično deformira. Odrezek drsi po prsnici strani rezila in povzroča abrazivno obrabo. Ker ima rezalni rob določeno stopnjo zaobljenosti, steče manjši del masnega toka materiala tudi pod rezilo. Ta del materiala se plastično deformira, pojavi pa se tudi elastična deformacija. V tem območju se pojavi povečano trenje med rezilnim robom in materialom, kar povzroča abrazivno obrabo rezila. Na hrbtni ploskvi in rezalnem robu prihaja do močnega segrevanja.



Slika 2: Prikaz geometrijskih kotov rezila pri procesu obdelave

Iz mnogih študij in raziskav je bilo možno razbrati, da predstavlja geometrija orodja oziroma rezila enega od pomembnih parametrov, ki vplivajo na proces obdelave.

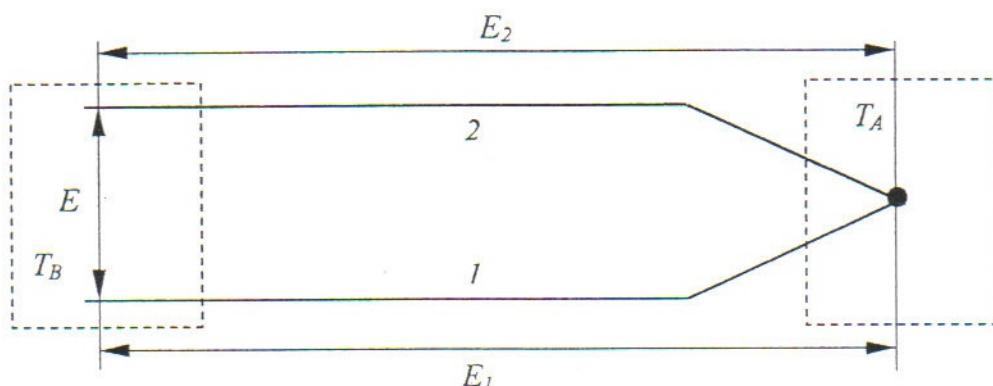
Hrbtni kot α vpliva na normalno komponento rezalne sile, v procesu odrezavanja pa nima aktivne vloge. Hrbtni kot α mora biti vedno večji od nič, da je rezanje sploh mogoče, kljub temu pa ne sme biti prevelik, ker tako zmanjša mehansko trdnost rezila. Pri prevelikem prostem kotu je oteženo tudi odvajanje toplotne. Prsni kot γ neposredno vpliva na nastanek odrezka lahko pa ima negativne in pozitivne vrednosti. Pri tem velja, da uporabljamo rezalno orodje z večjim prsnim kotom γ pri mehkejših materialih obdelovanca, oziroma pri materialih z manjšo trdnostjo.

Spreminjanje prsnega kota γ ima za posledico tudi spremembo rezalne sile, s tem pa tudi vpliv na obrabo orodja. Stewart (1988) je v svojih študijah pri obdelavi MDF-plošč raziskoval vpliv različnih kotov na gibanje sil pri procesu odrezavanja. Avtor v svoji študiji navaja, da s povečanjem prsnega kota γ vplivamo na zmanjševanje paralelne komponente, podoben trend pa kaže tudi normalna komponenta sile. Glede na rezultate študije je avtor ugotovil, da je najprimernejši cepilni kot med 10° in 30° , z vsakim povečanjem kota pa bi pomenilo večje trenje in posledično večje temperature v območju odrezavanja.

Japonski raziskovalci Hayashi, Oono in Ito (1986) so v svoji študiji o gibanju topote v območju odrezavanja merili temperaturo ter ugotovili, da je obrabni mehanizem pri obdelavi v območju višjih temperatur drugačen kot pri nižjih temperaturah, odvisen pa je od različnih hitrosti odrezavanja in vrste materiala orodja. V neki drugi študiji na bi bila po navedbah avtorjev Hayashija in Ita (1988) oblika obrabljenega rezalnega roba odvisna od podajalne hitrosti in temperature v območju odrezavanja.

2.7 MERJENJE TEMPERATUR PRI ODREZAVANJU

Merjenje temperatur pri odrezovanju pomeni z vidika raziskav eno od pomembnih področij za določanje obstojnosti rezalnega orodja. Od začetka sistemskega raziskovanja na področju obdelave z odrezovanjem pa do danes se je razvilo več metod za določanje temperature pri odrezovanju: eksperimentalne, pa tudi računske. Uporabljajo se različni merilniki temperatur oziroma merilni sistemi. Zaradi velikega pomena, ki ga ima poznavanje temperatur na kontaktni površini orodje-odrezek, so se uveljavile tudi metode z uporabo termočlena. Ti delujejo na principu Seebeckovega efekta, ki ga uporabljamo za posredno merjenje temperature odrezavanja. Princip delovanja termočlenov lahko pojasnimo z modelom različnih vodnikov, ki sta sklenjena na enem mestu (slika 3). Vodnika morata biti iz različnih elektronskih gostot (preglednica 1). Na mestu stika se pri segrevanju pojavi selitev elektronov iz elektronsko bogatejšega območja v elektronsko revnejše območje, kar ima za posledico nastanek termonapetosti.



Slika 3. Princip delovanja termočlena

V splošnem se na prostem koncu teh dveh vodnikov pojavi električni potencial, ki je odvisen od temperatur T_a in T_b .

Na osnovi tega lahko električni potencial izrazimo kot:

$$E = E_1 - E_2 \quad \dots (6)$$

$$E = \int_{T_b}^{T_a} \alpha_1(T) dT - \int_{T_a}^{T_b} \alpha_2(T) dT = \int (\alpha_1(T) - \alpha_2(T)) dT \quad \dots (7)$$

Pri tem predstavlja α_1 in α_2 Seebeckova koeficienta za uporabljenia materiala. Ko vodnika povežemo z zunanjim tokokrogom tako, da steče tok, se pojavi sprememb električnega potenciala. Ta efekt imenujemo Peltierov efekt. Če sta po dolžini vodnika še naprej izpostavljena določenim temperaturnim nihanjem oziroma gradientu, se lahko sprememb električnega potenciala ponovi. Ta efekt imenujemo Thomsonov efekt. Na osnovi tega lahko zaključimo, da so v termoelektričnem tokokrogu prisotne tri elektromotorne sile:

- Siebeckova, ki je posledica stika dveh različnih kovinskih materialov,
- Peltierova, ki je posledica pretoka električnega toka v termoelektričnem tokokrogu,
- Thomsonova, ki je posledica temperaturnih sprememb oziroma nihanj vzdolž vodnikov.

Preglednica 1 prikazuje kombinacije vodnikov, ki se uporabljajo za standardne termočlene.

Preglednica 1: Kombinacija vodnikov standardnih termočlenov

| Kombinacija vodnikov | Tip termočlena |
|--|----------------|
| Kromel ($\text{Cr}_{10}\text{Ni}_{90}$) – Konstantan ($\text{Cu}_{60}\text{Ni}_{40}$) | E |
| Železo (Fe) – Konstantan ($\text{Cu}_{60}\text{Ni}_{40}$) | J |
| Baker (Cu) - Konstantan ($\text{Cu}_{60}\text{Ni}_{40}$) | T |
| Kromel ($\text{Cr}_{10}\text{Ni}_{90}$) – Alumel ($\text{Al}_2\text{Ni}_{94}\text{Si}_1\text{Mn}_3$) | K |
| Platina (Pt) – Platina rodij ($\text{Pt} + 13\% \text{ Rh}$) | R |
| Platina (Pt) – Platina rodij ($\text{Pt} + 10\% \text{ Rh}$) | S |

Meritve temperature s termočleni lahko uporabljamo za merjenje temperatur v zelo širokem območju, metoda pa ima v primerjavi z ostalimi načini merjenj in prevorniki temperature mnoge prednosti:

- termoelement je preproste konstrukcije in je cenovno ugoden,
- ima sposobnost točkovnega zaznavanja temperaturnih sprememb,
- ima izrazito hitro odzivnost,
- izvedba meritev je enostavna, saj je v stružni nož potrebno izvrati samo majhno luknjo za vgradnjo termočlena,
- temperaturo lahko merimo v poljubni točki,
- metoda je ekonomična, ker se lahko z enim termoelementom izvede veliko število eksperimentov.

2.8 STRUŽENJE

Struženje je postopek obdelave z odrezavanjem, ki se v praksi zelo pogosto uporablja. Pri struženju je glavno gibanje vrtilno, vedno pa ga opravlja glavno vreteno z obdelovancem. Podajalno gibanje ima lahko različne smeri proti osi obdelovanca, opravlja pa ga orodje. Poznamo več načinov struženja:

- vzdolžno struženje, kjer je podajalno gibanje orodja vzporedno z osjo obdelovanca,
- prečno struženje, kjer je podajalno gibanje orodja pravokotno na os obdelovanca.

Hitrost odrezavanja oziroma struženja v lesarstvu se giblje od 5 do 7 m/s za trdi les in od 8 do 15 m/s za mehki les. Glede na radij struženja se vrtilna hitrost giblje med 150 in 1800 min^{-1} . Prosti kot noža $\alpha = 12 - 15^\circ$, kot klina $\beta = 50 - 60^\circ$ za trdi les in $\beta = 30^\circ$ za mehki les. Običajne moči stružnic za les so 1 in 5 kW.

Suport je ponavadi gnan s pomočjo hidravličnega pogona. Pri načrtovanju procesa odrezavanja se moramo najprej odločiti za ustrezeno vrsto odrezavanja in izbrati ustrezeno orodje. Naslednji smiseln korak je izbira delovnih pogojev oziroma delovni režim, za kar moramo vsaj približno poznati velikosti rezalnih sil. Pri vseh enoreznih postopkih ima rezultirajoča rezalna sila neko splošno smer v prostoru, zato z njo ni mogoče neposredno računati. Glede na to razstavljamo rezultirajočo rezalno silo na tri komponente:

- glavna sila F_c , ki ima smer glavnega gibanja in s tem smer rezalne hitrosti v_c ,
- odrivna sila F_p , ki je pravokotna na obdelovalno ploskev obdelovanca, njena smer pa se največkrat ujema s smerjo držala rezalnega orodja, če orodje ni vpeto pod določenim kotom,
- podajalna sila F_f , ki ima smer podajalnega gibanja in je pravokotna na glavno silo F_c in odrivno silo F_p

Razstavljanje rezultirajoče sile na naštete komponente je najbolj uporabno in utemeljeno pri vzdolžnem in prečnem struženju. Koordinatni sistem za razstavljanje rezultirajoče rezalne sile lahko izbiramo na štiri načine, in sicer glede na:

- obdelovalno površino obdelovanca,
- smeri gibanja podajalnih elementov oziroma sani in prečnega suporta,
- držalo rezalnega orodja, ki je lahko vpeto tudi pod določenim kotom,
- rezalni rob rezalnega orodja.

Vsak izbran način koordinatnega sistema uporabljamo za določene izračune komponent rezultirajoče rezalne sile. Izbor koordinatnega sistema glede na obdelovalno površino obdelovanca izberemo takrat, ko želimo izračunati sile iz podatkov, ki veljajo za vzdolžno struženje. Drugi način izbere koordinatnega sistema (glede na smer gibanja podajalnih elementov) uporabljamo takrat, ko želimo izračunati obremenjenost podajalnih elementov oziroma sile, ki se pojavljajo v le teh. Lažjo določitev geometrijskih kotov rezalnega orodja nam omogočajo koordinatne ravnine oziroma prostorski koordinatni sistem, ki ga določajo tri med seboj pravokotne si ravnine. Pri tem moramo izbrati sistem, po katerem bomo določali geometrijske kote.

Izbiramo lahko med dvema sistemoma. Prva možnost je določitev geometrijskih kotov na osnovi lege sistema v smeri orodja in njegovih geometrijskih značilnostih. Pri orodju za struženje se tako sistem ravna po držalu in glavnem rezalnem robu, pri vrtečih se orodjih pa po osi. Omenjeni sistem definiranja geometrije rezalnega orodja uporabljam predvsem za delavniške načrte orodij in kontrolo ostrenja, zanj pa se odločamo predvsem, ko imamo opravka z orodjem in še ne poznamo vseh parametrov procesa obdelave.

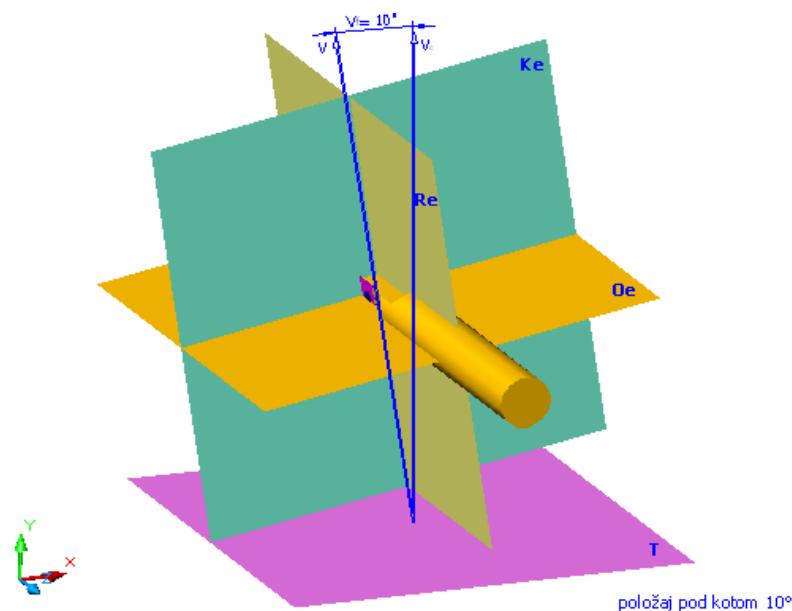
V tem sistemu označujemo določene rezalne kote kot geometrijske kote orodja, ki jih določajo naslednje ravnine:

- temeljna ravnina (T), na katero je s svojim držalom položeno rezalno orodje,
- osnovna ravnina (O), ki je skozi izbrano točko rezalnega roba vzporedna temeljni ravnini (T),
- ravnina rezanja (R), ki je položena skozi glavni rezalni rob in je pravokotna na osnovno ravnino (O) in temeljno ravnino (T),
- ravnina klina (K), ki je položena skozi izbrano točko rezalnega roba in je pravokotna na ostale tri ravnine.

Presečišče ravnine rezanja (R) in ravnine klina (K) je opredeljena kot smer glavnega gibanja obdelave (slika 4). Pri odrezavanju oziroma obdelavi z orodjem imamo v dinamičnem obdelovalnem procesu zraven glavnega gibanja z rezalno hitrostjo v_c opravka tudi s podajalnim gibanjem oziroma s podajalno hitrostjo v_f . Pri tem nas zanimajo predvsem razmere in stanje sistema v določeni točki, zato uporabimo drugo metodo za določitev geometrije orodja, kjer se koordinatni sistem ravna po dinamiki orodja proti obdelovancu. V novem koordinatnem sistemu uporabljam kot osnovo za določitev geometrije orodja vektorsko vsoto obeh gibanj, ki jo označujemo kot delovno gibanje oziroma vektorsko vsoto hitrosti v_c in v_f in jo imenujemo delovna hitrost v_e . Novo definirani koordinatni sistem imenujemo delovni koordinatni sistem, ki ga določajo naslednje ravnine:

- temeljna ravnina (T), na katero je s svojim držalom položeno rezalno orodje, njena lega je glede na geometrijski koordinatni sistem ostala nespremenjena,
- osnovna delovna ravnina (O_e), ki je položena skozi izbrano točko rezalnega roba in je pravokotna na smer delovne hitrosti v_e ,
- delovna ravnina rezanja (R_e), ki je položena skozi glavni rezalni rob in je nanj tangencialna, ujema pa se s smerjo delovne hitrosti v_e ,
- delovna ravnina klina (K_e), ki se ujema s smerjo delovne hitrosti v_e in je pravokotna na delovno ravnino rezanja (R_e).

Podobno kot so vse novo nastale ravnine označene kot delovne, so tudi rezalni koti rezalnega orodja, ki jih določa delovni koordinatni sistem imenovan delovni rezalni koti. Ko primerjamo geometrijski in delovni koordinatni sistem, opazimo, da se delovni koordinatni sistem razlikuje od geometrijskega po naklonu oziroma naklonskem kotu η . Ker je v večini praktičnih primerov podajalna hitrost v_f v primerjavi z rezalno hitrostjo v_c mnogo manjša, je kot η , ki ga oklepata delovna hitrost v_e z rezalno hitrostjo v_c , prav tako zelo majhen in ga lahko v teh primerih zanemarimo ter predpostavimo, da so delovni koti enaki geometrijskim.



Slika 4: Prikaz geometrijskih ravnin obdelovalnega sistema

Prerez odrezka pri vzdolžnem struženju je trapez s širino b , višino h in enim zaokroženim vogalom. Matematični izračun lika ni problematičen, vendar je za praktičen primer enačba neprimerna oziroma prezahtevna. Zato matematično formulacijo preseka odrezka ponavadi poenostavimo v obliko paralelograma z osnovnico b in višino h :

$$A = b \cdot h \quad [mm^2] \quad \dots (8)$$

2.9 KARBIDNE TRDINE

Karbidne trdine so trdine, ki so po svoji uporabi najbolj razširjene in v nekaterih predelovalnih panogah še vedno nenadomestljive. Največ, približno 50 % se jih uporablja za orodja za odrezovanje. Poleg tega uporabljamo karbidne trdine še v tehniki preoblikovanja, v rudarstvu, geologiji itd. Zrnati del je sestavljen iz več vrst karbidov, med njimi pa so najpogosteji:

- volframov karbid (WC),
- mešanica volframovega in titanovega karbida,
- mešanica volframovega, titanovega in tantalovega karbida,
- titanov karbid.

Zaradi izredno velikega števila vrst karbidnih trdin so se pojavile težave predvsem pri standardizaciji, saj prav zaradi raznovrstnosti le-teh ni mogoče predpisati standardne kemijske sestave. Na tržišču in v literaturi lahko najdemo različne tabele in razpredelnice s podatki, ki se več ali manj razlikujejo.

Najnovejši mednarodni standard ISO 513 iz leta 1991 predpisuje samo način označevanja osnovnih vrst in navaja njihovo uporabnost. Izvleček iz tega standarda prikazuje preglednica 2:

Preglednica 2: Izvleček iz standarda ISO 513 za karbidne trdine

| Simbol | Namen | Barva | Oznaka | Lastnosti |
|--------|--|--------|--|--|
| P | Železne zlitine z dolgimi odrezki | Modra | P01 P10 P20 P30 P40 P50 | rezalna hitrost ↑ podajanje ↓ |
| M | Železne zlitine z dolgimi ali kratkimi odrezki, neželezne kovine | Rumena | M10 M20 M30 M40 | odpornost proti obrabi ↑ žilavost ↓ |
| K | Železne zlitine s kratkimi odrezki, neželezne kovine, nekovine | Rdeča | K01 K10 K20 K30 K40 | odpornost proti obrabi ↑ žilavost ↓ |

V novejšem času je opazen precejšen napredok pri razvoju novih vrst karbidnih trdin, raziskave pa potekajo predvsem v izboljšavah njihovih fizikalnih lastnosti. Opažamo napredok pri izboljšanju trdnosti, trdote in odpornosti proti obrabi. Z nenehnim razvojem so dosegli tudi večjo žilavost, ki je posledica drobnejše zrnate strukture karbidov ob povečanem deležu kobalta. V novejšem času se pojavljajo tudi prevleke tako imenovane druge generacije, ki so večinoma večplastne, za prevleke pa se največkrat uporablja volframov karbid. Večina teh materialov ima močno povečano trdoto, precej neraziskana pa je njihova toplotna obstojnost.

2.10 VLAKNENE PLOŠČE SREDNJE GOSTOTE – MDF KOT MATERIAL ZA ODREZOVANJE

Vlaknene plošče srednje gostote (MDF) imajo zelo homogeno zgradbo, zato imajo dobre fizikalne in mehanske lastnosti. Dimenzijsko so stabilne, njihova natezna in upogibna trdnost pa je velika. Prav tako so dobre njihove obdelovalne lastnosti, saj spadajo med najbolj homogene materiale v lesnoobdelovalni industriji. Pri mehanski obdelavi se robovi ne krušijo ter pri uporabi primerenega orodja in delovnega režima ostanejo čisti in gladki. MDF se dobro stružijo, rezbarijo in oblikujejo ter so nasploh edine lesne plošče, ki jih je možno strojno obdelovati in površinsko oplemenititi na enak način kot masivni les. Pri odrezovanju kljub dobrim obdelovalnim lastnostim povzročajo veliko obrabo rezil.

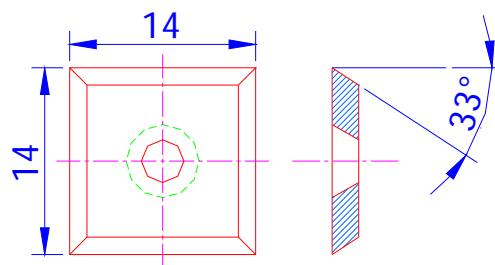
Za proizvodnjo vlaknenih plošč uporabljamo les ali druge lignocelulozne snovi, vezivna sredstva in različne dodatke. V MDF-u naj ne bi bilo tujkov s popolnoma drugačnimi mehanskimi lastnostmi od osnovnega materiala. Kot vezivo v proizvodnji vlaknenih plošč dodajamo formaldehidna lepila v količinah od 8 do 15 %. Uporabljamo predvsem fenol-formaldehidno ali urea-formaldehidno lepilo.

3 MATERIALI IN METODE

Za eksperiment smo uporabili rezalno orodje iz karbidne trdine K05, odrezavanje pa smo izvajali na lepljenih valjih iz segmentov MDF-plošč slovenskega proizvajalca. Segmente smo zlepili v valje dimenzijs $\varnothing 110 \times 600$ mm, in sicer z konstrukcijskim PVA-lepilom, ki se uporablja v lesarstvu. Pri poskusu smo z termometrom tipa E merili temperaturo rezalnega orodja v odvisnosti od rezalne hitrosti in hitrostjo pomika oziroma spremembo geometrije odrezka. Termočlen smo namestili 0.9 mm od zgornjega roba in 1.4 mm od stranskega roba stružnega noža.

3.1 VRSTA REZALNEGA ORODJA IN GEOMETRIJA ORODJA

V eksperimentu smo uporabili orodje z rezilom izdelanim iz sintranih karbidnih trdin vrste K05, ki se običajno uporablja pri obdelavi MDF-a. Ploščica iz karbidne trdine je bila dimenzijs 14×14 mm in debeline 2 mm (slika 5).



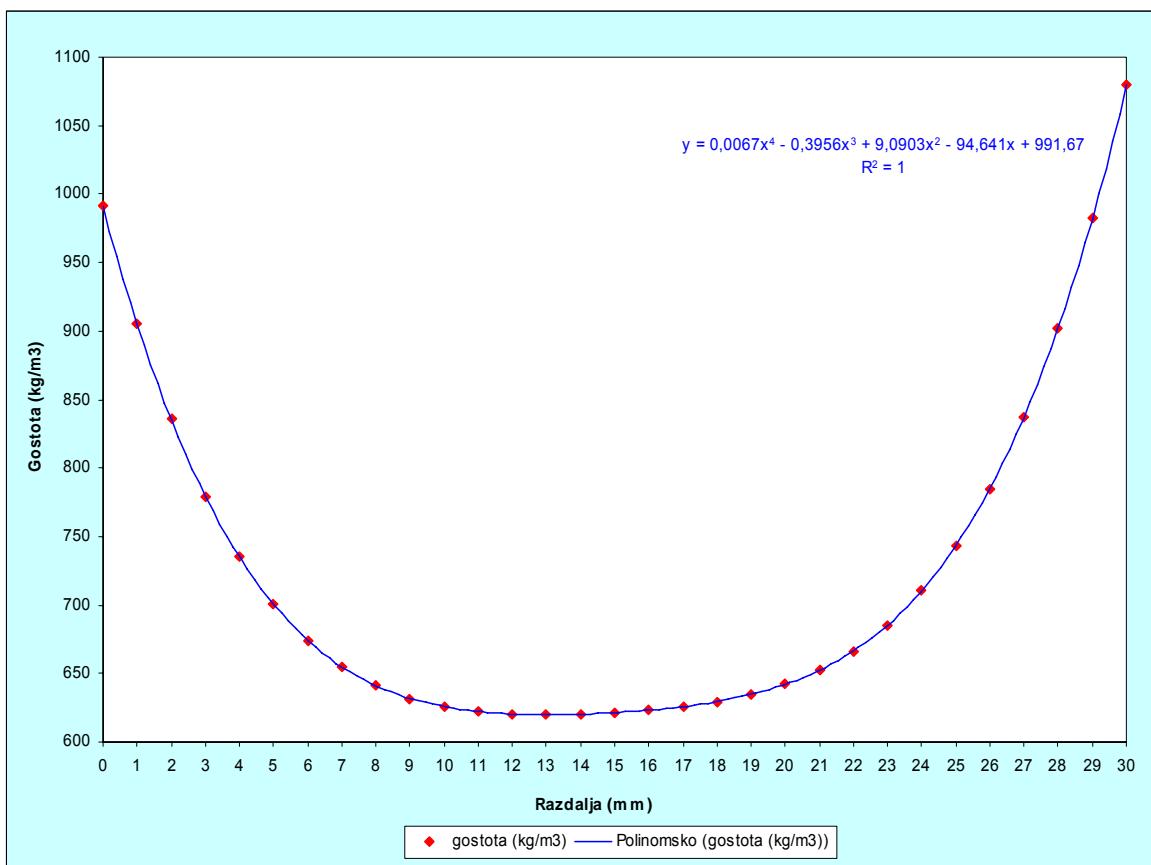
Slika 5: Dimenziije rezalne ploščice

3.2 VPENJANJE STRUŽNEGA NOŽA IN REZALNE PLOŠČICE

Eksperiment smo izvedli na stružnici Centauro TC 1200. V njeni vpenjalni napravo smo viačno vpeli stružni nož z rezalno ploščico. Vpenjanje smo izvedli tako, da je bil stružni nož zamknjen pod kotom 10° . Stružno ploščico smo viačno vpeli v ležišče telesa stružnega noža.

3.3 DOLOČITEV GOSTOTNEGA PROFILA

Ugotavljanje gostotnega profila MDF-plošče smo izvedli z gravimetrično metodo s postopnim odvzemanjem materiala. Po obdelavi rezultatov smo določili gostotni profil materiala (slika 6).



Slika 6: Gostotni profil MDF plošče

3.4 METODA MERJENJA TEMPERATURE

Za merjenje temperature smo uporabili termočlen tipa E, ki smo ga namestili pod rezalno ploščico, oziroma med rezalno ploščico in telesom stružnega noža. Pod termočlen smo nanesli tanek sloj prevodne paste, da smo povečali topotno prevodnost med rezalno ploščico in termočlenom. Termočlen smo namestili 0.9 mm od zgornjega roba in 1.4 mm od stranskega roba stružnega noža.

Meritve smo zajemali z osebnim računalnikom, ki je imel vgrajeno merilno kartico proizvajalca National Instruments PCI-6014. Pridobljene podatke smo obdelovali s programom istega proizvajalca, LabView, istočasno pa smo zajemali tudi podajalno hitrost.

3.5 DOLOČITEV IN IZRAČUN PARAMETROV ODREZAVANJA

Izvedbo poskusa smo hoteli kar najbolj približati realnim pogojem pri obdelavi MDF-a v praksi oziroma običajnim pogojem v proizvodnji. Struženje obdelovancev je potekalo vzdolžno, pri tem pa smo na vsakem obdelovancu izvedli sedem meritov. Parametri odrezavanja so bili določeni glede na debelino odrezka, oziroma glede na spremenjanje hitrosti pomika.

3.5.1 Določitev in izračun odrezovalnih parametrov pri obdelovancu štev. 1

3.5.1.1 Določitev znanih parametrov

| | |
|----------------|------------------------|
| n | 1200 min ⁻¹ |
| f _m | 428,69 |
| f _p | 61 Hz |
| U | 2,8 |
| e _m | 0,1 mm |
| a | 2 mm |
| d ₁ | 108,00mm |
| d ₂ | 104,00 mm |
| d ₃ | 100,30 mm |
| d ₄ | 96,30 mm |
| d ₅ | 88,20 mm |
| d ₆ | 84,39 mm |
| d ₇ | 80,30 mm |

3.5.1.2 Izračun dejanskega števila vrtljajev (n)

$$n = U \cdot f_m = 2,8 \cdot 428,69 = 1200,33 \text{ min}^{-1} = 20,01 \text{ s}^{-1}$$

3.5.1.3 Izračun hitrosti pomika (v_p)

$$v_p = \frac{e_m \cdot n}{1000} = \frac{0,1 \text{ mm} \cdot 1200,33 \text{ min}^{-1}}{1000} = 0,12 \text{ m/min}$$

3.5.1.4 Izračun povprečnih rezalnih hitrosti (v_r)

Rezalna hitrost (v_r) je eden pomembnejših parametrov odrezavanja, ki odreja kvaliteto obdelave oziroma površine obdelovanca. Določa tudi optimalno izkoriščenost orodja, podana pa je z enačbo:

$$v_r = \pi \cdot d_{sr} \cdot n = \pi \cdot \left(\frac{D + d}{n} \right) \cdot n \quad [\text{m/s}] \quad \dots (9)$$

D začetni premer obdelovanca pred meritvijo [m]

d končni premer obdelovanca po meritvi [m]

n vrtilna hitrost obdelovanca [s⁻¹]

Pri eksperimentiranju smo po vsaki končani meritvi izmerili premer obdelovanca ter na osnovi pridobljenih podatkov izračunali dejansko rezalno hitrost, ki je odvisna od srednjega premora obdelovanca. Rezultate rezalnih hitrosti, ki smo jih analitično pridobili, prikazuje preglednica 3.

Preglednica 3: Prikaz izmerjenih in izračunanih parametrov pri obdelavi obdelovanca štev. 1

| Meritev | D (m) | d (m) | d _{sr} (m) | n (s ⁻¹) | v _r (m/s) |
|---------|--------|--------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 0,1080 | 0,1040 | 0,1060 | 20,01 | 6,66 |
| 2 | 0,1040 | 0,1003 | 0,1022 | 20,01 | 6,42 |
| 3 | 0,1003 | 0,0963 | 0,0983 | 20,01 | 6,18 |
| 4 | 0,0963 | 0,0882 | 0,0923 | 20,01 | 5,80 |
| 5 | 0,0882 | 0,0843 | 0,0863 | 20,01 | 5,42 |
| 6 | 0,0843 | 0,0803 | 0,0823 | 20,01 | 5,17 |
| 7 | 0,0803 | 0,0763 | 0,0783 | 20,01 | 4,92 |

3.5.2 Določitev in izračun odrezovalnih parametrov pri obdelovancu štev. 2

3.5.2.1 Določitev znanih parametrov

| | |
|-----------------|------------------------|
| n | 1200 min ⁻¹ |
| f _{em} | 428,69 |
| f _p | 61 Hz |
| U | 2,8 |
| e _m | 0,2 mm |
| a | 2 mm |
| d ₁ | 106,00mm |
| d ₂ | 102,10 mm |
| d ₃ | 98,00 mm |
| d ₄ | 94,10 mm |
| d ₅ | 90,00 mm |
| d ₆ | 86,00 mm |
| d ₇ | 82,00 mm |

3.5.2.2 Izračun dejanskega števila vrtljajev (n)

$$n = U \cdot f_m = 2,8 \cdot 428,69 = 1200,33 \text{ min}^{-1} = 20,01 \text{ s}^{-1}$$

3.5.2.3 Izračun hitrosti pomika (v_p)

$$v_p = \frac{e_m \cdot n}{1000} = \frac{0,2 \text{ mm} \cdot 1200,33 \text{ min}^{-1}}{1000} = 0,24 \text{ m/min}$$

3.5.2.4 Izračun povprečnih rezalnih hitrosti (v_r)

$$v_r = \pi \cdot d_{sr} \cdot n = \pi \cdot \left(\frac{D + d}{n} \right) \cdot n \quad [m/s]$$

- D začetni premer obdelovanca pred meritvijo [m]
d končni premer obdelovanca po meritvi [m]
n vrtilna hitrost obdelovanca [s^{-1}]

Pri eksperimentiranju smo po vsaki končani meritvi izmerili premer obdelovanca ter na osnovi pridobljenih podatkov izračunali dejansko rezalno hitrost, ki je odvisna od srednjega premera obdelovanca. Rezultate rezalnih hitrosti, ki smo jih analitično pridobili, prikazuje preglednica 4.

Preglednica 4: Prikaz izmerjenih in izračunanih parametrov pri obdelavi obdelovanca štev. 2

| Meritev | D (m) | d (m) | d _{sr} (m) | n (o/s) | v _r (m/s) |
|---------|--------|--------|---------------------|---------|----------------------|
| 1 | 0,1060 | 0,1021 | 0,10405 | 20,01 | 6,54 |
| 2 | 0,1021 | 0,0980 | 0,10005 | 20,01 | 6,29 |
| 3 | 0,0980 | 0,0941 | 0,09605 | 20,01 | 6,04 |
| 4 | 0,0941 | 0,0900 | 0,09205 | 20,01 | 5,79 |
| 5 | 0,0900 | 0,0860 | 0,08800 | 20,01 | 5,53 |
| 6 | 0,0860 | 0,0820 | 0,08400 | 20,01 | 5,28 |
| 7 | 0,0820 | 0,0779 | 0,07995 | 20,01 | 5,02 |

3.5.3 Določitev in izračun odrezovalnih parametrov pri obdelovancu štev. 3

3.5.3.1 Določitev znanih parametrov

- n 1200 min⁻¹
f_{em} 428,69
f_p 61 Hz
U 2,8
e_m 0,4 mm
a 2 mm
d₁ 110,00mm
d₂ 105,75 mm
d₃ 101,60 mm
d₄ 97,80 mm
d₅ 93,80 mm
d₆ 89,60 mm
d₇ 85,7 mm

3.5.3.2 Izračun dejanskega števila vrtljajev (n)

$$n = U \cdot f_m = 2,8 \cdot 428,69 = 1200,33 \text{ min}^{-1} = 20,01 \text{ s}^{-1}$$

3.5.3.3 Izračun hitrosti pomika (v_p)

$$v_p = \frac{e_m \cdot n}{1000} = \frac{0,4\text{mm} \cdot 1200,33\text{min}^{-1}}{1000} = 0,48\text{m/min}$$

3.5.3.4 Izračun povprečnih rezalnih hitrosti (v_r)

$$v_r = \pi \cdot d_{sr} \cdot n = \pi \cdot \left(\frac{D+d}{n} \right) \cdot n \quad [\text{m/s}]$$

- D začetni premer obdelovanca pred meritvijo [m]
 d končni premer obdelovanca po meritvi [m]
 n vrtilna hitrost obdelovanca [s^{-1}]

Pri eksperimentiranju smo po vsaki končani meritvi izmerili premer obdelovanca ter na osnovi pridobljenih podatkov izračunali dejansko rezalno hitrost, ki je odvisna od srednjega premera obdelovanca. Rezultate rezalnih hitrosti, ki smo jih analitično pridobili, prikazuje preglednica 5.

Preglednica 5: Prikaz izmerjenih in izračunanih parametrov pri obdelavi obdelovanca štev. 3

| Meritev | D (m) | d (m) | d_{sr} (m) | n (o/s) | v_r (m/s) |
|---------|---------|---------|--------------|-----------|-------------|
| 1 | 0,1100 | 0,1058 | 0,1079 | 20,01 | 6,78 |
| 2 | 0,1058 | 0,1016 | 0,1037 | 20,01 | 6,52 |
| 3 | 0,1016 | 0,0978 | 0,0997 | 20,01 | 6,27 |
| 4 | 0,0978 | 0,0938 | 0,0958 | 20,01 | 6,02 |
| 5 | 0,0938 | 0,0896 | 0,0917 | 20,01 | 5,76 |
| 6 | 0,0896 | 0,0857 | 0,0877 | 20,01 | 5,51 |
| 7 | 0,0857 | 0,0817 | 0,0837 | 20,01 | 5,26 |

3.5.4 Določitev in izračun odrezovalnih parametrov pri obdelovancu štev. 4

3.5.4.1 Določitev znanih parametrov

| | |
|----------|------------------------|
| n | 1200 min^{-1} |
| f_{em} | 428,69 |
| f_p | 61 Hz |
| U | 2,8 |
| e_m | 0,6 mm |
| a | 2 mm |
| d_1 | 110,00 mm |
| d_2 | 106,20 mm |
| d_3 | 102,20 mm |
| d_4 | 98,20 mm |
| d_5 | 94,20 mm |
| d_6 | 90,25 mm |
| d_7 | 86,30 mm |

3.5.4.1 Izračun dejanskega števila vrtljajev (n)

$$n = U \cdot f_m = 2,8 \cdot 428,69 = 1200,33 \text{ min}^{-1} = 20,01 \text{ s}^{-1}$$

3.5.4.2 Izračun hitrosti pomika (v_p)

$$v_p = \frac{e_m \cdot n}{1000} = \frac{0,6 \text{ mm} \cdot 1200,33 \text{ min}^{-1}}{1000} = 0,72 \text{ m/min}$$

3.5.4.3 Izračun povprečnih rezalnih hitrosti (v_r)

$$v_r = \pi \cdot d_{sr} \cdot n = \pi \cdot \left(\frac{D+d}{n} \right) \cdot n \quad [\text{m/s}]$$

- D začetni premer obdelovanca pred meritvijo [m]
 d končni premer obdelovanca po meritvi [m]
 n vrtilna hitrost obdelovanca [s^{-1}]

Pri eksperimentiranju smo po vsaki končani meritvi izmerili premer obdelovanca ter na osnovi pridobljenih podatkov izračunali dejansko rezalno hitrost, ki je odvisna od srednjega premora obdelovanca. Rezultate rezalnih hitrosti, ki smo jih analitično pridobili, prikazuje preglednica 6.

Preglednica 6: Prikaz izmerjenih in izračunanih parametrov pri obdelavi obdelovanca štev. 4

| Meritev | D (m) | d (m) | d_{sr} (m) | n (o/s) | v_r (m/s) |
|---------|---------|---------|--------------|-----------|-------------|
| 1 | 0,1100 | 0,1062 | 0,1081 | 20,01 | 6,79 |
| 2 | 0,1062 | 0,1022 | 0,1042 | 20,01 | 6,55 |
| 3 | 0,1022 | 0,0982 | 0,1002 | 20,01 | 6,30 |
| 4 | 0,0982 | 0,0942 | 0,0962 | 20,01 | 6,05 |
| 5 | 0,0942 | 0,0903 | 0,0922 | 20,01 | 5,80 |
| 6 | 0,0903 | 0,0863 | 0,0883 | 20,01 | 5,55 |
| 7 | 0,0863 | 0,0823 | 0,0843 | 20,01 | 5,30 |

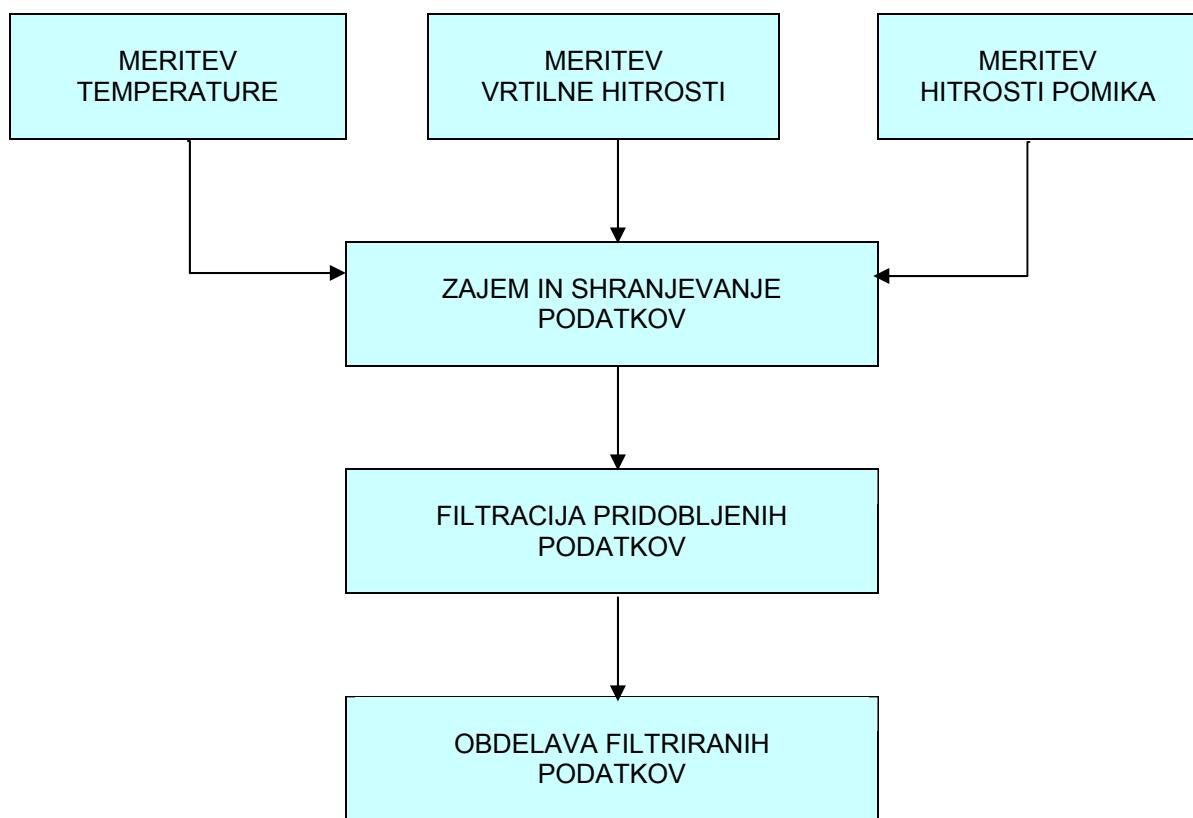
3.6 EKSPERIMENTALNI SISTEM

3.6.1 Proces odrezavanja

Proces odrezavanja MDF-a smo opravili na stružnici Centauro TC 1200 v laboratoriju Katedre za mehanske obdelovalne tehnologije. Vrtilno hitrost smo nastavili na 1200 min^{-1} . Ves čas eksperimenta je bila konstantna pri vsakem obdelovancu. Stružni nož je bil vijačno vpet v vpenjalno napravo stroja in zamaknjen pod kotom 10° . Pomik smo pri vsakem obdelovancu posebej spremenili, oziroma smo ga z vsakim novim obdelovancem povečevali. Pomik smo nastavili na $0,1 \text{ mm/o}$ ($v_p = 0,12 \text{ m/min}$), $0,2 \text{ mm/o}$ ($v_p = 0,24 \text{ m/min}$), $0,4 \text{ mm/o}$ ($v_p = 0,48 \text{ m/min}$) in $0,6 \text{ mm/o}$ ($v_p = 0,72 \text{ m/min}$). Pri vsakem obdelovancu smo izvedli sedem meritev.

3.6.2 Merjenje temperature odrezavanja

Temperaturo odrezavanja smo merili z termočlenom tipa E, podatke pa smo zajemali z osebnim računalnikom, ki je imel vgrajeno merilno kartico proizvajalca National Instruments PCI-6014. Podatke smo obdelovali s programom istega proizvajalca, LabView, istočasno pa smo zajemali tudi podajalno hitrost. Na osnovi pridobljenih meritov smo s filtriranjem podatkov analizirali spremembo temperature v odvisnosti od pomika in rezalne hitrosti. Termočlen smo namestili 0.9 mm od zgornjega roba in 1.4 mm od stranskega roba stružnega noža. Na sliki 9 je shematsko prikazan načrt meritve.

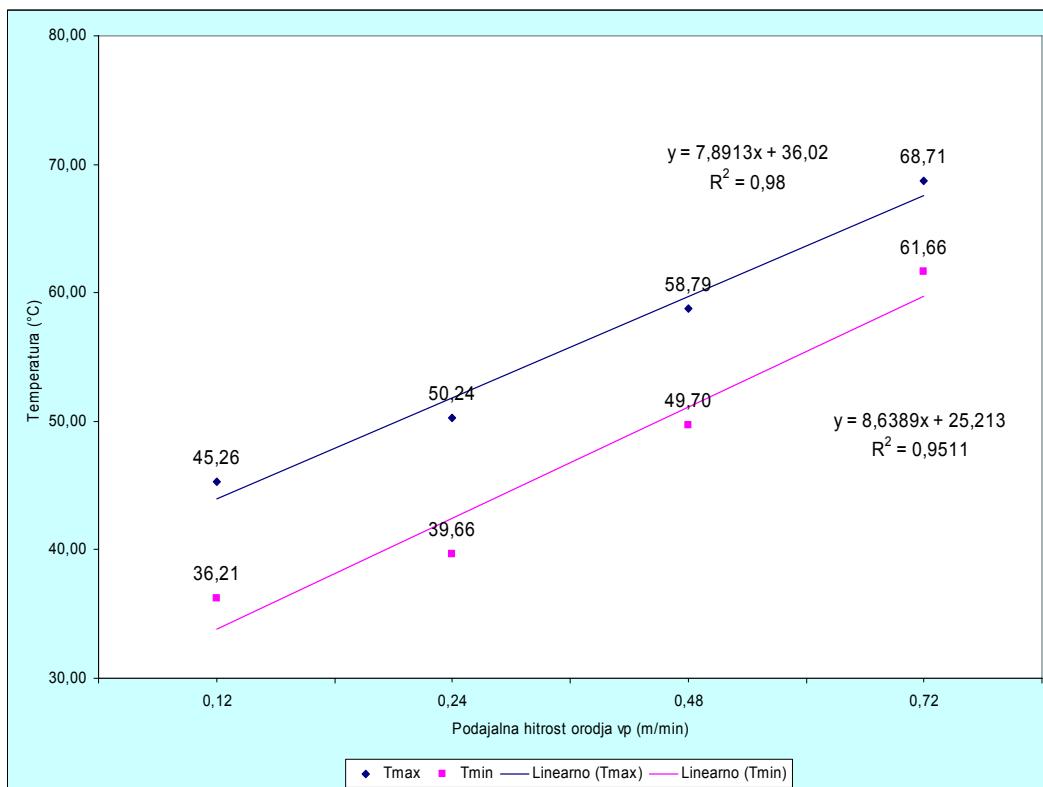


Slika 7: Načrt meritve

4 REZULTATI

4.1 KORELACIJA MED IZMERJENIMI MAKSIMALNIMI IN MINIMALNIMI TEMPERATURAMI TER POMIKOM

Za primerjavo korelacije med izmerjeno temperaturo in podajano hitrostjo smo izbrali izmerjene temperature rezila v stacionarnem območju. Rezultate izmerjenih temperatur rezila pri različnih podajalnih hitrostih prikazuje slika 8.



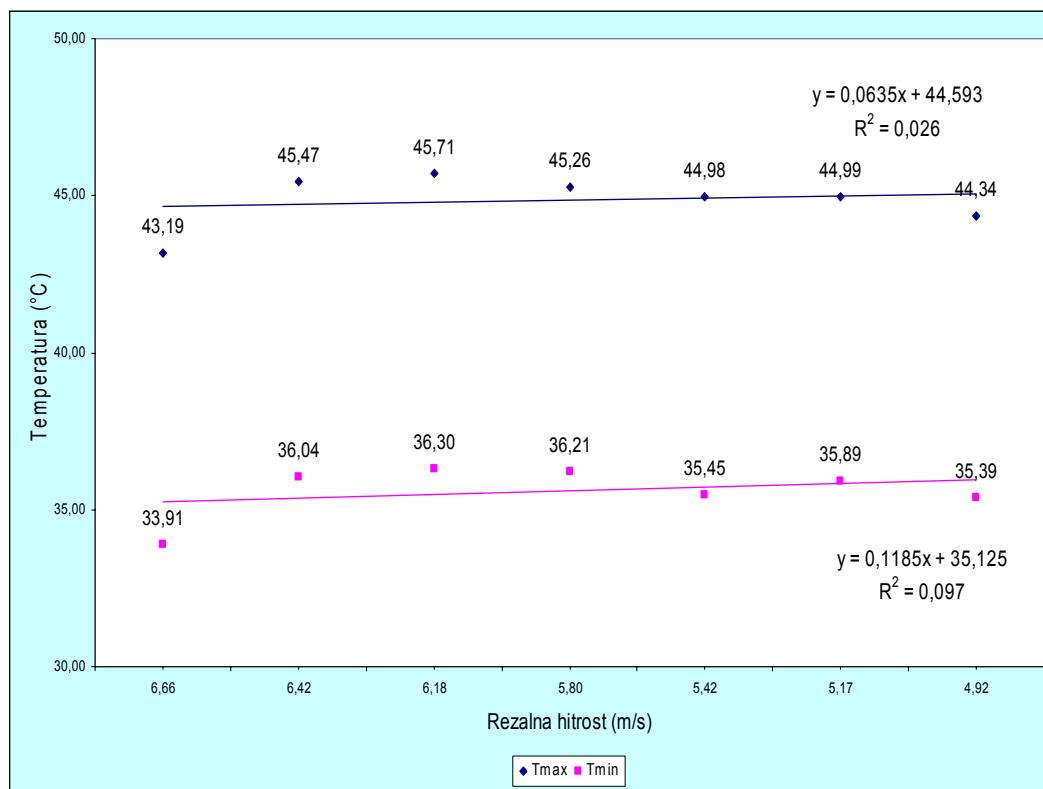
Slika 8: Korelacija med izmerjenimi T_{\max} in T_{\min} ter podajalno hitrostjo v_p

Razlike med rezalnimi hitrostmi pri poskusu so bile minimalne. Razlika med najnižjo in najvišjo izmerjeno maksimalno temperaturo ΔT_{\max} je znašala $23,46$ °C, razlika med izmerjeno najnižjo in najvišjo minimalno temperaturo ΔT_{\min} pa $25,45$ °C. Primerjave med izmerjenimi temperaturami in podajalno hitrostjo nam kažejo, da temperatura rezila z naraščajočo podajalno hitrostjo linearno narašča. Rezultati so pričakovani, saj so torne razmere na stičnih ploskvah rezila in obdelovanca poglavitni generator toplote. Odvisne so od normalnih obremenitev rezila, te pa so posledica rezalne sile, ki se z naraščajočo presečno površino odrezka linearno povečuje.

4.2 KORELACIJA MED IZMERJENIMI MAKSIMALNIMI IN MINIMALNIMI TEMPERATURAMI TER REZALNO HITROSTJO

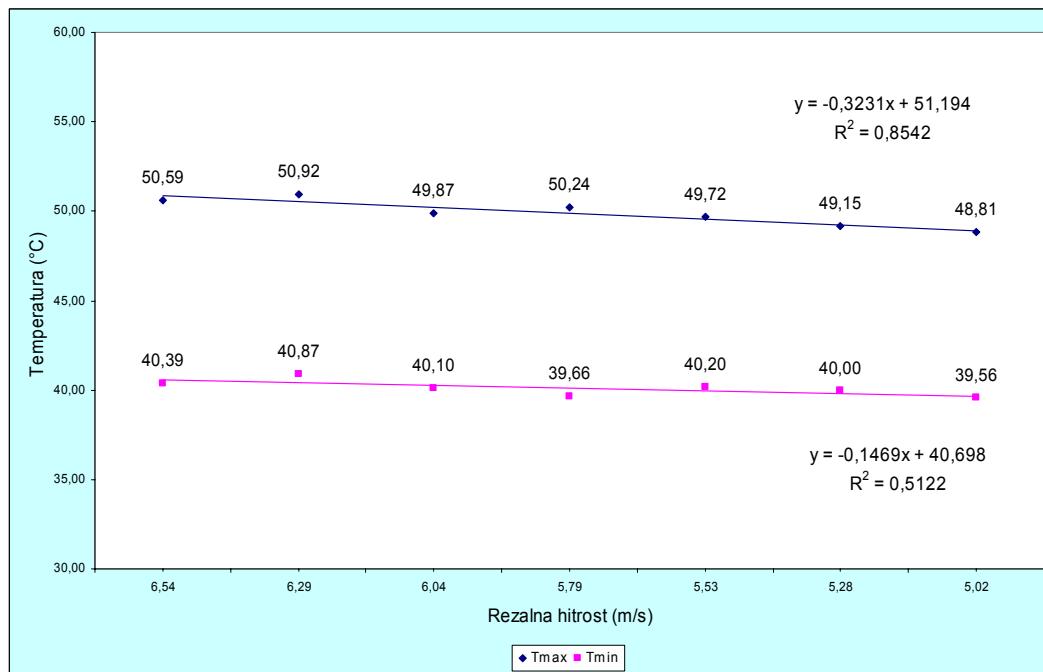
Pri vsakem obdelovancu je bilo izvedenih sedem meritev pri različnih rezalnih hitrostih v_r . Izmerjene temperature se kljub razmeroma majhnim spremembam rezalnih hitrosti ne spremenijo sorazmerno s padanjem rezalne hitrosti, temveč nihajo. Na osnovi tega lahko sklepamo, da meritve ne kažejo signifikantnega vpliva rezalne hitrosti na temperaturo orodja.

4.2.1 Korelacija med izmerjenimi temperaturami T_{\max} in T_{\min} ter rezalnimi hitrostmi v_r pri podajalni hitrosti orodja $v_p=0,12\text{m/min}$



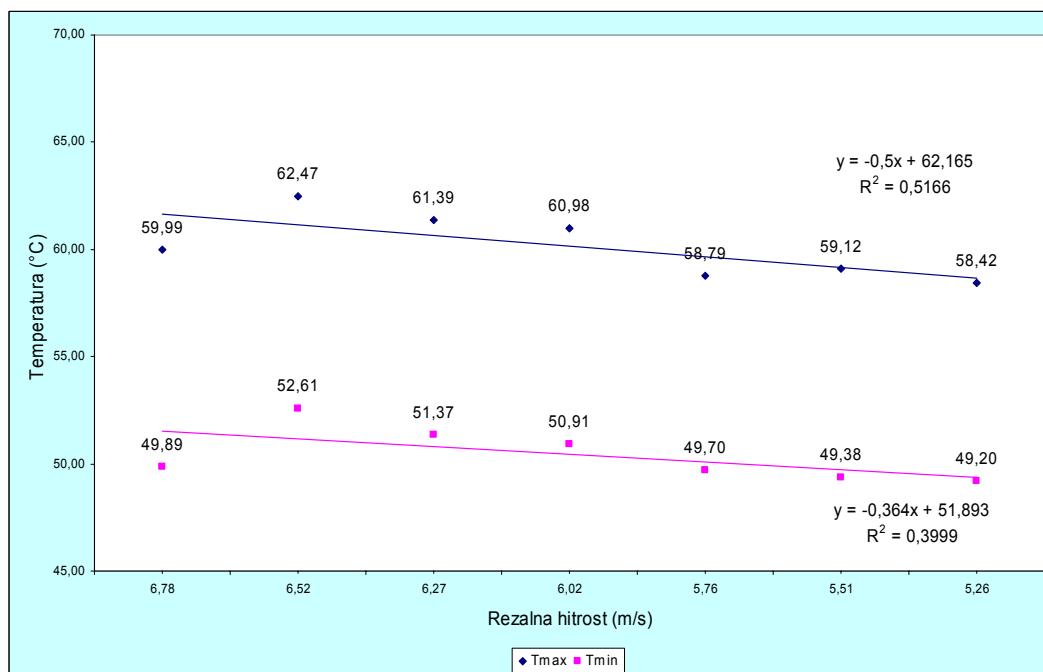
Slika 9: Korelacija med temperaturo T_{\max} in T_{\min} ter rezalno hitrostjo v_r pri podajalni hitrosti $v_p=0,12\text{m/min}$

4.2.2 Korelacija med izmerjenimi temperaturami T_{\max} in T_{\min} ter rezalnimi hitrostmi v_r pri podajalni hitrosti $v_p=0,24\text{m/min}$



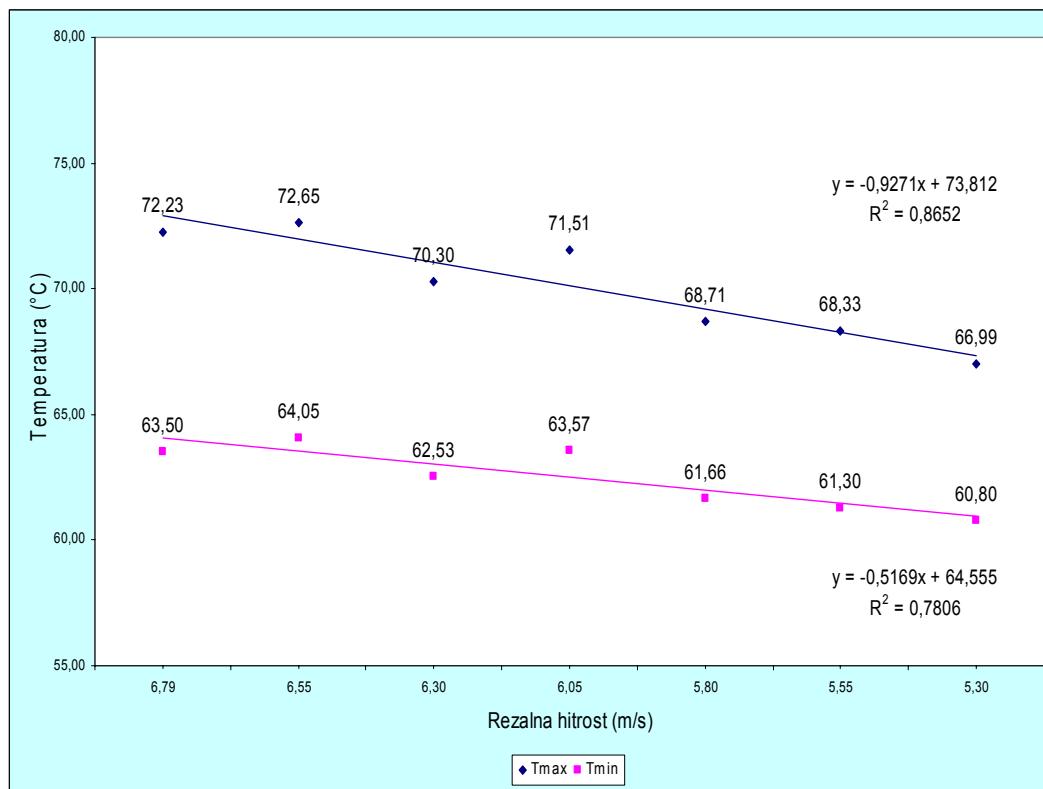
Slika 10: Korelacija med temperaturo T_{\max} in T_{\min} ter rezalno hitrostjo v_r pri podajalni hitrosti $v_p=0,24\text{m/min}$

4.2.3 Korelacija med izmerjenimi temperaturami T_{\max} in T_{\min} ter rezalnimi hitrostmi v_r pri podajalni hitrosti $v_p=0,48\text{m/min}$



Slika 11: Korelacija med temperaturo T_{\max} in T_{\min} ter rezalno hitrostjo v_r pri podajalni hitrosti $v_p=0,48\text{m/min}$

4.2.4 Korelacija med izmerjenimi temperaturami T_{\max} in T_{\min} ter rezalnimi hitrostmi v_r pri podajalni hitrosti $v_p=0,72\text{m/min}$



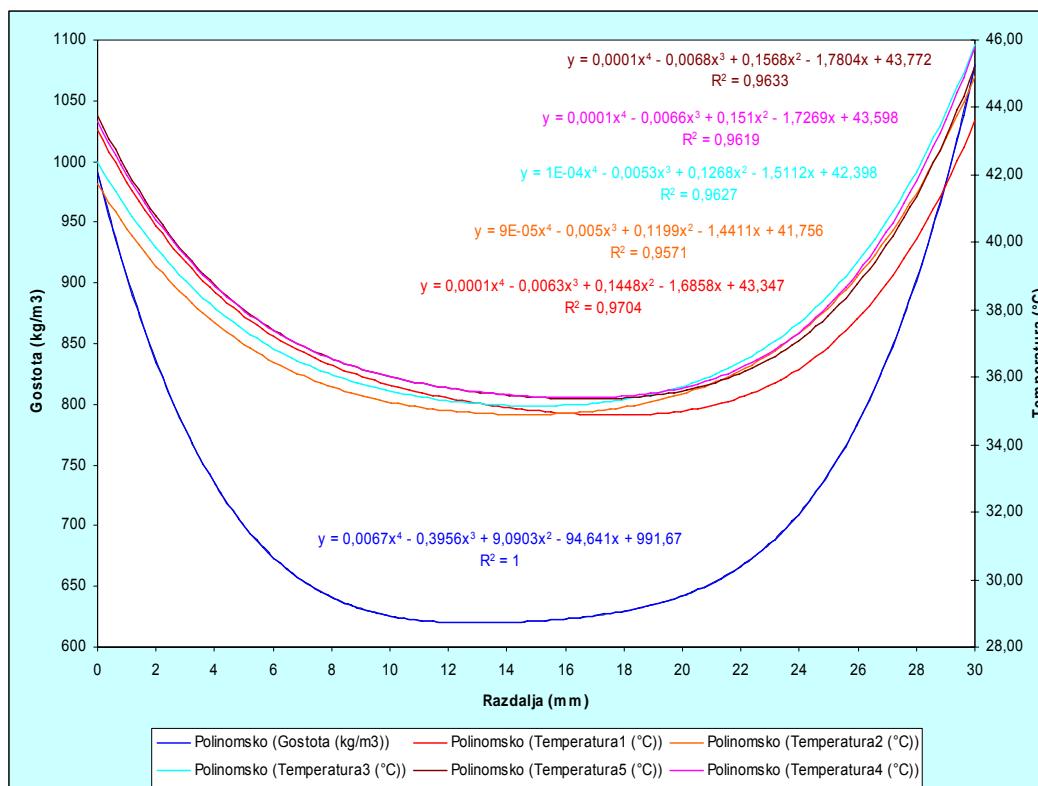
Slika 12: Korelacija med temperaturo T_{\max} in T_{\min} ter rezalno hitrostjo v_r pri podajalni hitrosti $v_p=0,72\text{m/min}$

4.3 KORELACIJA MED TEMPERATURO IN GOSTOTNIM PROFILOM MDF PLOŠČE

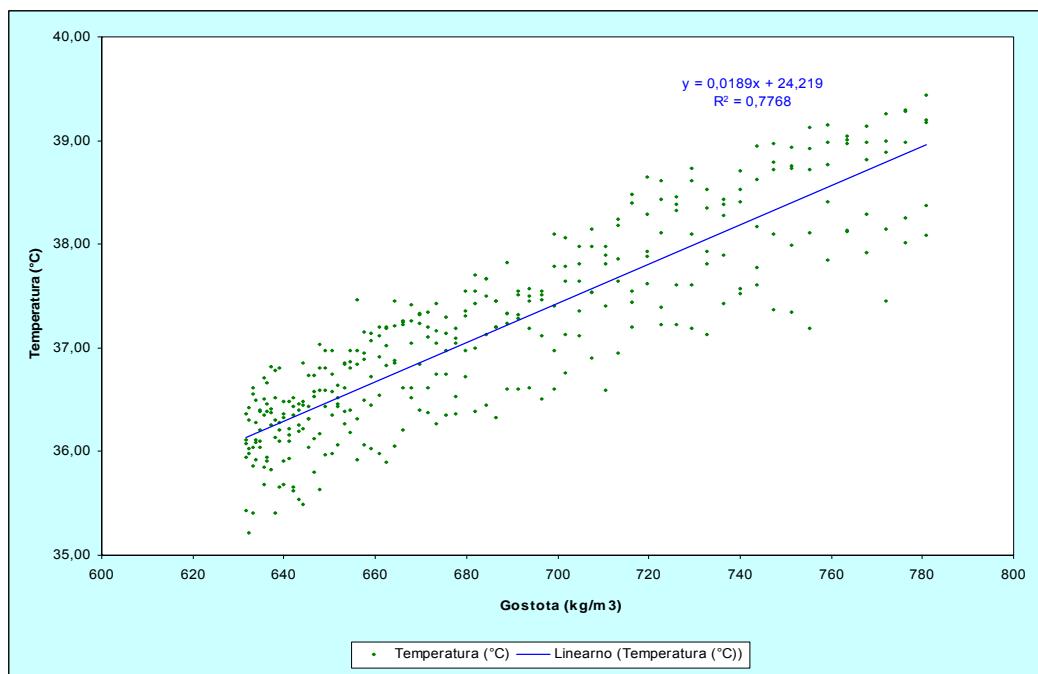
Za primerjavo korelacije med izmerjeno temperaturo in gostotnim profilom MDF smo izbrali izmerjene temperature petih debelinskih segmentov MDF-plošče v stacionarnem območju. Glede na rast oziroma spremembo gostotnega profila MDF je opaziti pozitiven trend naraščanja izmerjene temperature.

Na osnovi meritev smo opazili, da temperatura ne spremlja simetrično gostotnega profila, kar lahko pripišemo ohlajevanju orodja v izteku odrezavanja od zunanjega gostejšega sloja MDF-plošče k srednjemu redkejšemu sloju MDF-plošče.

4.3.1 Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=6,66\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

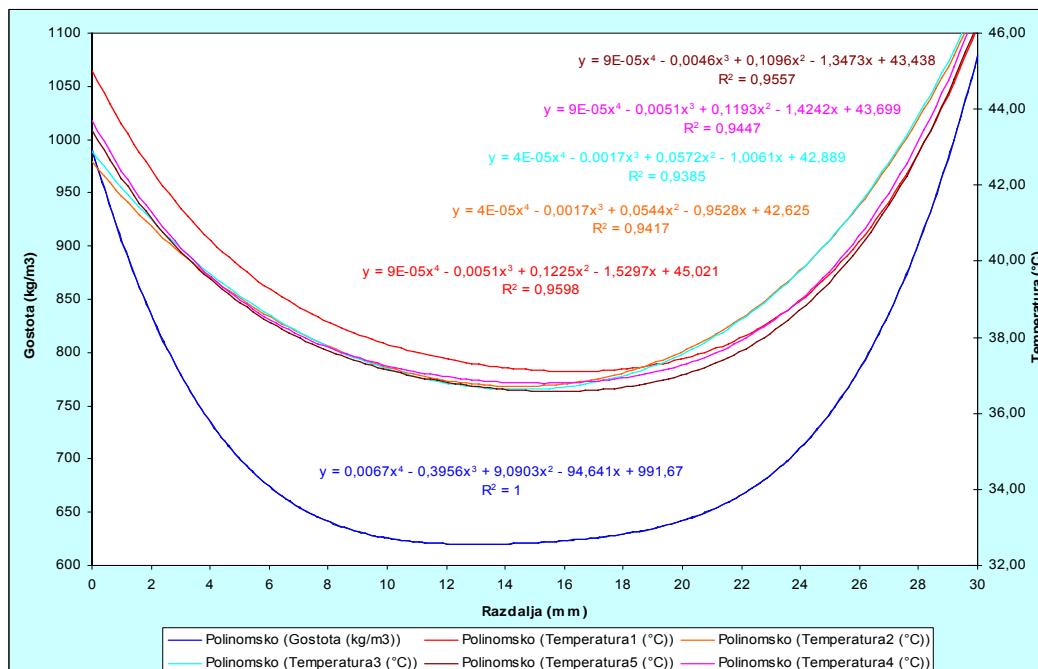


Slika 13: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=6,66\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

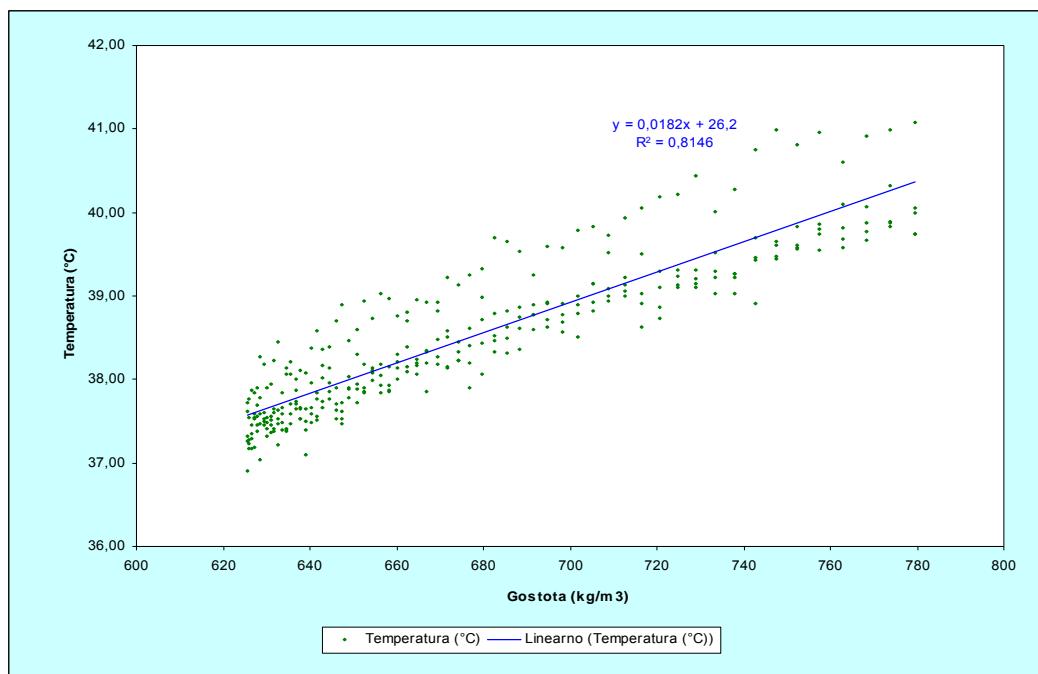


Slika 14: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=6,66\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

4.3.2 Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

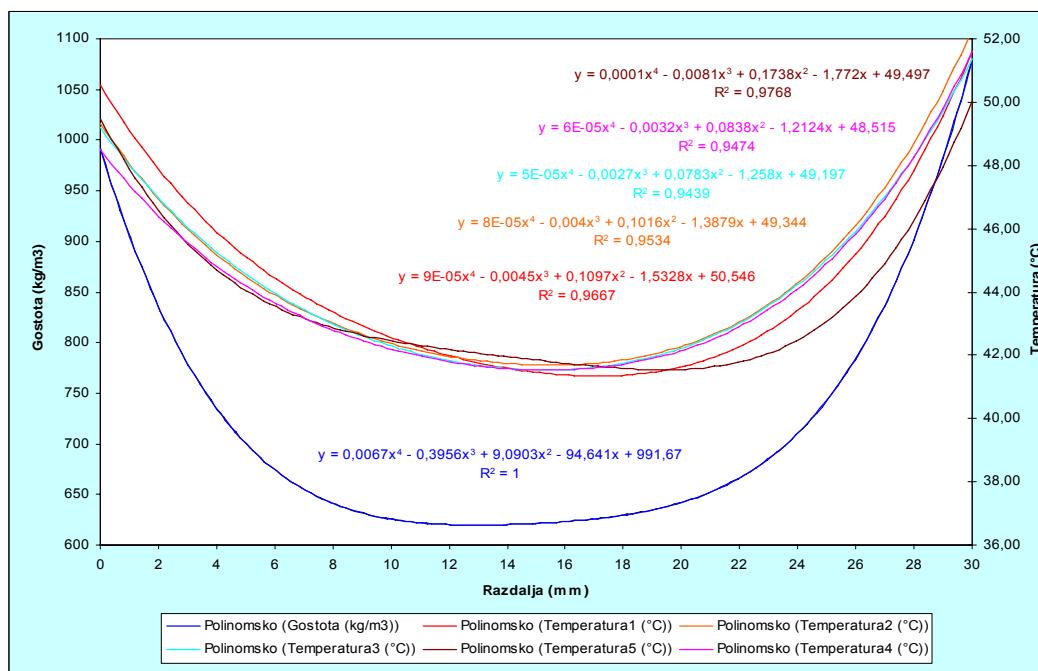


Slika 15: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

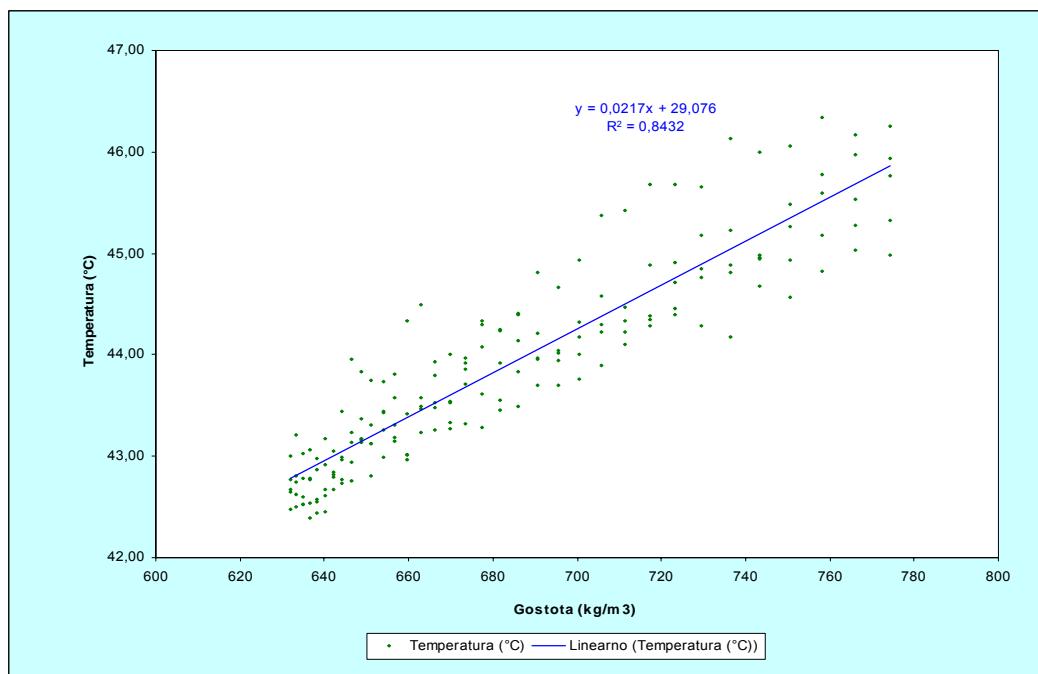


Slika 16: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

4.3.3 Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=6,54\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

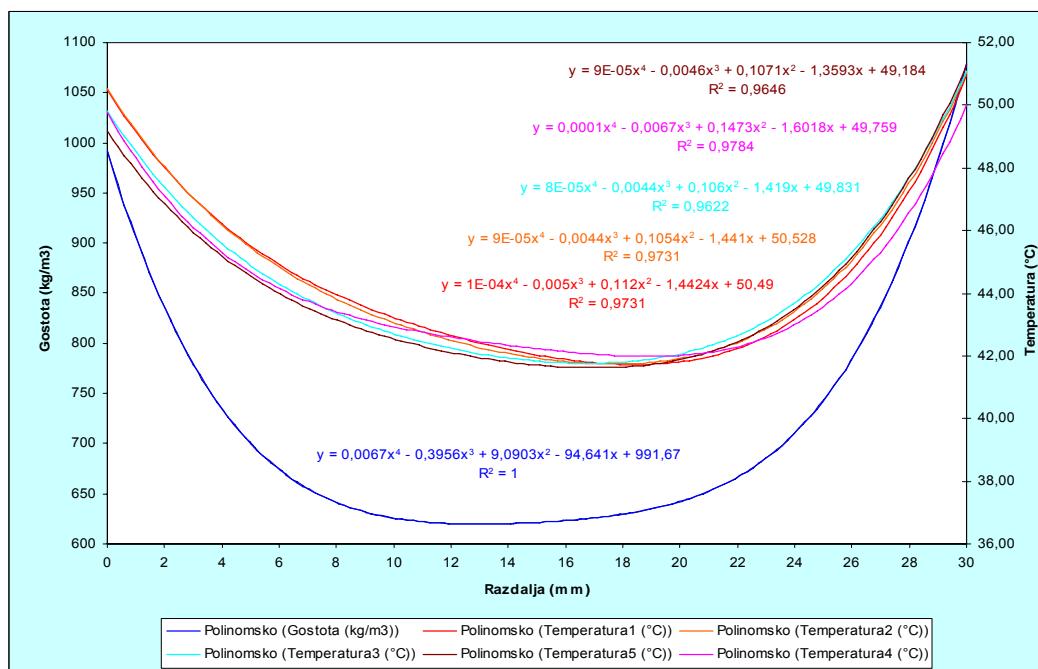


Slika 17: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=6,54\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

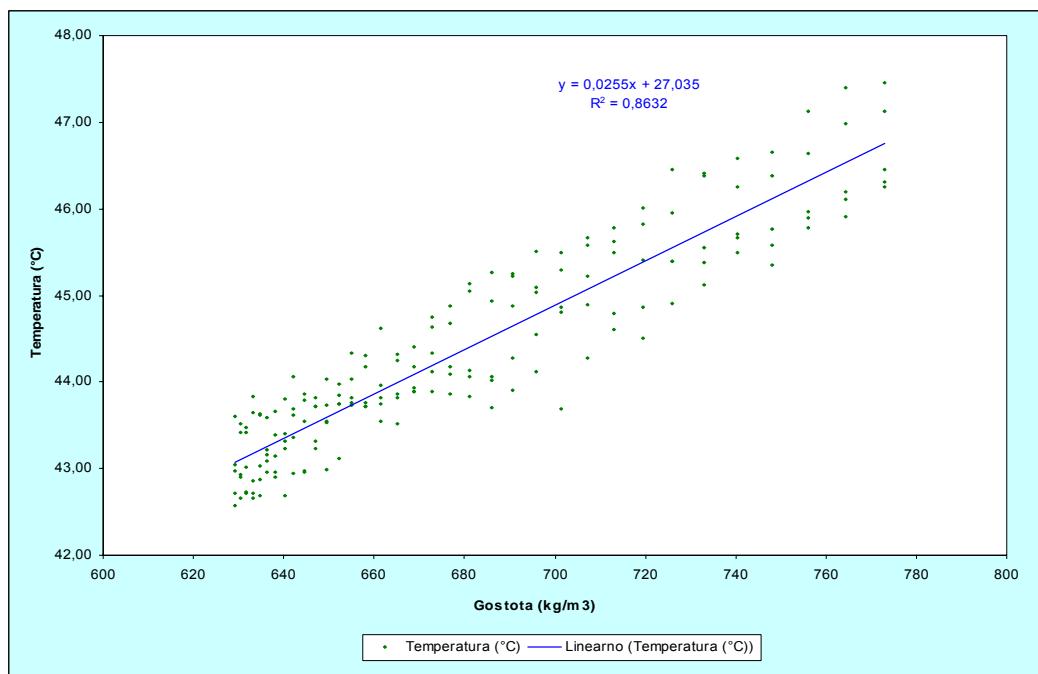


Slika 18: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=6,54\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

4.3.4 Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,79\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

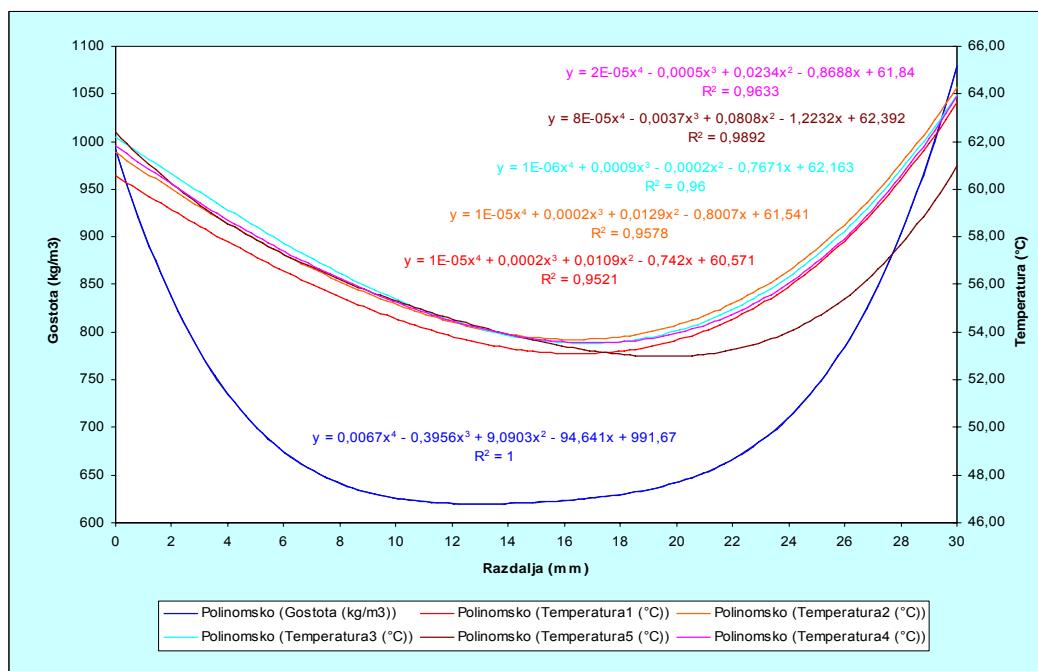


Slika 19: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,79\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

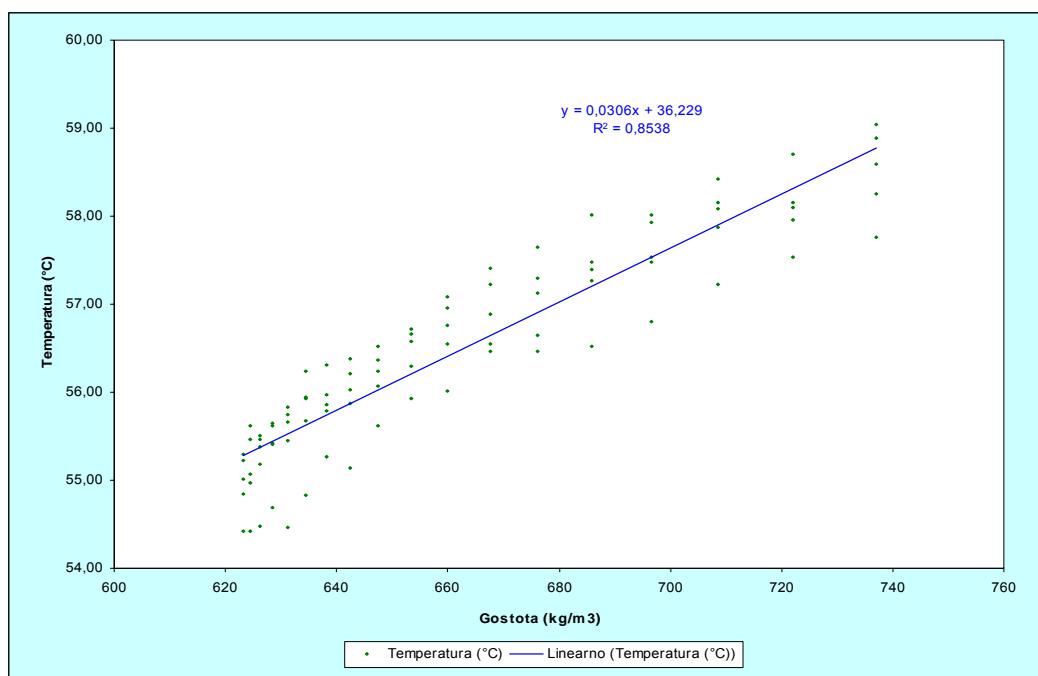


Slika 20: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,79\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

4.3.5 Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,52\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

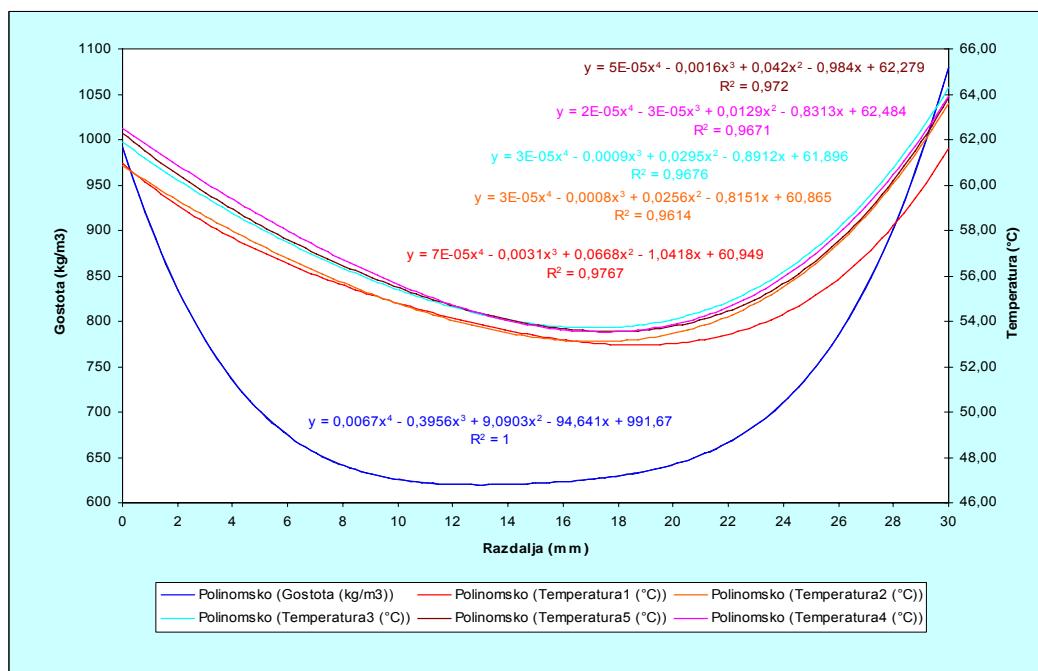


Slika 21: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,52\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

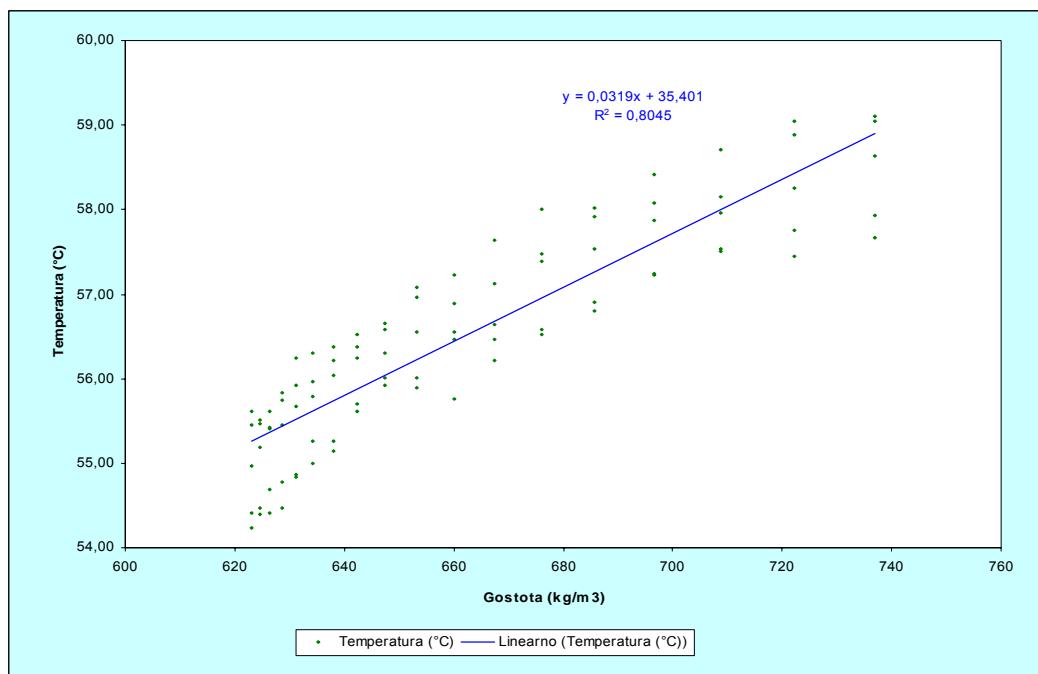


Slika 22: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,52\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

4.3.6 Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=5,76\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

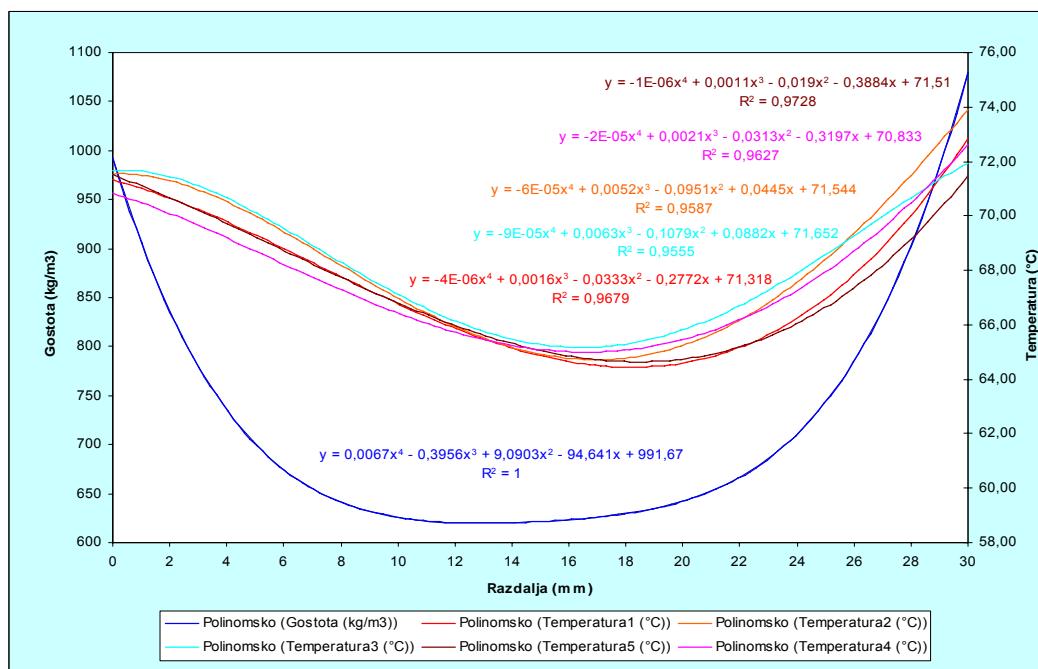


Slika 23: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=5,76\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

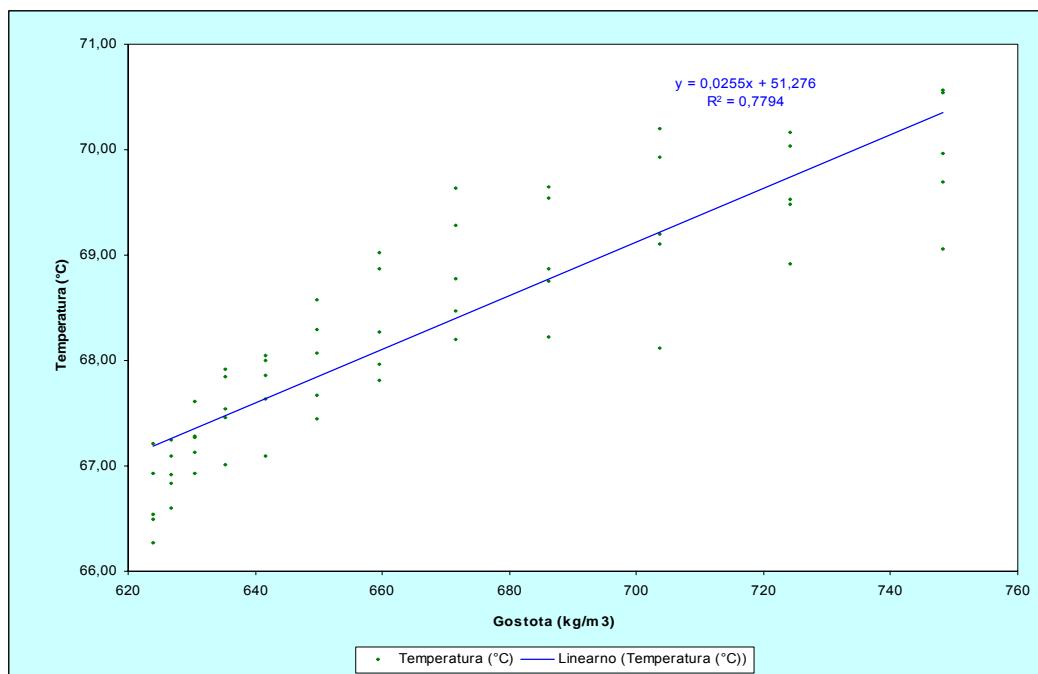


Slika 24: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=5,76\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

4.3.7 Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,55\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

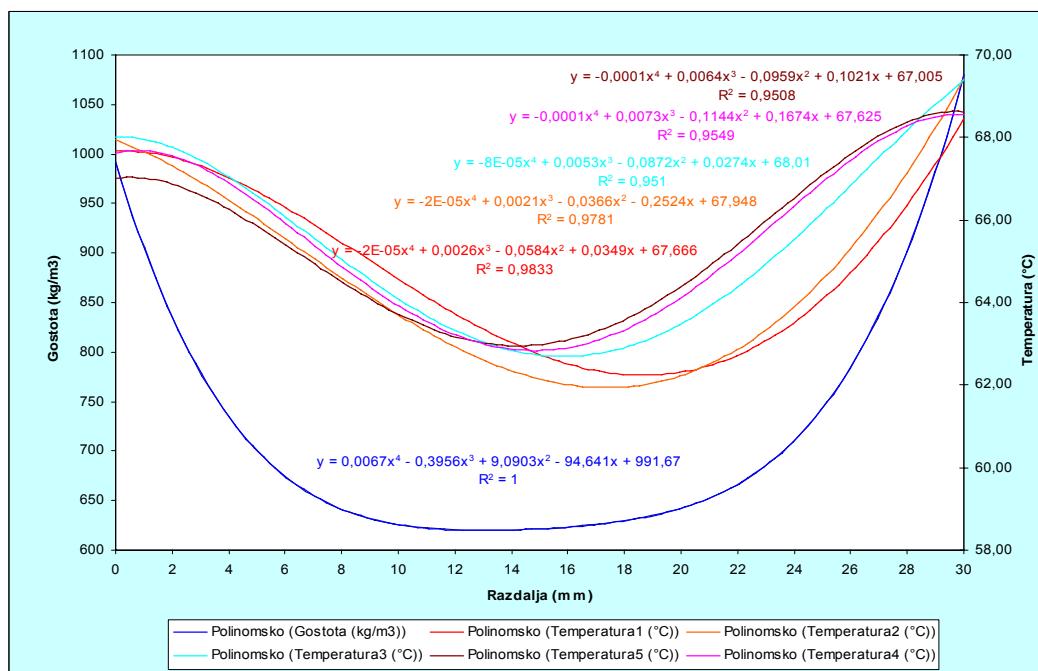


Slika 25: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,55\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

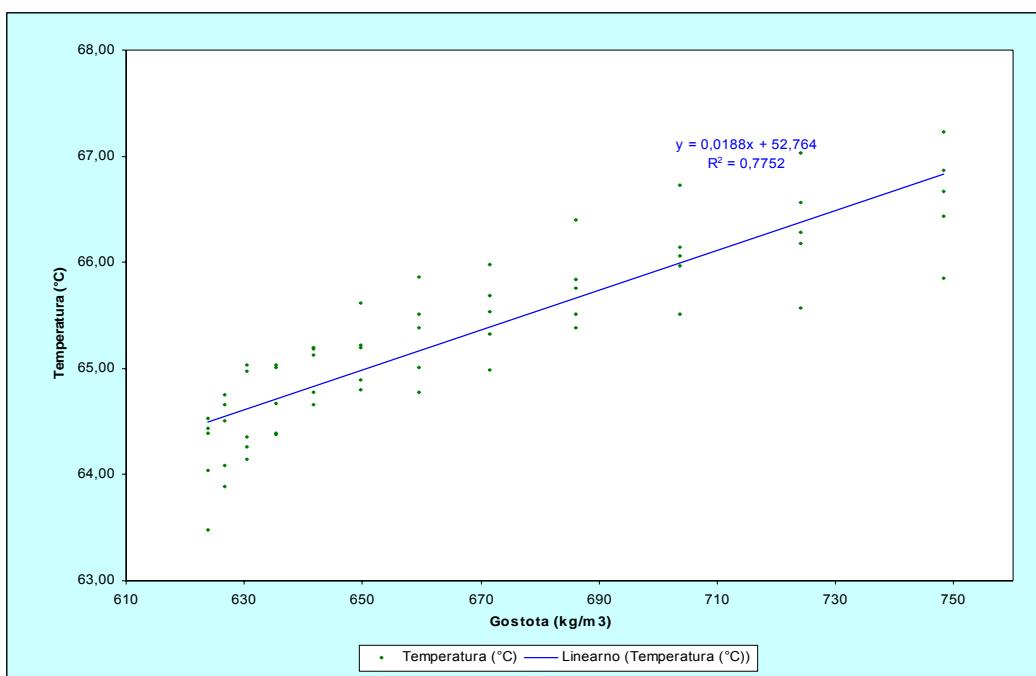


Slika 26: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,55\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

4.3.8 Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom MDF-plošče pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



Slika 27: Primerjava izmerjenih temperatur petih debelinskih segmentov in gostotnega profila pri obdelovalnih parametrih $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



Slika 28: Korelacija med temperaturo in gostotnim profilom pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

Na osnovi rezultatov opravljenih analiz korelacij med temperaturo in različnimi relevantnimi tehnoškimi parametri pri struženju MDF, smo prišli do določenih spoznanj o gibanju topotnih tokov ter o dogajanju v deformacijskem območju. Pri odrezavanju vlknatega materiala, kot je MDF, je edini generator topote trenje in sicer med rezilom in odrezkom ter rezilom in novo nastalo površino. V primeru odrezavanja vlknatega kompozitnega materiala je delež topote, ki je posledica notranjega trenja v obdelovanem materialu zanemarljiv. Zaradi izrazitih razlik med topotnimi prevodnostmi v procesu odrezavanja sodelujočih materialov, preide poglaviti del topote v orodje, kar se kaže v izrazitem povečanju temperature rezila.

5.1 VPLIV PODAJALNE HITROSTI ORODJA

Za analizo vpliva podajalne hitrosti na generacijo topote v procesu kontinuiranega ortogonalnega struženja smo v eksperimentalnem delu izbrali štiri podajalne hitrosti in sicer 0,12, 0,24, 0,48 in 0,72 m/min. Primerjava med izmerjenimi temperaturami in podajalno hitrostjo suporta z orodjem kaže na to, da temperatura rezila z naraščajočo podajalno hitrostjo linearno narašča. Relacija je popolnoma razumljiva, kajti torne razmere na stičnih ploskvah rezila in obdelovanca, ki so poglaviti generator topote, so odvisne od normalnih obremenitev rezila, le te pa so posledica rezalne sile, za katero pa je znano, da se z naraščajočo presečno površino odrezka linearно povečuje.

5.2 VPLIV REZALNE HITROSTI

Meritve temperatur v odvisnosti od rezalne hitrosti smo izvedli na štirih obdelovancih. Za vsak obdelovanec smo opravili sedem meritve pri različnih rezalnih hitrostih. Opravljene meritve kažejo na to, da je v območju uporabljenih rezalnih hitrosti vpliv slednje na razvoj topote praktično zanemarljiv. Rezultat je pričakovani, če upoštevamo dejstvo, da je rezalna sila, kot izvorni dejavnik razvoja topote, neodvisna od rezalne hitrosti.

5.3 VPLIV GOSTOTNEGA PROFILA MDF

Za analizo odvisnosti med izmerjenimi temperaturami in gostotnim profilom MDF smo izvedli osem meritov. Za analizo omenjene odvisnosti smo v vseh primerih upoštevali izmerjeno temperaturo pri enaki stružni dolžini. Pri vseh opravljenih meritvah temperatura je opazno nihanje izmerjenih vrednosti skladno s spremenljivim gostotnim profilom, ki se zaradi zaporedno lepljenega kompozita spreminja periodično. Potez temperatur je bil pri vseh meritvah primerljiv, prav tako pa je bila pri vseh meritvah opazna nesimetrična porazdelitev temperature vzdolž nedvomno simetričnega gostotnega profila. Omenjena asimetrija je posledica sočasnega zmanjševanja rezalne sile in ohlajanja orodja, ko le ta prehaja iz osrednjega redkejšega v gostejši periferni del ploščnega kompozita. Tesna povezanost med gostotnim profilom in temperaturo orodja potrjuje domnevno o linearni odvisnosti med obremenitvijo rezil in presečno površino odrezka obdelovanega materiala.

6 POVZETEK

Za osnovni cilj naloge smo si zastavili spremljanje korelacije med spremembo temperature orodja in parametri odrezavanja, pomikom, rezalno hitrostjo in gostotnim profilom MDF. Primerjali smo rezultate meritev pri struženju obdelovancev z običajno karbidno trdino K05, ki se pogosto uporablja v lesarstvu.

Odrezavanje smo izvajali na lepljenih valjih iz segmentov MDF-plošč. Segmente smo slojno zlepili v valje dimenzij $\varnothing 110 \times 600$ mm, segmenti pa so bili med seboj zlepjeni z navadnim konstrukcijskim PVA-lepilom, ki se uporablja v lesarstvu. Pri poskusu smo s termočlenom tipa E merili temperaturo rezalnega orodja v odvisnosti od rezalne hitrosti, hitrostjo pomika, oziroma spremembo geometrije odrezka in spremembo gostotnega profila MDF. Eksperiment smo izvedli na stružnici Centauro TC 1200. V njeno vpenjalno napravo smo vijačno vpeli stružni nož z rezalno ploščico. Vpenjanje smo izvedli tako, da je bil stružni nož zamknjen pod kotom 10° .

Za merjenje temperature smo uporabili termočlen tipa E, ki smo ga namestili pod rezalno ploščico, oziroma med rezalno ploščico in telo stružnega noža. Pod termočlen smo nanesli tanek sloj termo paste, da smo povečali topotno prevodnost med rezalno ploščico in termočlenom. Podatke smo zajemali z osebnim računalnikom, ki je imel vgrajeno merilno kartico proizvajalca National Instruments PCI-6014. Obdelava izmerjenih podatkov je bila izvedena s programom proizvajalca National Instruments LabView. Termočlen smo namestili 0.9 mm od zgornjega roba in 1.4 mm od stranskega roba stružnega noža. Pridobljene podatke smo kasneje prenesli v grafično obliko s pomočjo Excela.

Rezultati opravljenih analiz kažejo, da je temperatura v tesni korelaciiji s tehniološkimi parametri odrezavanja, v našem primeru pomikom in rezalno hitrostjo ter gostoto obdelovanega materiala kot fizikalnim parametrom. Temperatura orodja je v pozitivni korelaciji tako s podajalno hitrostjo, kakor tudi gostoto obdelovanega materiala. Rezalna hitrost ima na temperaturo orodja dokaj neizrazit in nesignifikanten vpliv.

7 VIRI

- Bučar B. 1991. Ortogonalno premočrtno odrezavanje kot naključni stacionarni proces. Les, 3-4: 65-71
- Bučar B. 1994. Vpliv dinamičnih lastnosti strukture obdelovalnega sistema na proces odrezavanja lesnega tkiva. Les, 46, 5: 145-151
- Bučar B. 2002. Dinamične značilnosti merilnih sistemov (Študijsko gradivo za interno uporabo). Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
- Bučar B. 2002. Meritve in osnove teorije napak ter merjenje temperature in pretokov fluidov (Študijsko gradivo za interno uporabo). Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
- Costes J.P., Ko P.L., Ji T., Petit C.D., Altintas Y. 2004. Orthogonal cutting mechanics of maple: modeling a solid wood-cutting process. Journal of Wood Science, 50:28-34
- Costes J.P., Petit C.D., Altintas Y., Ko P.L. 2003. Estimated stress and friction distribution on tool rake face in the medium density fiberboard cutting process. Forest Product Journal, 53, 11/12: 59-66
- Dippon J., Ren H.F., Amara F.B., Altintas Y. 2000. Orthogonal Cutting Mechanics Of Medium Density Fiberboards. Forest Product Journal, 50, 7/8: 25-30
- Engin S., Altintas Y., Amara F.B. 2000. Mechanics of routing medium density Fiberboard. Forest Product Journal, 50, 9: 65-69
- Hayashi K., Oono M., Ito M. 1986. Estimation of tool temperature in the neighborhood of the cutting edge in peripheral milling of wood. Mokuzai Gakkaiski, 32, 8: 603-607
- Hayashi K., Ito M. 1988. Efect of cutting speed on tool wear in the peripheral milling. Mokuzai Gakkaiski, 34, 2: 100-111
- Lemaster R. 2002. Effect of machining parameters on carbide tool wear for machining MDF. NC State University, Reserch Summary
- McKenzie W.M. 1991. Friction coefficient as a guide to optimum rake angle in wood Machining. Wood Science and Technology, 25, 397-401
- McKenzie W.M., Karpovich H. 1975. Wear and blunting of the tool corner in cutting a wood-based material. Wood Science and Technology, 9, 59-73
- Muren H. 1995. Odrezavanje in odnašanje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Strojništvo: 639 str.

Pedilla M.H., Rapp R.A., Stewart H.A. 1991. High temperature oxidation of tungsten carbide-cobalt composites in the presence of MDF. Forest Products Journal, 41, 10: 31-34

Reid A.S., Stewart H.A., Rapp R.A. 1991. High-temperature reactions of tungsten carbide-cobalt tool material with MDF. Forest Producta Journal, 41, 11/12: 12-18

Persson B.N.J. 1999. Sliding Friction. Elsevier Science B.V. 1999. Surface Scence Reports 33: 83-119.

Persson B.N.J. 1993. Theory and Simulation of Sliding Friction.
Physical Review Letters 71, 8: 1212-1215

Stare L. 2004. Obraba rezil iz sintranih karbidnih trdin.
Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 58 str.

Stewart H.A. 1987. Borided tungsten carbide reduces tool wear during machining of MDF. Forest Products Journal, 37, 7/8: 35-38

Stewart H.A. 1988. Tool forces and edge recession from cutting medium density Fiberboard. Forest Product Journal, 38, 4: 51-54

Stewart H.A. 1989. Feasible high temperature phonomena in tool wear from wood Machining. Forest Products Journal, 39, 3: 25-28

Vidic D. 2005. Vpliv tehnoloških parametrov struženja na temperaturo rezila.
Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 55 str.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju doc. dr. Bojanu Bučarju, da je sprejel mentorstvo in me pri nastajanju diplomske naloge strokovno usmerjal in pomagal.

Iskreno se zahvaljujem doc. dr. Dominiki Gornik Bučar za recenzentstvo.

Za pomoč pri meritvah v Laboratoriju za mehansko obdelavo se zahvaljujem Miranu Merharju univ. dipl.ing. les, asistentu na Katedri za mehanske in obdelovalne tehnologije Biotehniške fakultete Ljubljana, Oddelka za lesarstvo.

Biotehniški fakulteti v Ljubljani, Oddelku za lesarstvo, se zahvaljujem za merilno tehniko in termine v laboratoriju.

Iz vsega srca sem hvaležen svoji ženi in otrokom, ki so me ves čas študija podpirali in mi stali ob strani.

Zahvaljujem se tudi svojim staršem, ki so me ves čas študija vzpodbjali.

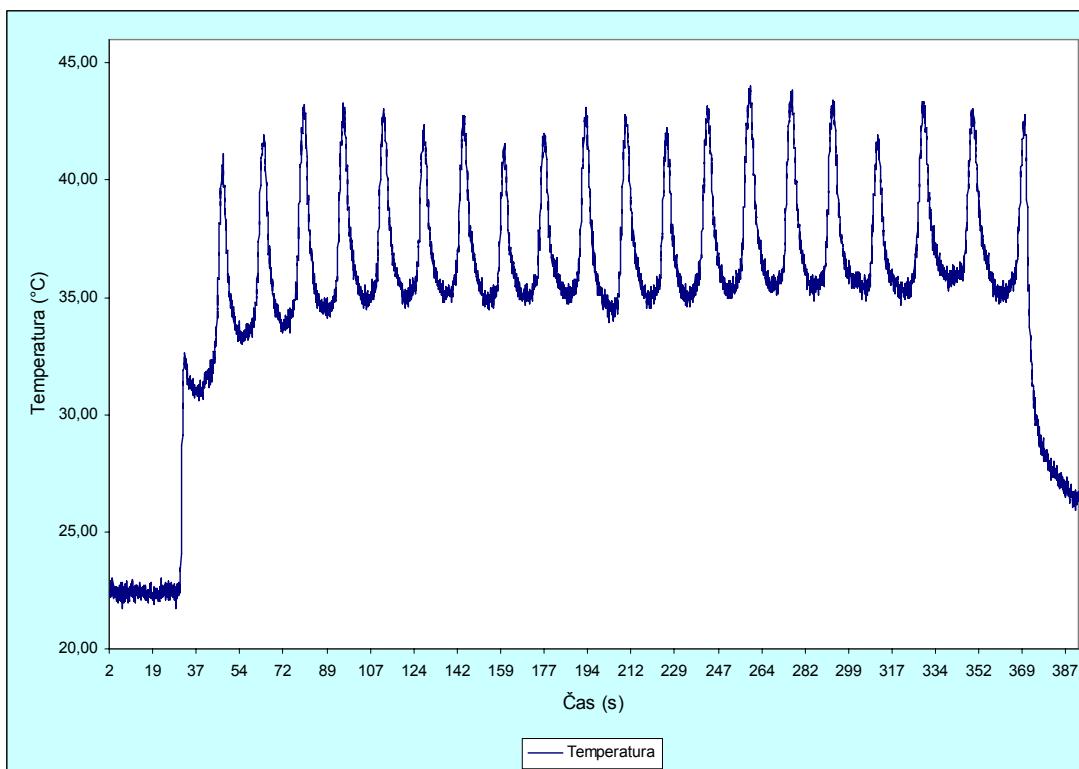
Zahvaljujem se mojemu podjetju Zavodu za varstvo in usposabljanje dr. Marijana Borštnarja Dornava, da mi je omogočil študij.

Za lektoriranje se zahvaljujem Tatjani Perić, prof.

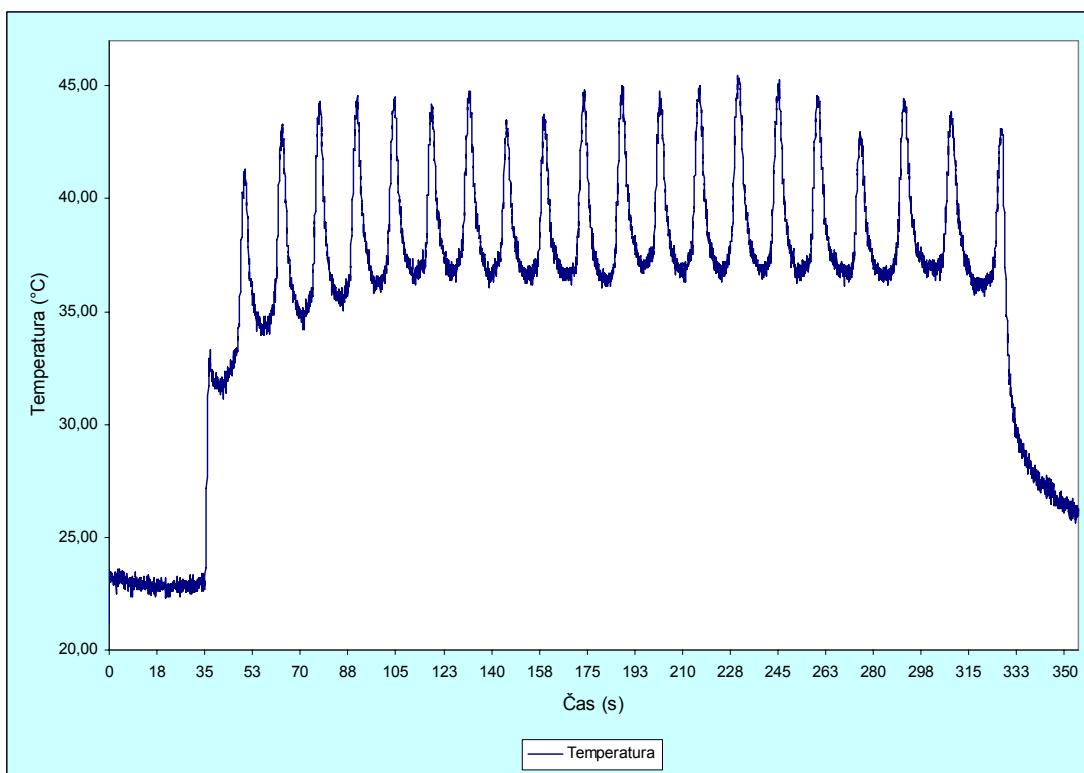
Za pomoč pri skicah se zahvaljujem Zlatku Perić, dipl. inž. les

PRILOGE

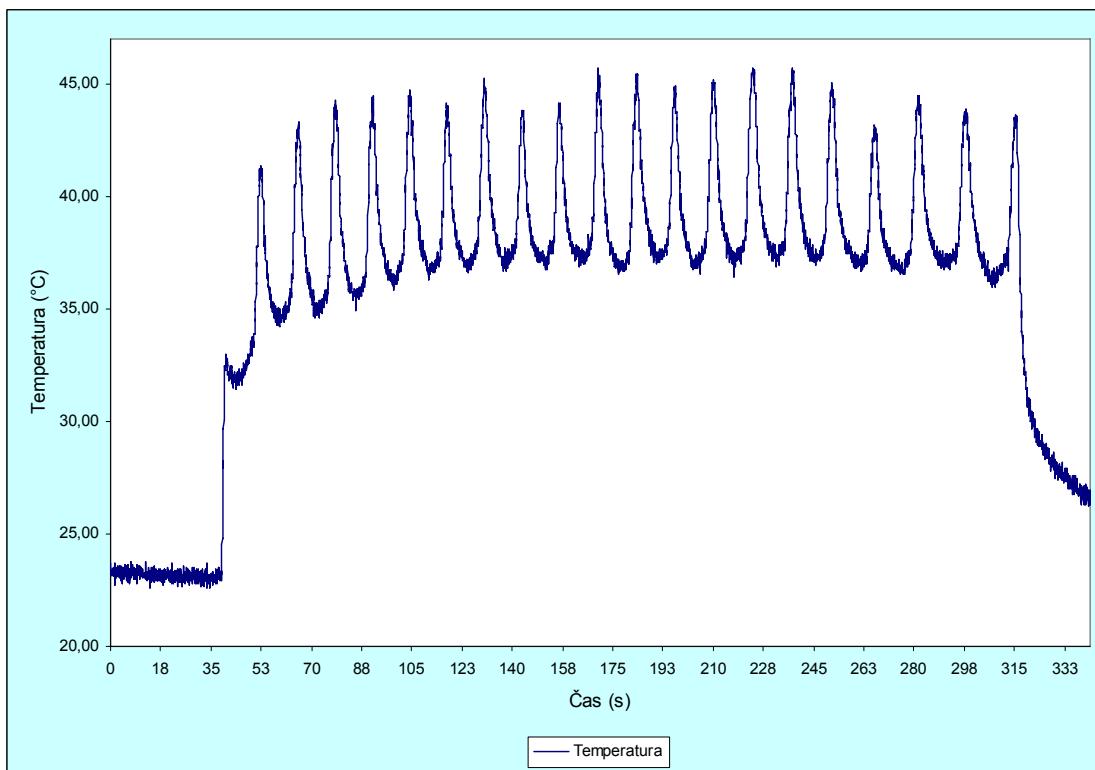
Naslednji grafikoni so grafični prikaz meritev temperatur pri struženju MDF. Grafikoni so izdelani na osnovi pridobljenih meritev za vsak obdelovanec posebej in prikazujejo časovni potek izmerjenih temperatur.



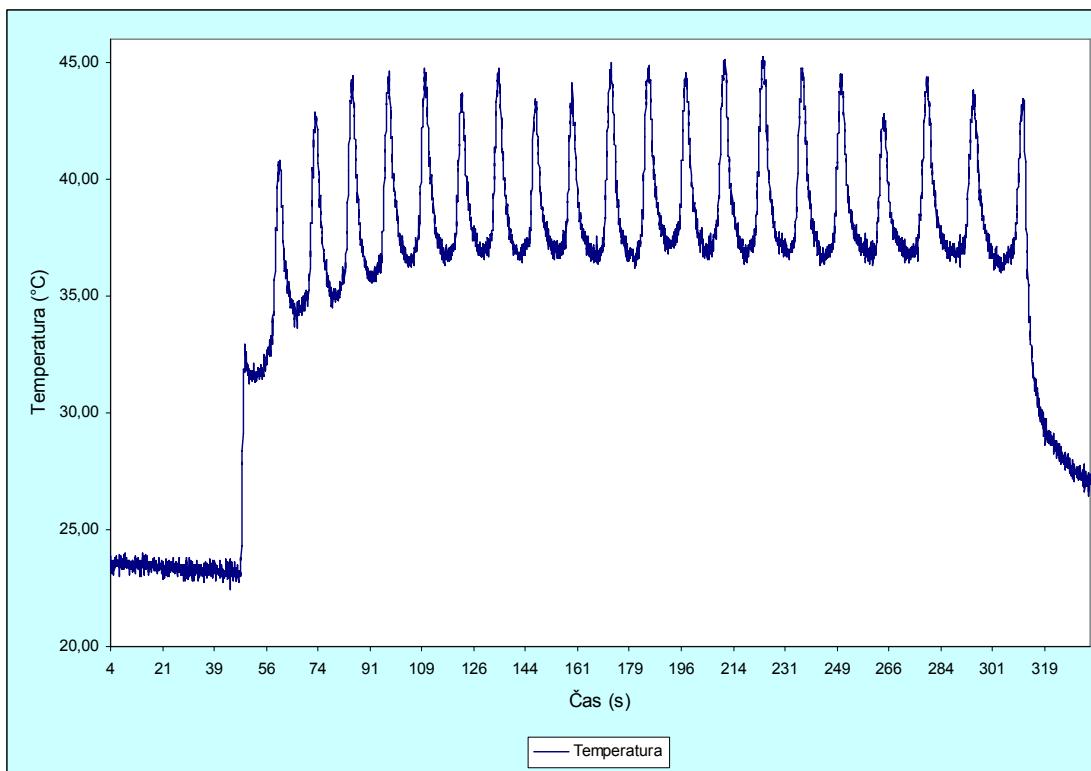
Priloga 1: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=6,66\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



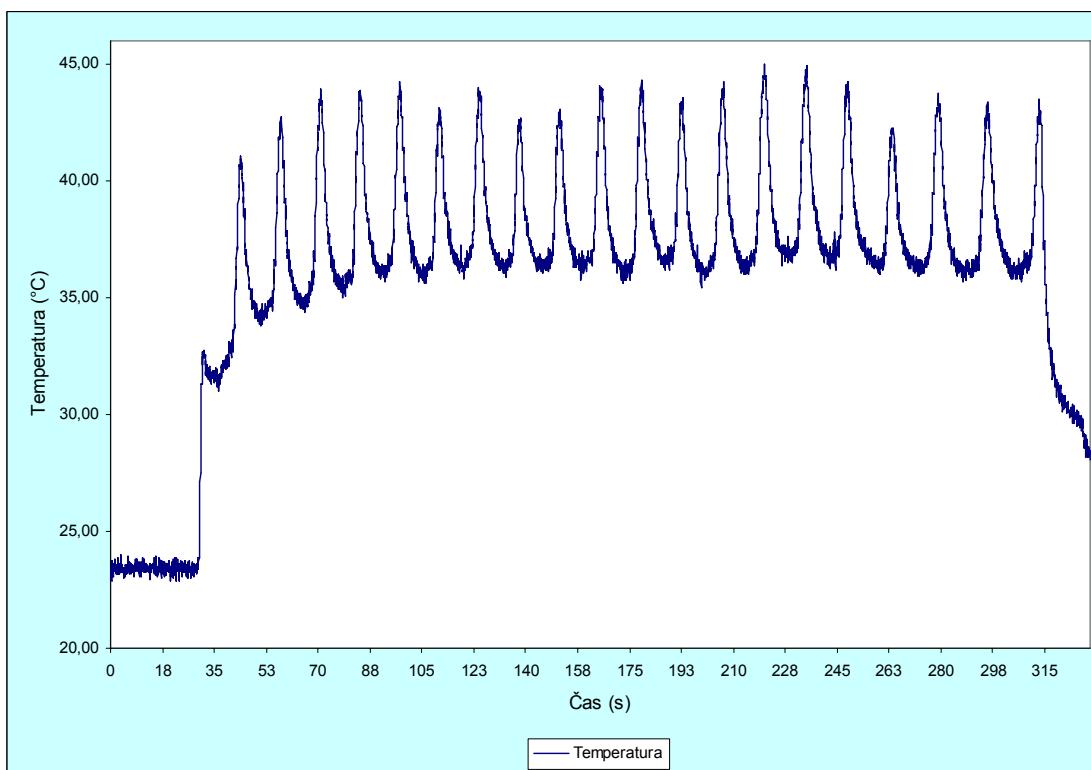
Priloga 2: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=6,42\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



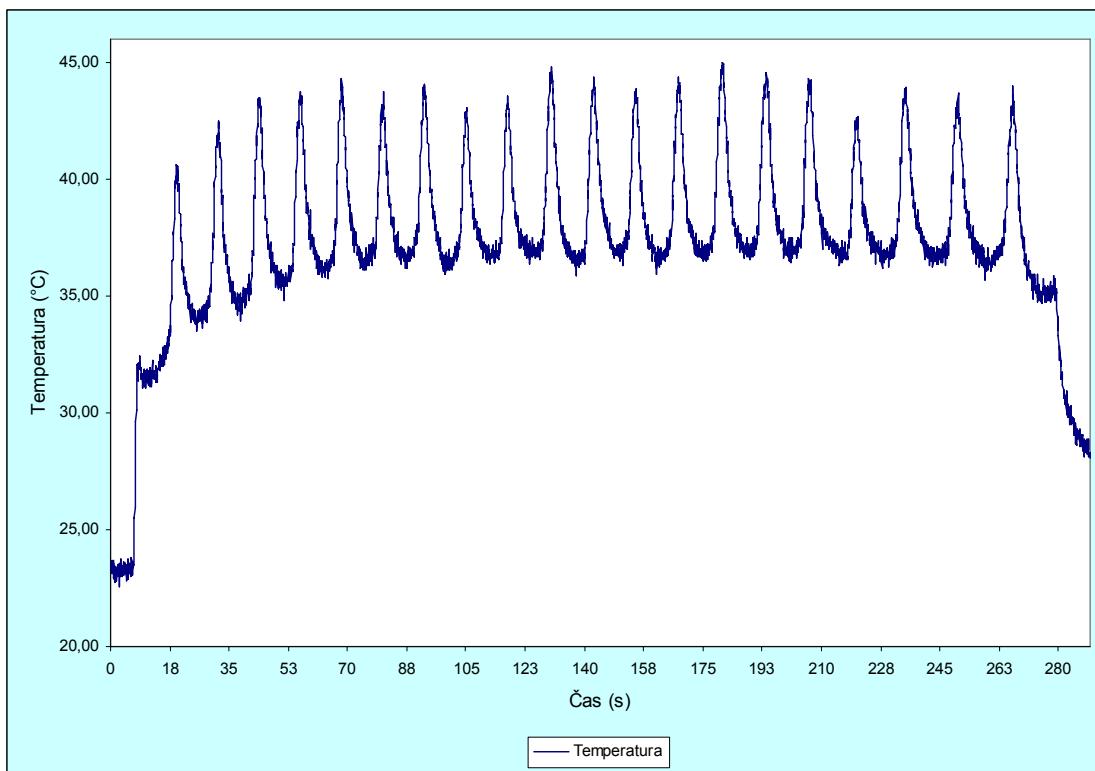
Priloga 3: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=6,18\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



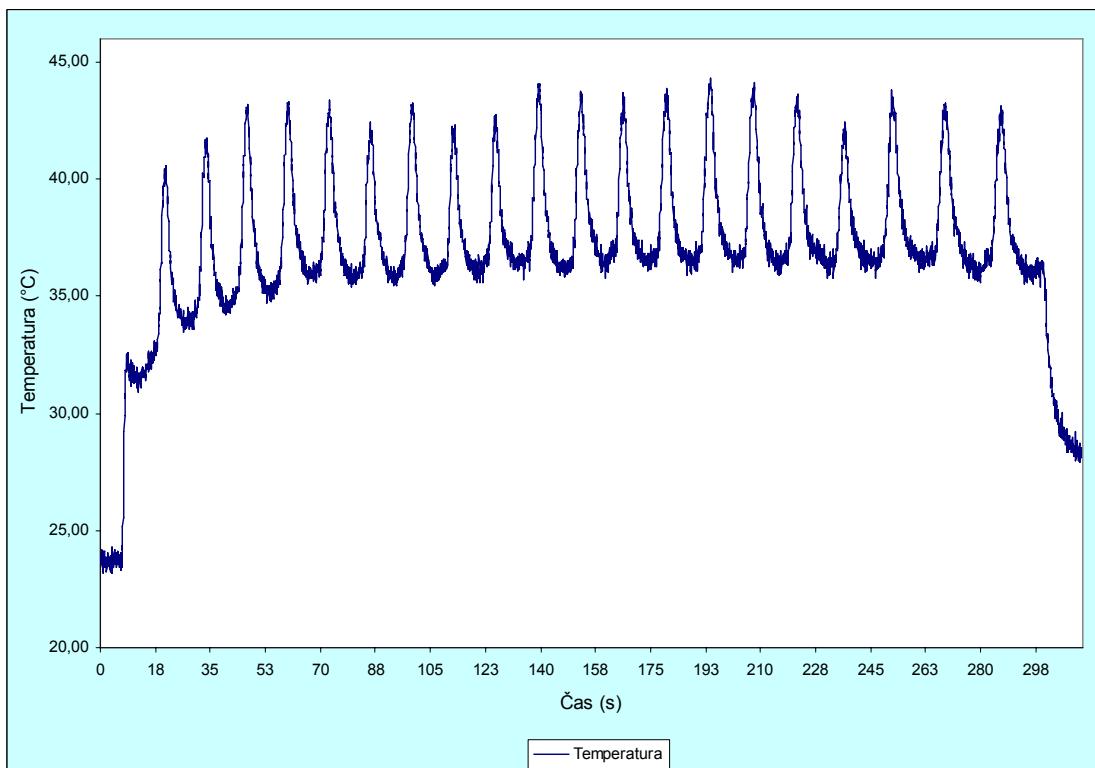
Priloga 4: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



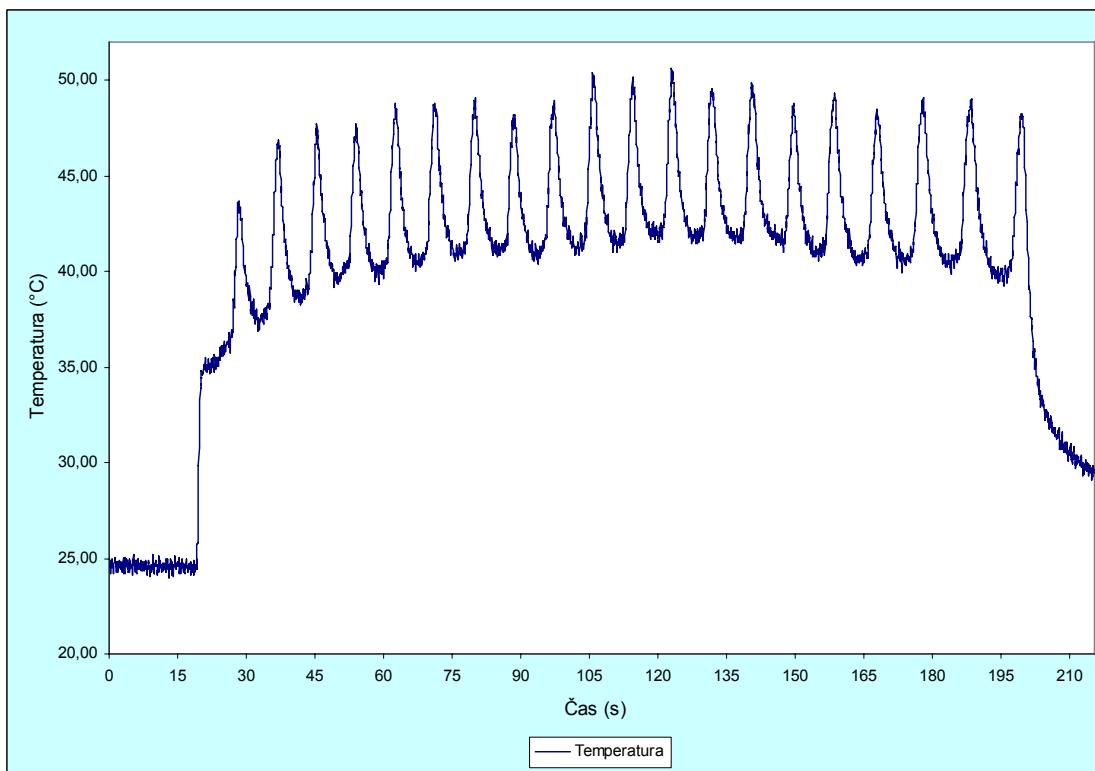
Priloga 5: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=5,42\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



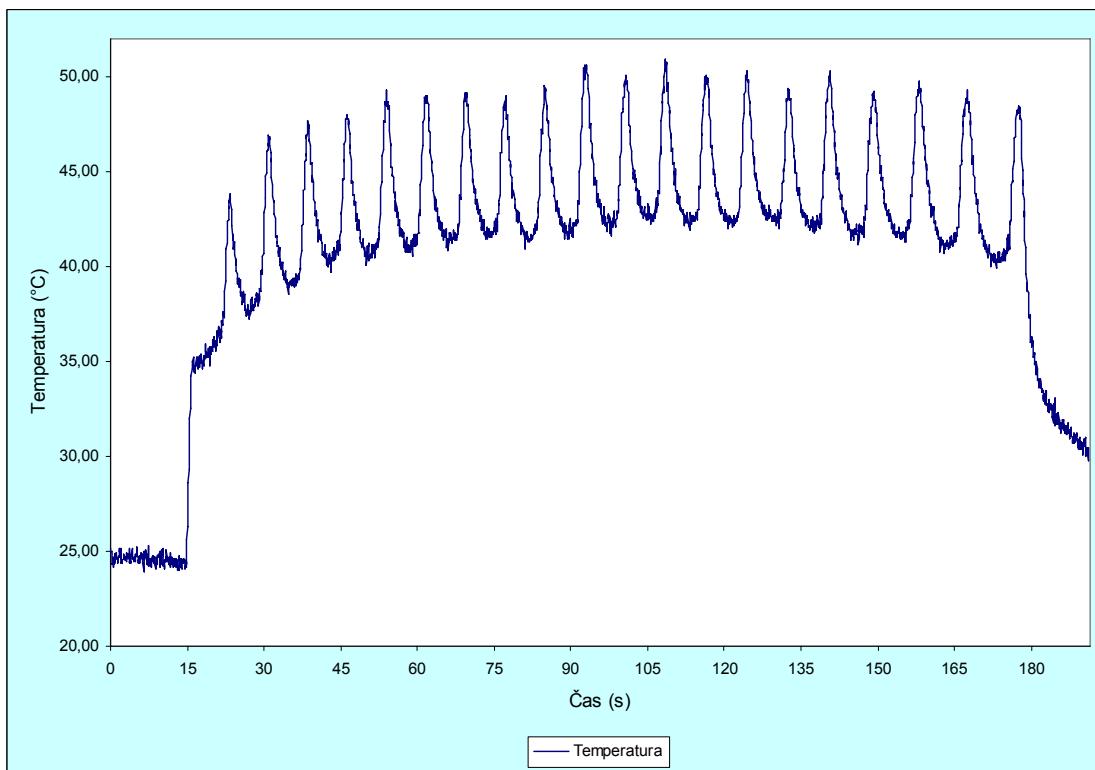
Priloga 6: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=5,17\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



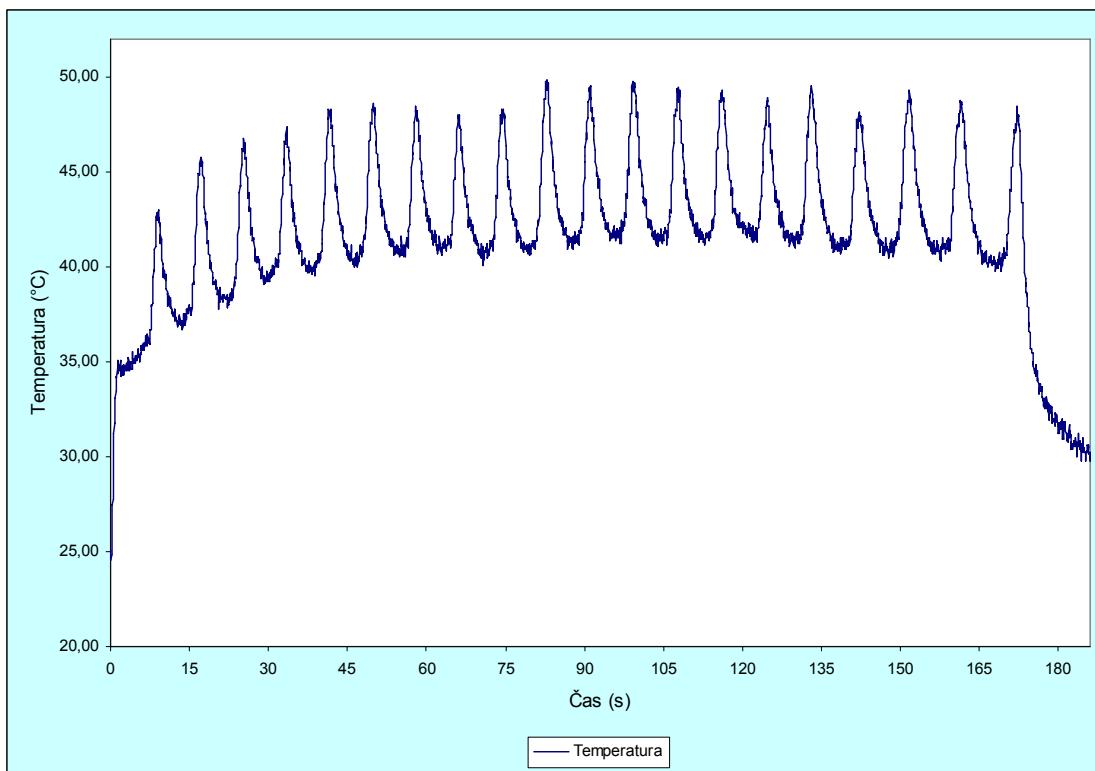
Priloga 7: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,12\text{m/min}$, $v_r=4,92\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



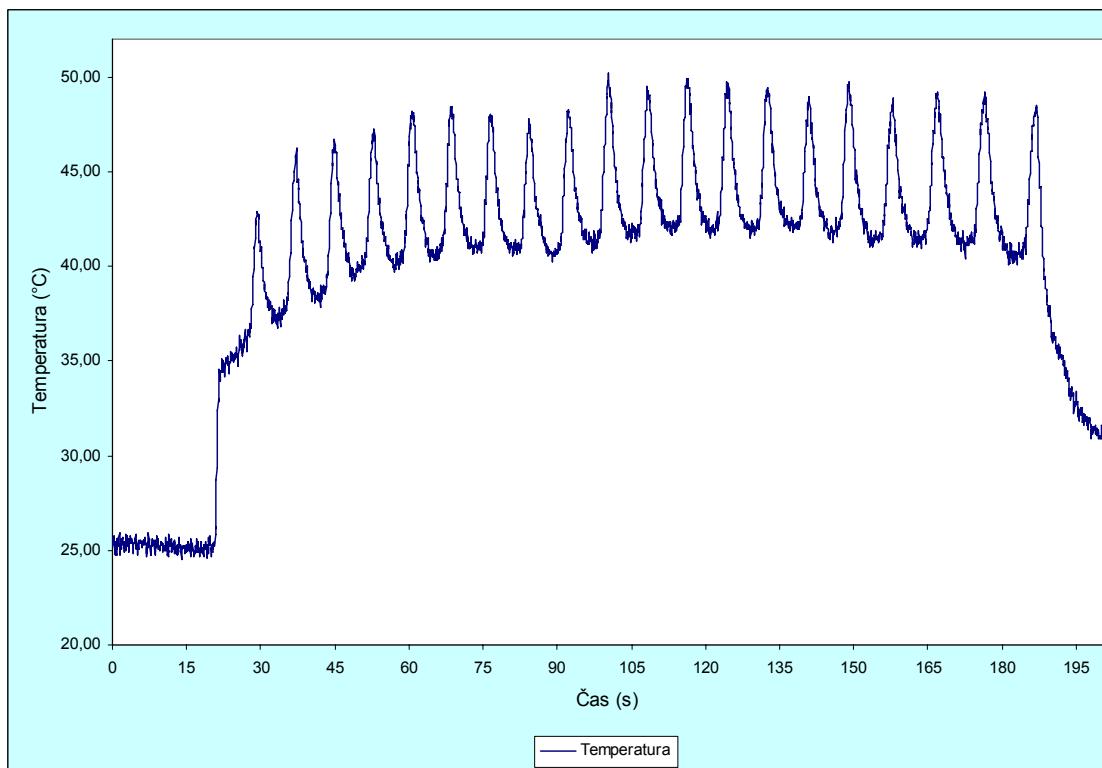
Priloga 8: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=6,54\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



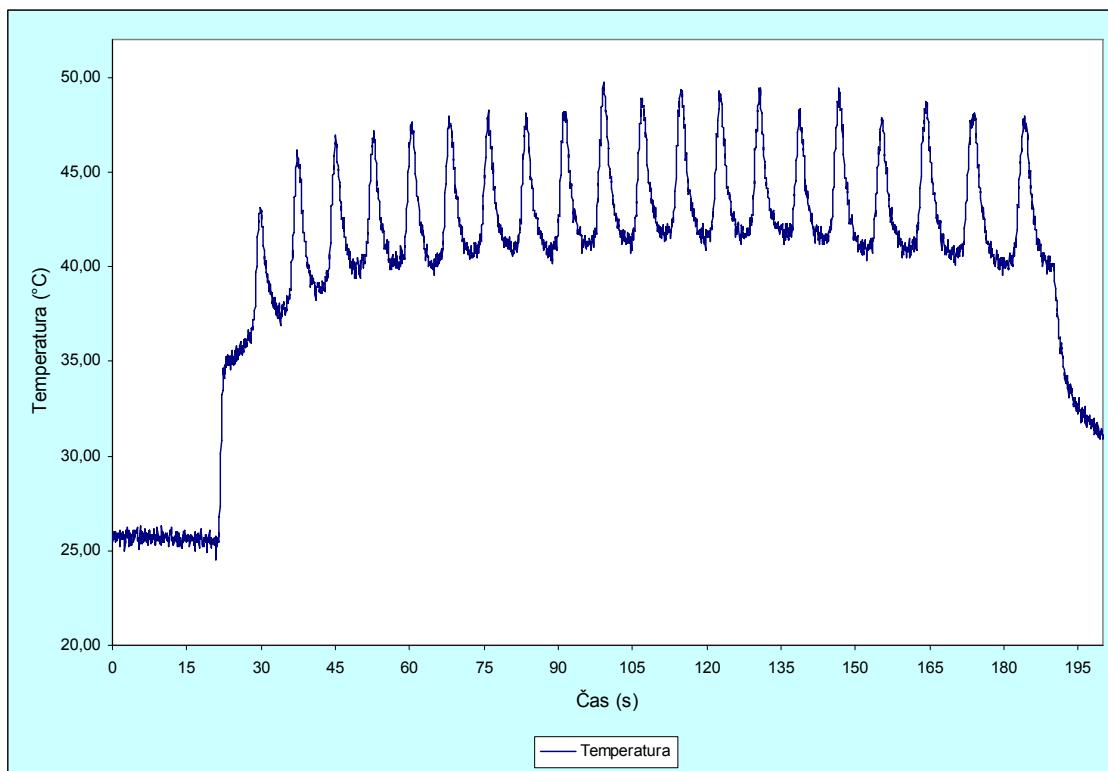
Priloga 9: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=6,29\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



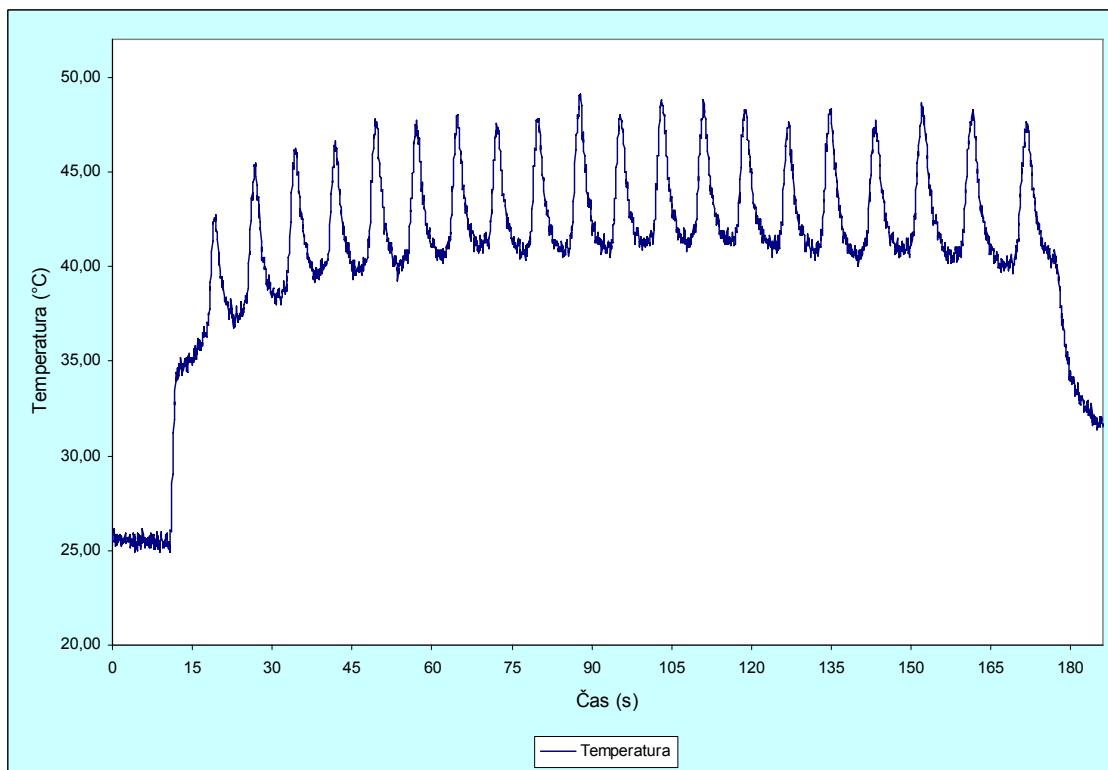
Priloga 10: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=6,04\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



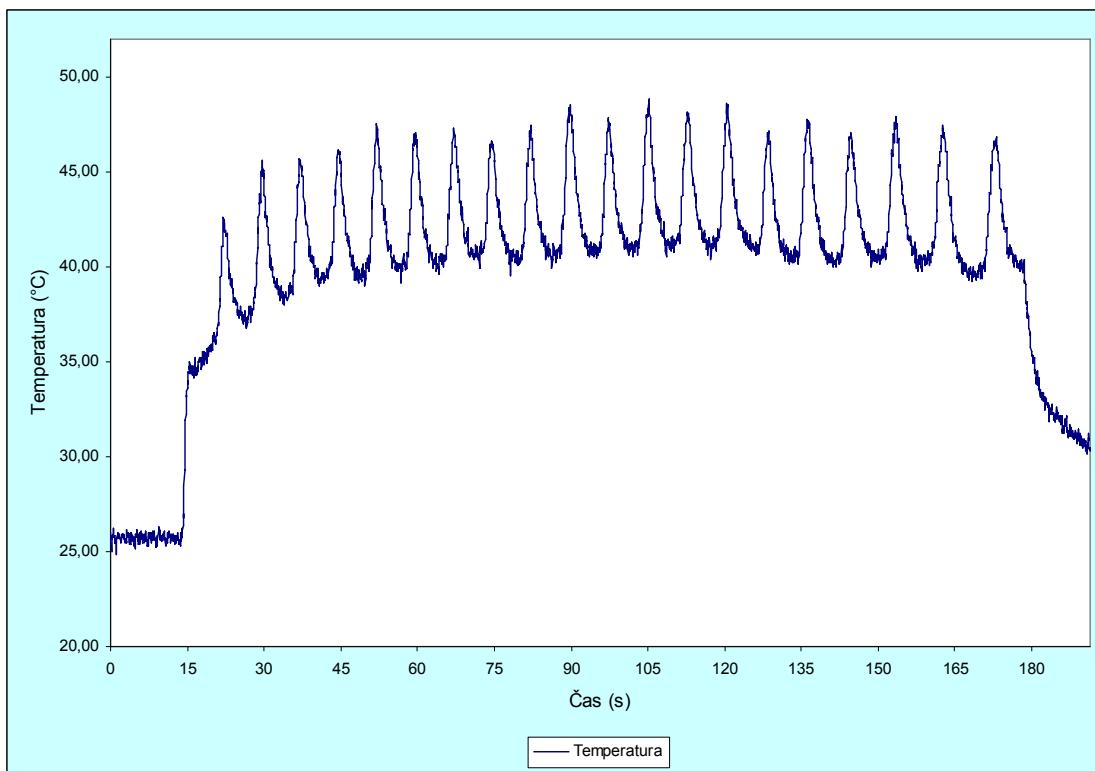
Priloga 11: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,79\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



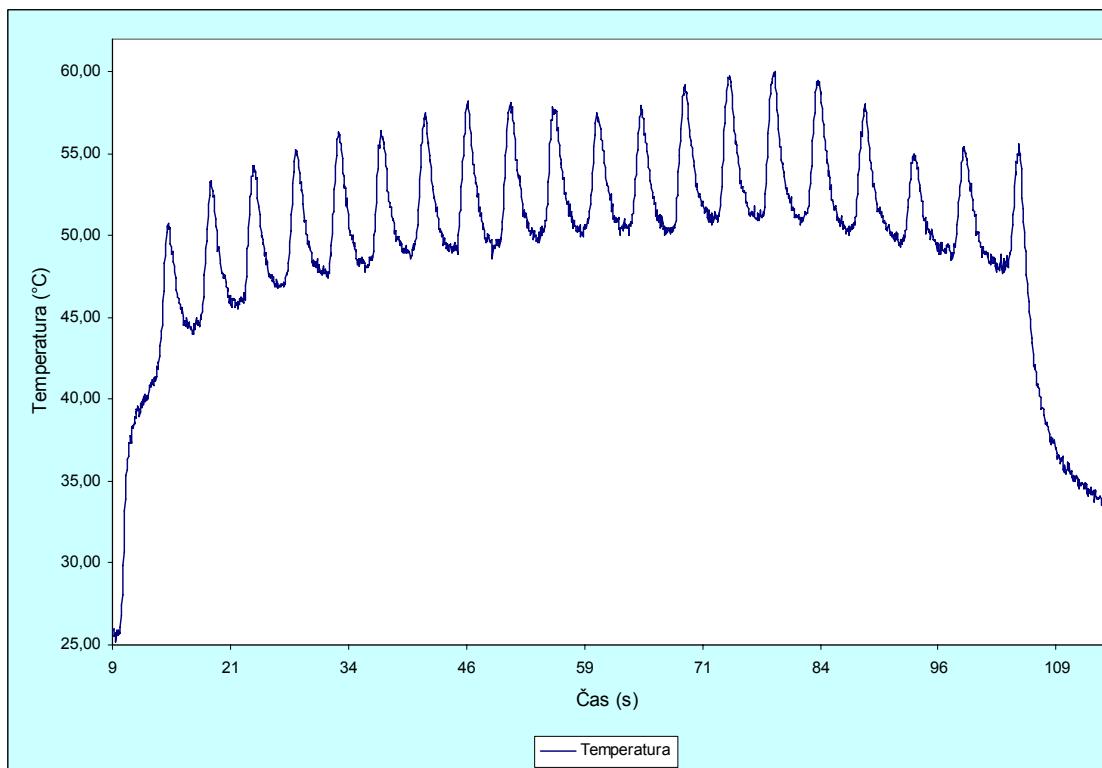
Priloga 12: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,53\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



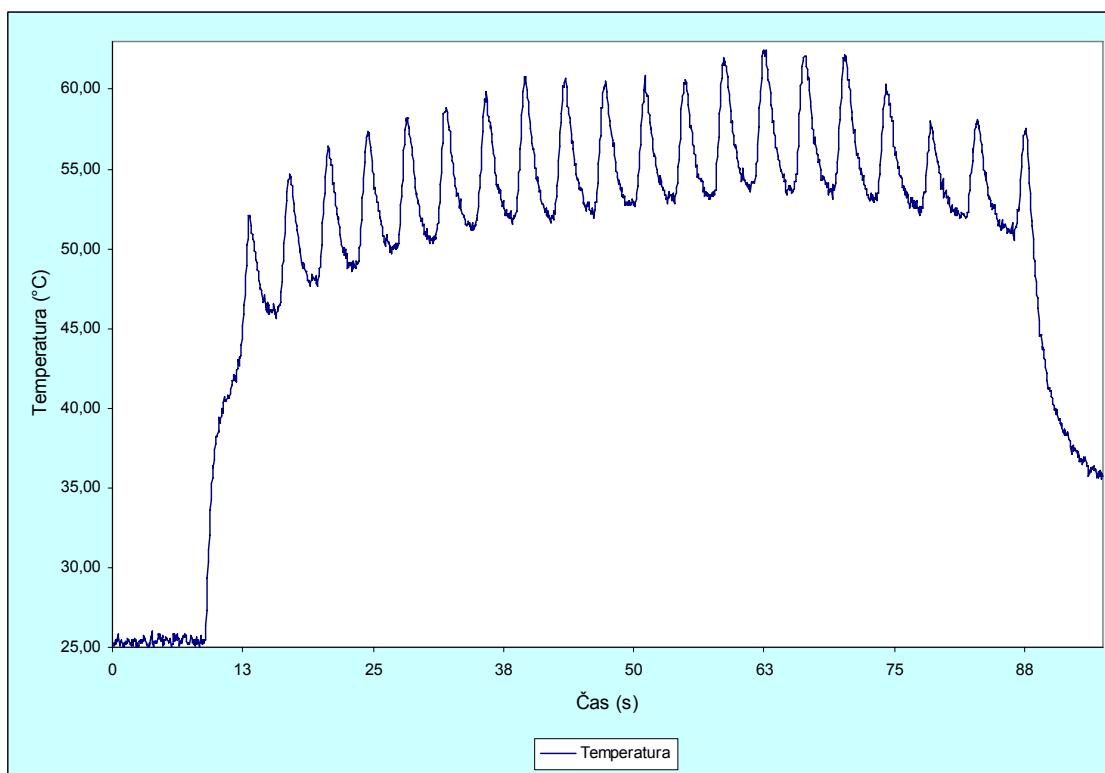
Priloga 13: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,28\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



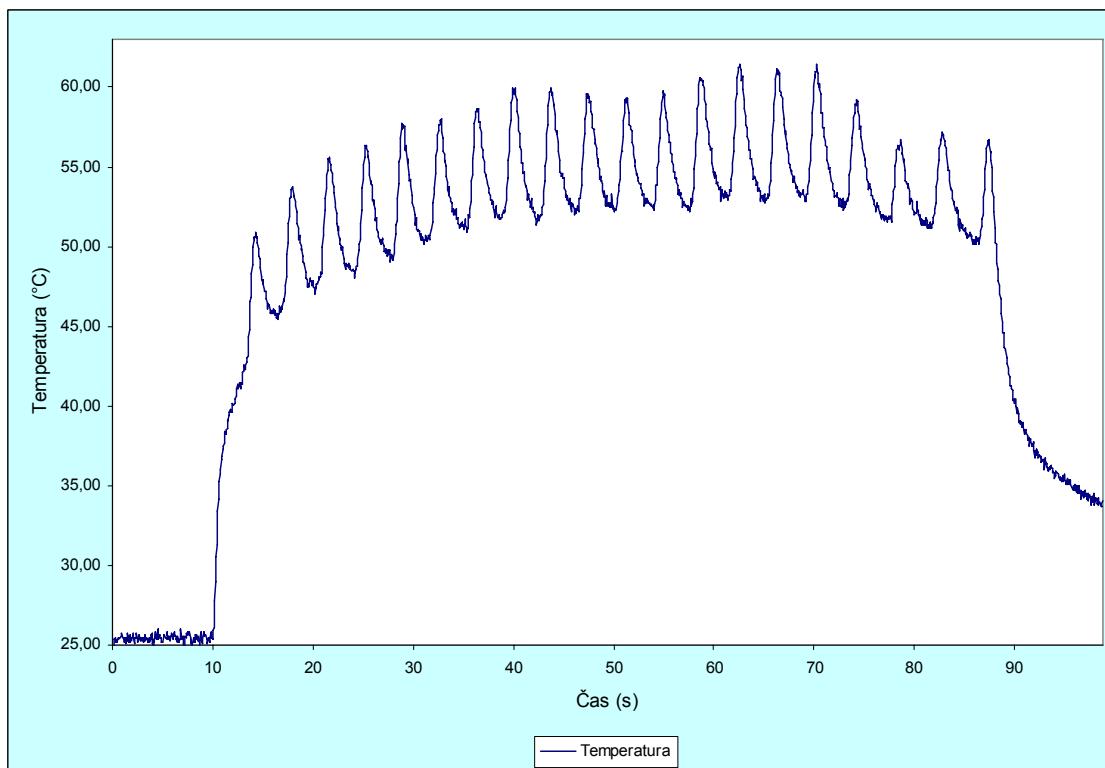
Priloga 14: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,24\text{m/min}$, $v_r=5,02\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



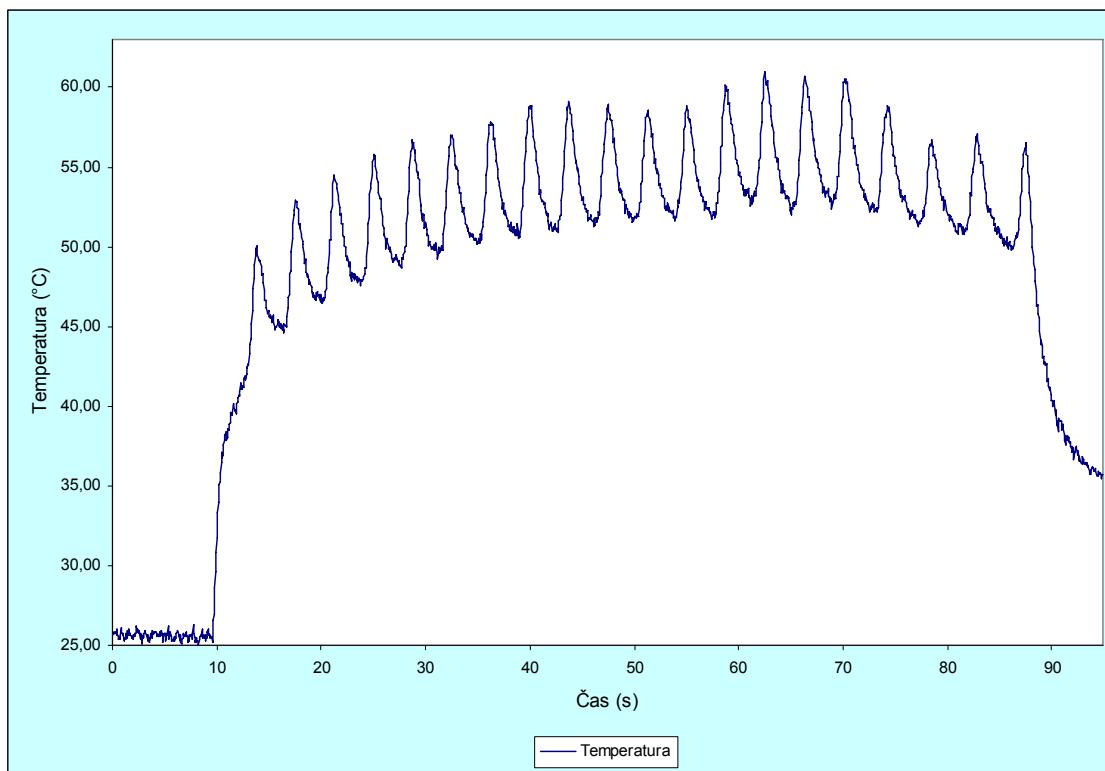
Priloga 15: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,78\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



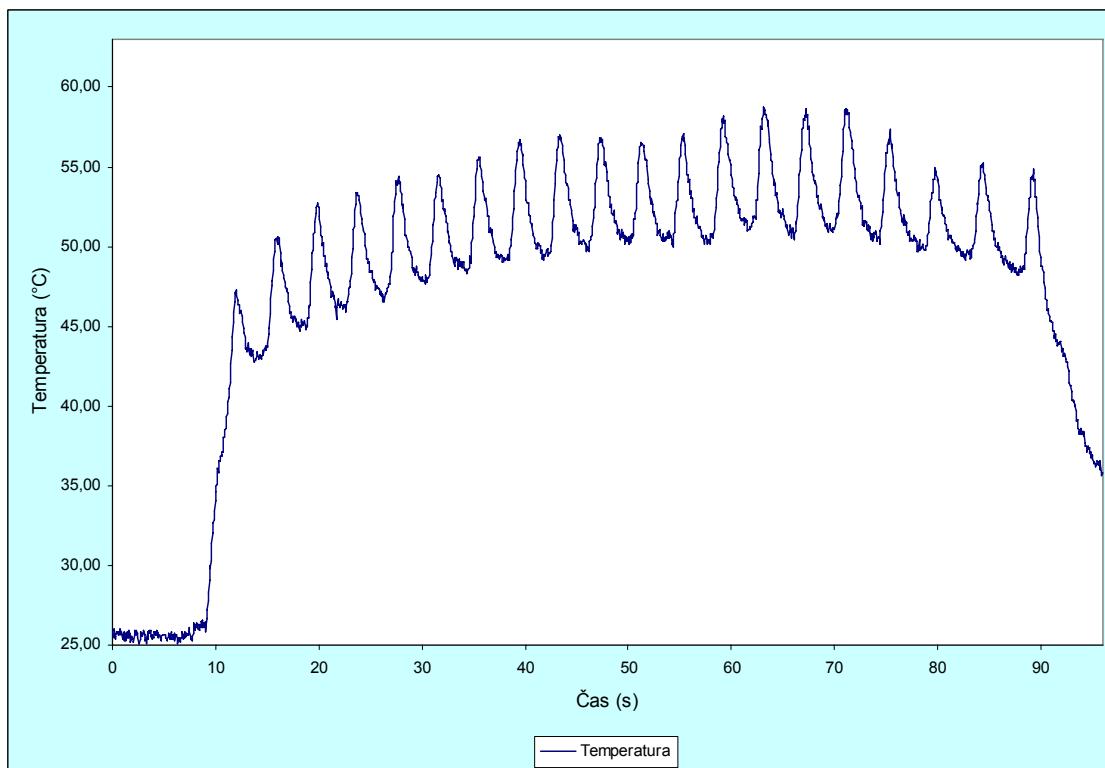
Priloga 16: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,52\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



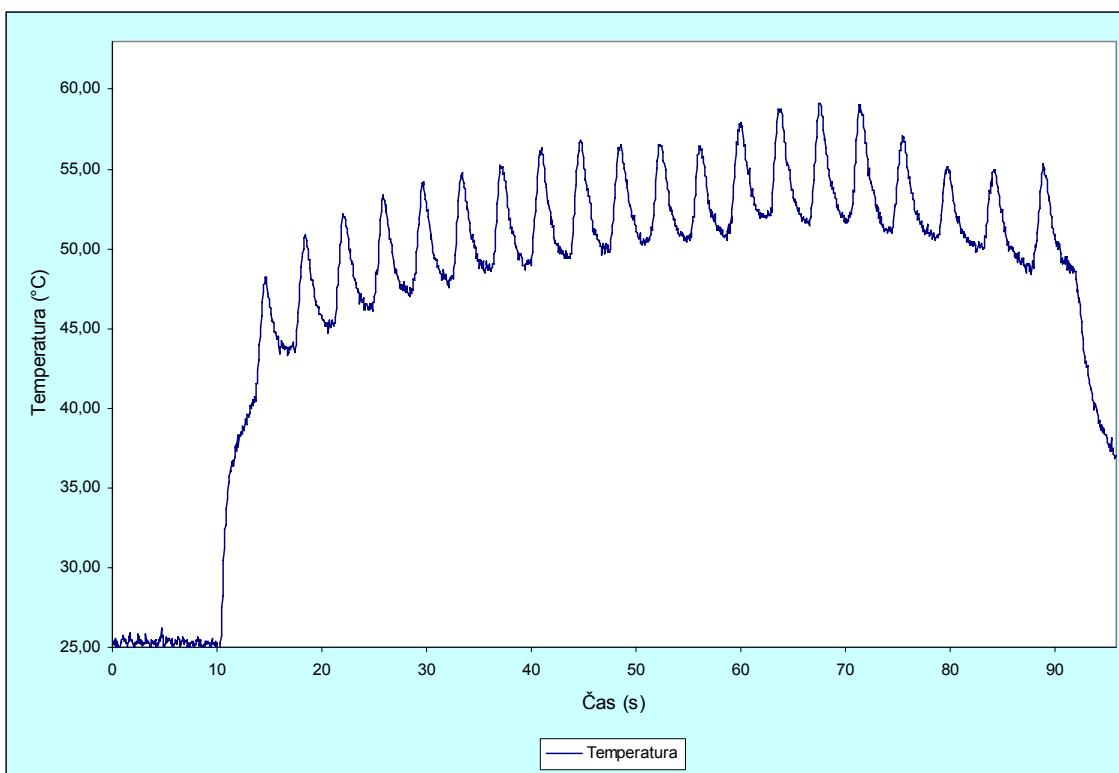
Priloga 17: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,27\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



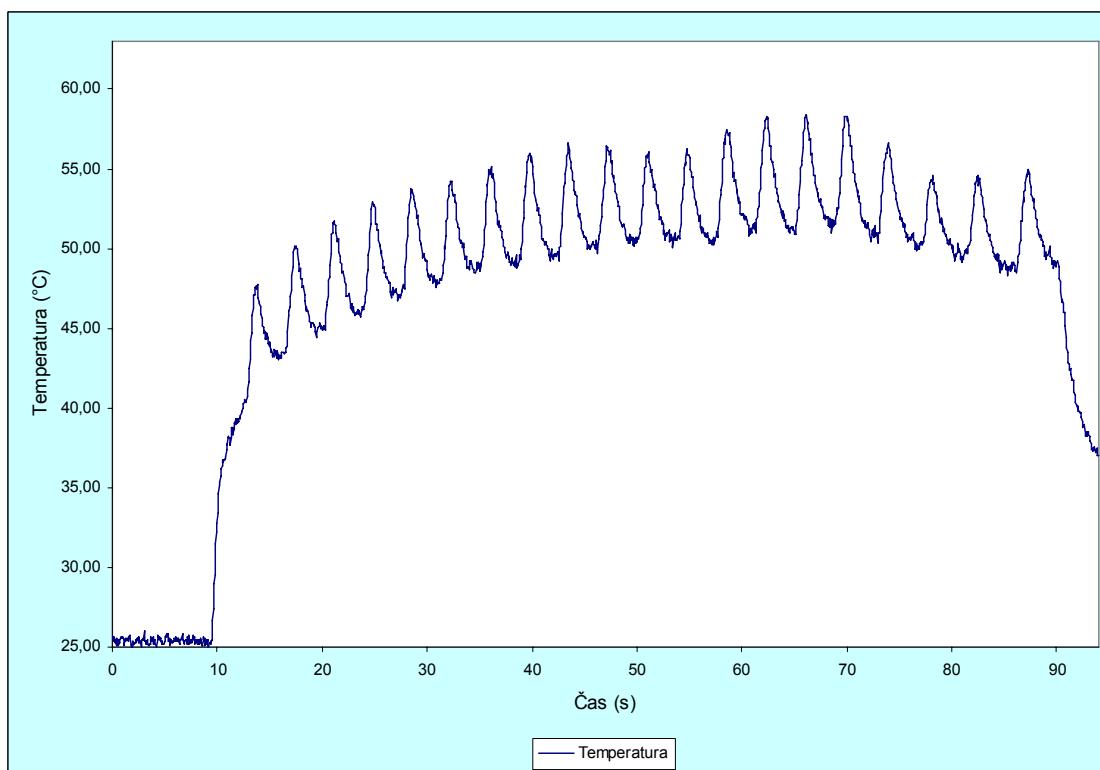
Priloga 18: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=6,02\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



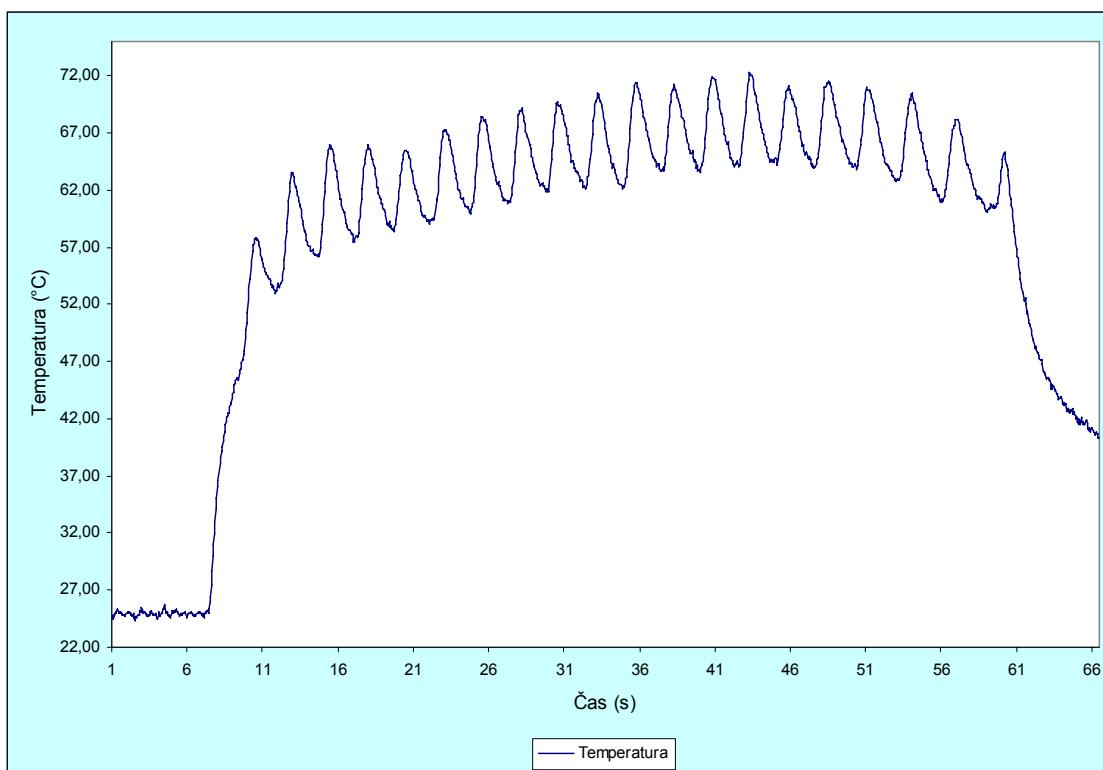
Priloga 19: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=5,76\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



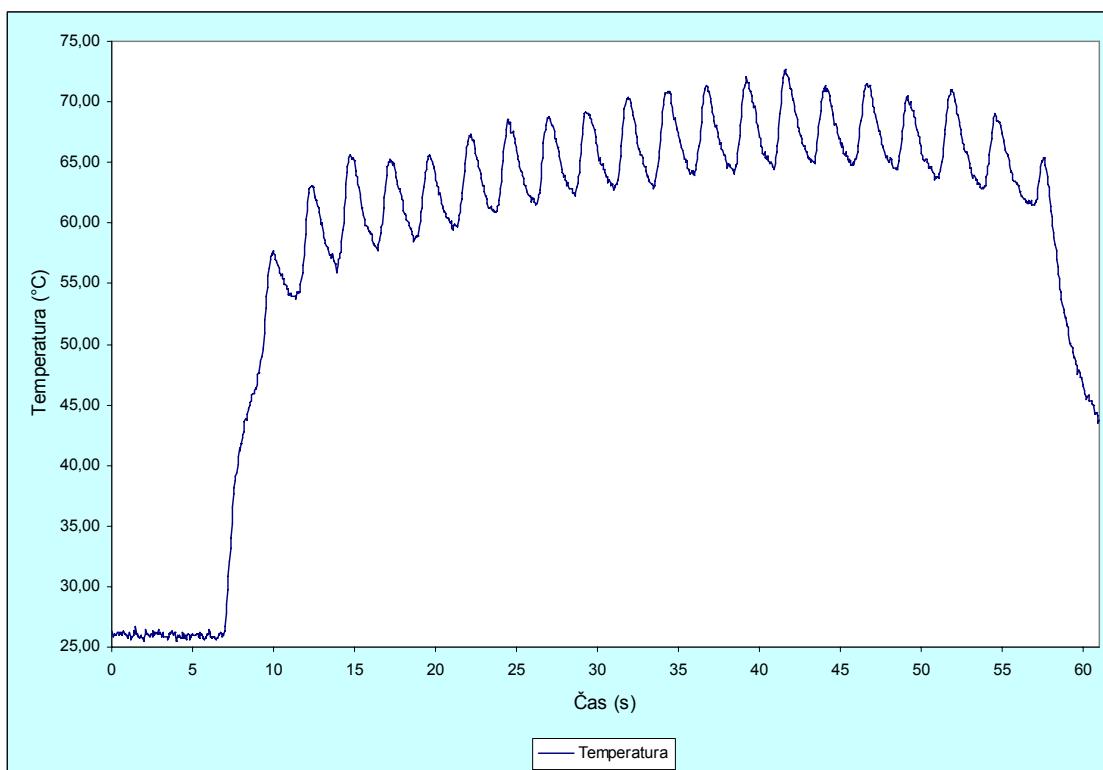
Priloga 20: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=5,51\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



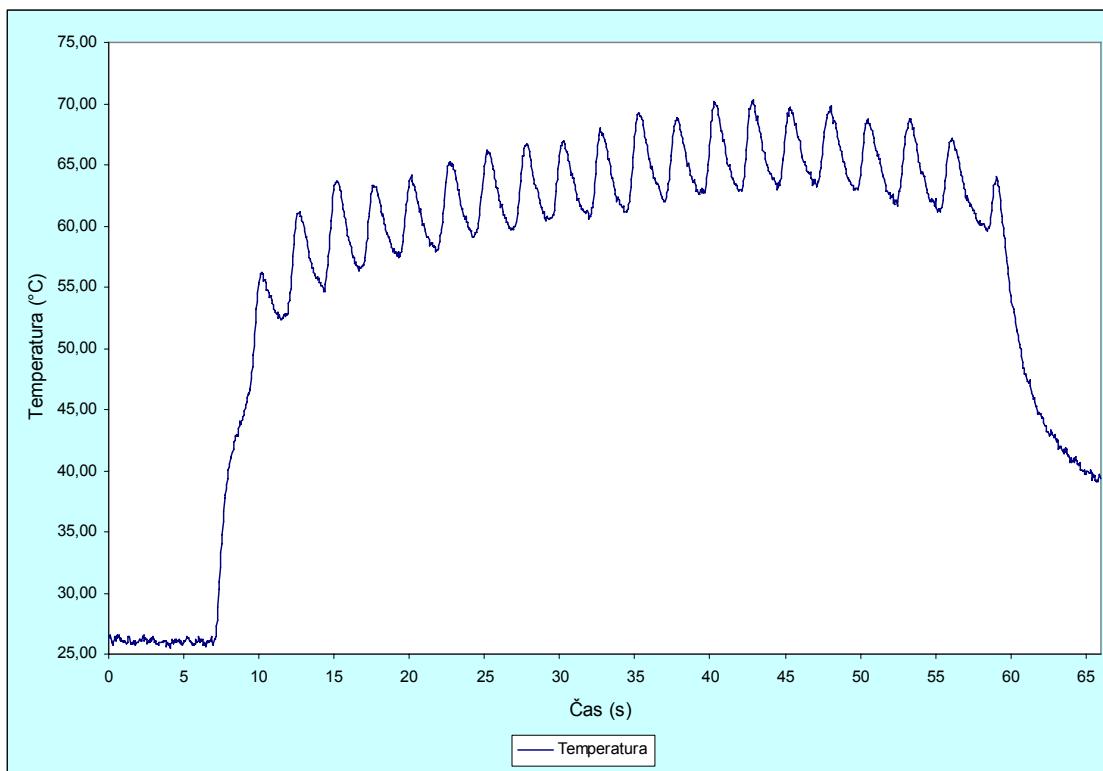
Priloga 21: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,48\text{m/min}$, $v_r=5,26\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



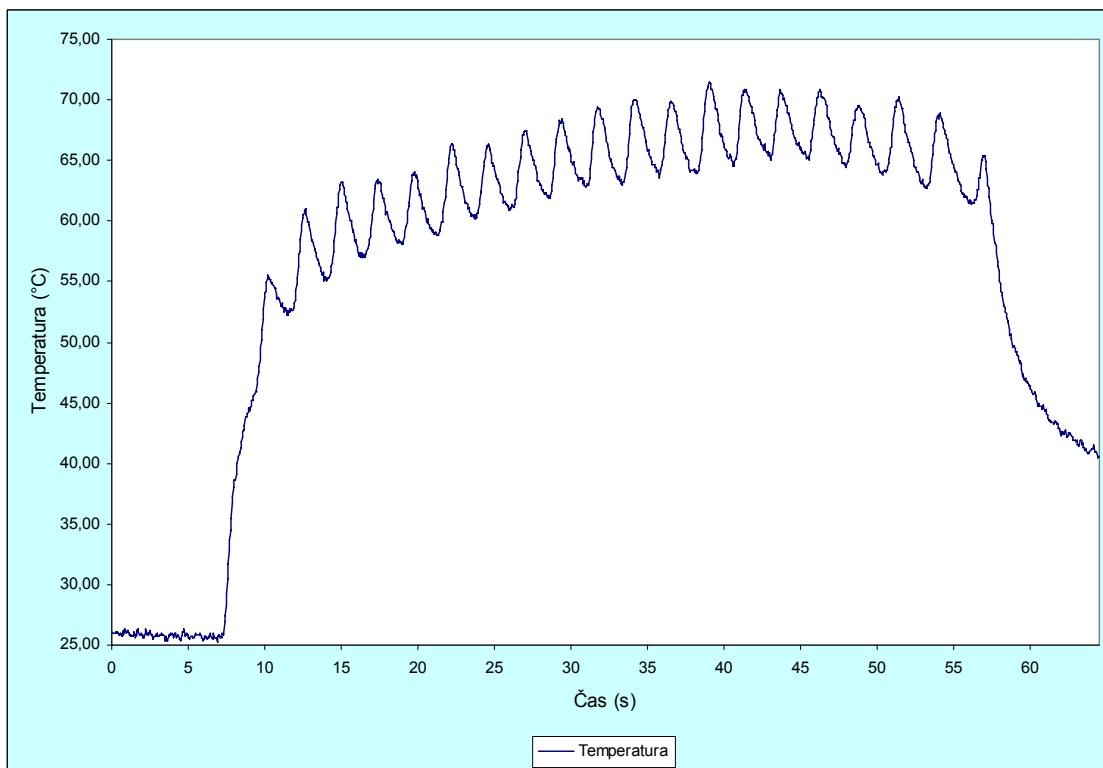
Priloga 22: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,79\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



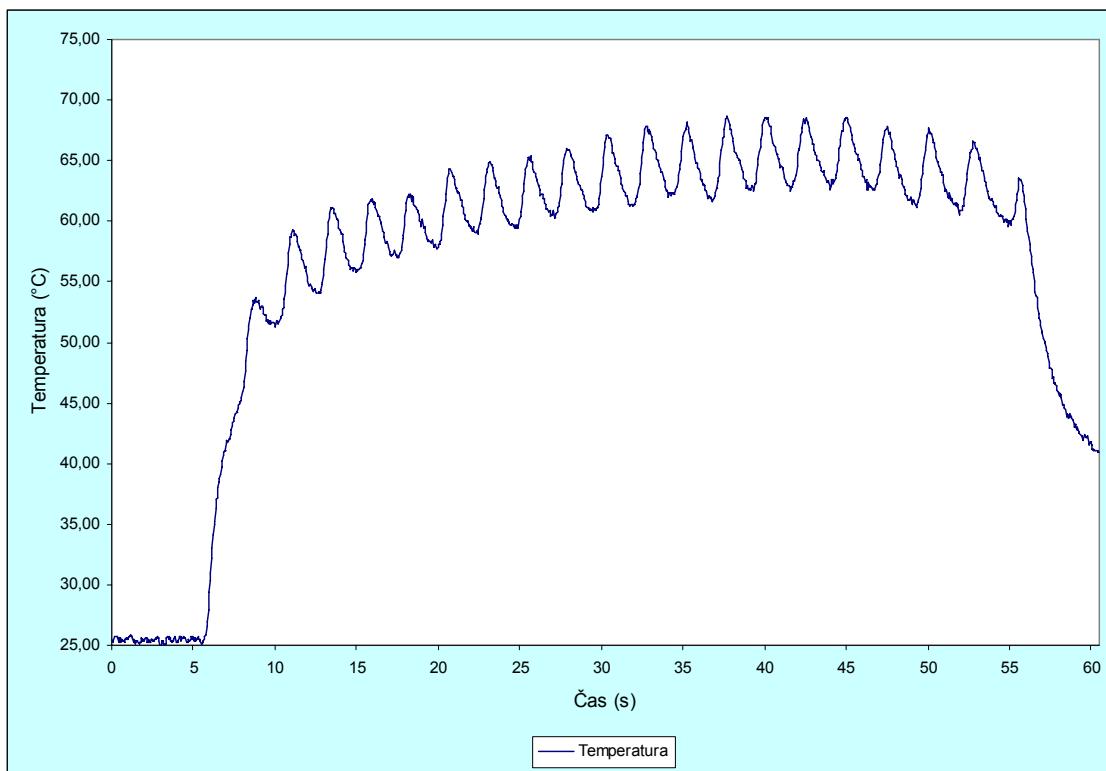
Priloga 23: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,55\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



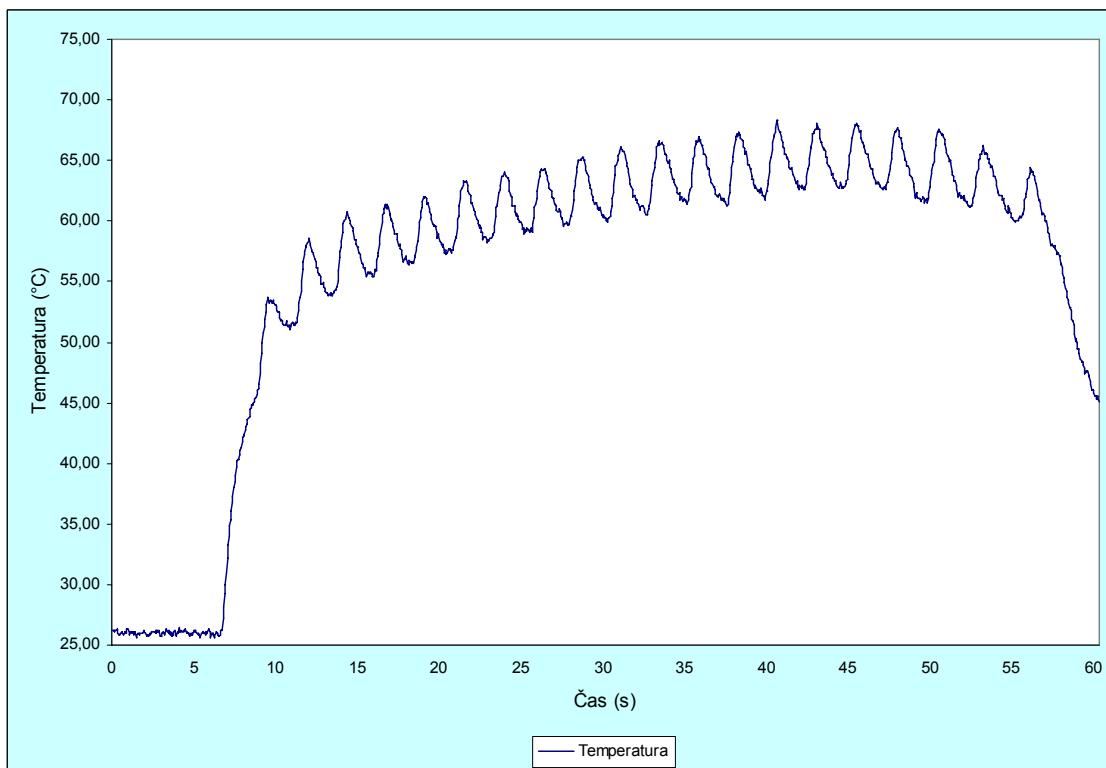
Priloga 24: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,30\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



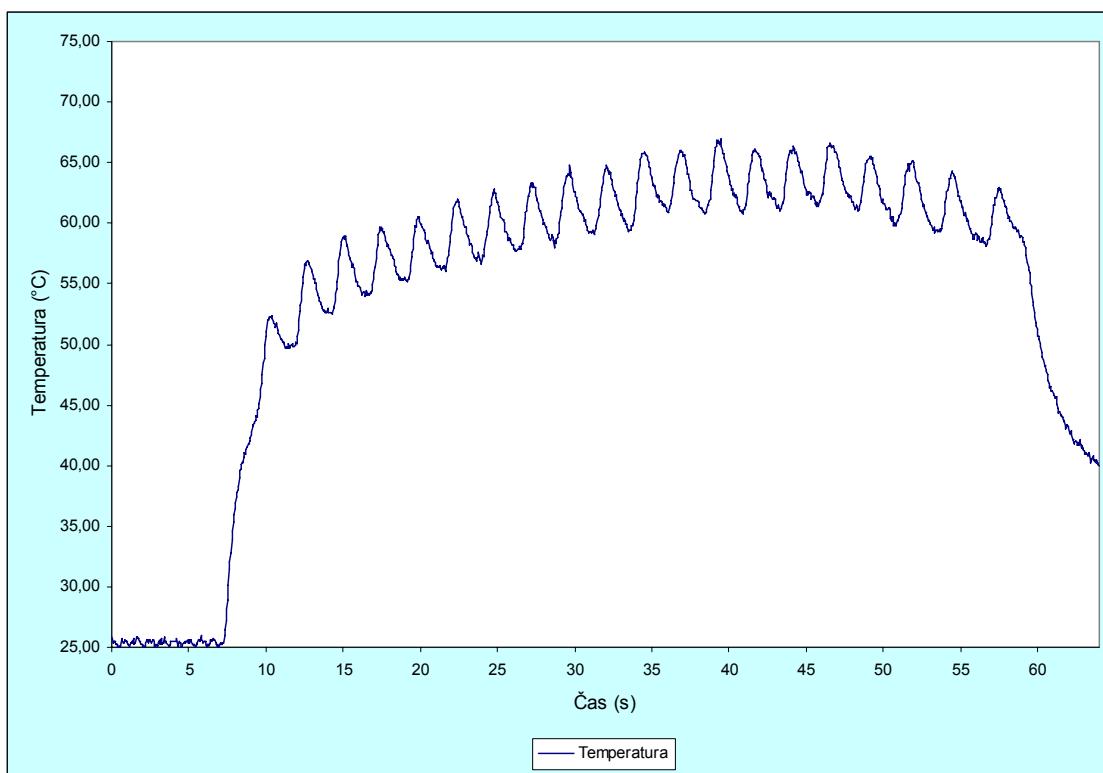
Priloga 25: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=6,05\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



Priloga 26: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=5,80\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



Priloga 27: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=5,55\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$



Priloga 28: Časovni potek meritev temperature pri $v_p=0,72\text{m/min}$, $v_r=5,30\text{m/s}$, $n=1200\text{min}^{-1}$