Steckel-DigiCool: Digitalni dvojček in adaptivni sistem temperaturnega vodenja na hladilni liniji Steckel

Kristjan Cuznar, Zdravko Smolej

SIJ Storitve d.o.o.
E-pošta: kristjan.cuznar@sij-s.si

Steckel-DigiCool: A Digital Twin and Adaptive Temperature Control System for the Steckel Cooling Line

This paper presents the development of a digital twin and a closed-loop adaptive temperature control system for the coil cooling line in a Steckel hot rolling mill. The control system is built around a physics-based heat transfer model that predicts the evolution of strip temperature during transport and cooling, incorporating the effects of air, water, and motion. A self-learning mechanism continuously adapts the model using real process measurements by updating the effective heat transfer coefficients, inspired by industrial Coiler Temperature Control (CTC) strategies. A tracking mechanism enables precise mapping of process conditions to individual strip segments.

The system operates in real time above the Level 2 (L2) automation layer, generating actuator commands for the cooling valves while accounting for practical industrial constraints such as valve dead times and legacy communication interfaces. Validation using production data confirms high prediction accuracy, stable closed-loop performance, and robustness across different steel grades.

1 Uvod

Zagotavljanje ustrezne temperature navijanja traku po zaključku vročega valjanja je eden ključnih dejavnikov, ki vplivajo na nadaljnjo obdelavo ali celo na končne lastnosti materiala [1]. Čeprav je fizikalno ozadje toplotnih tokov dobro poznano, ostaja izziv učinkovita implementacija natančnega, robustnega in hitrega temperaturnega vodenja v realnem industrijskem okolju.

Prenos toplote med trakom in okolico poteka preko več vzporednih mehanizmov, kot so sevanje oz. radiacija, prisilno hlajenje z vodo, konvekcija in toplotna prevodnost preko pogonskih valjčnic. Natančno modeliranje tega procesa je zahtevno zaradi njihove medsebojne interakcije ter zaradi številnih vplivnih procesnih parametrov, kot so hitrost traku, materialne lastnosti, tlak in temperatura hladilne vode ter dinamične spremembe pogojev med posameznimi valjavskimi cikli [2]. Dodatno ga otežujejo industrijske omejitve, kot so dolgi mrtvi časi aktuatorjev ter zastarela komunikacija in infrastruktura sistemov vodenja.

Ponovljiva točnost napovedi temperature v fazi navijanja je neposredno povezana z zanesljivostjo modela in zmogljivostjo njegove adaptacije na realne pogoje. Pri tem se kot učinkovita rešitev uveljavlja uporaba adaptivnih mehanizmov, ki na osnovi sprotne primerjave med izračunano in izmerjeno temperaturo prilagajajo koeficiente prenosa toplote [3, 4]. S tem pristopom se zmanjšuje akumulacija sistematičnih napak in kompenzira vpliv spreminjajočih se pogojev. Samoučeči oz. adaptivni modeli tako predstavljajo temelj za vzpostavitev sodobnih digitalnih dvojčkov, ki lahko služijo ne le za spremljanje, temveč tudi za aktivno vodenje procesa [5].

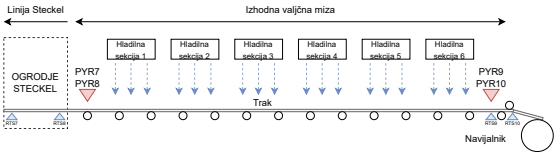
V tem kontekstu, v prispevku predstavimo razvoj digitalnega dvojčka in zaprtozančnega adaptivnega sistema temperaturnega vodenja na hladilni liniji vročega vljanja (Steckel). Osnova rešitve predstavlja poenostavljen fizikalni model prenosa toplote, dopolnjen z algoritmom za sledenje segmentom traku in adaptivno zanko na osnovi realnih procesnih podatkov. Integracija sistema je hierarhično pozicionirana nad nazdornim sistemom procesa, ki omogoča generiranje ukazov za vklop ter izklop aktuatorjev (ventilov) v realnem času. Prikazani so rezultati validacije modela in zaprtozančnega sistema, ki potrjujejo ustreznost predlaganega pristopa za uporabo v dejanskem industrijskem okolju.

2 Matematični model toplotnega prenosa

Za opis termodinamičnega odziva traku med prehodom skozi hladilno linijo je bil razvit poenostavljen matematični model toplotnega prenosa, ki omogoča napovedovanje temperaturnega profila v realnem času. Model služi kot osnova za nadaljnje funkcionalnosti, vključno s simulacijo procesa in izvedbo algoritmov vodenja.

Obravnavana hladilna linija je sestavljena iz šestih zaporednih sekcij (slika 1). Vsako sekcijo nadzoruje glavni pnevmatski ventil, ki odpira oziroma zapira dotok hladilne vode v šobe, nameščene nad in pod trakom. Hlajenje poteka z razprševanjem vode preko šob, kar omogoča intenzivno in lokalno usmerjeno odvajanje toplote iz površine traku, potrebno za doseganje ciljne temperature, določene s tehnološkimi predpisi.

Na vstopu in izstopu iz hladilne linije sta nameščena para infrardečih pirometrov (PYR7, PYR8 na vhodu in PYR9, PYR10 na izhodu), ki omogočajo neposredno spremljanje temperature traku. Poleg temperaturnih meritev sistem prejema še trenutne hitrosti traku, statuse vseh šestih ventilov ter signale prisotnosti traku prek štirih rota sond (RTS7–RTS10).



Slika 1: Shematski prikaz hladilne linije

2.1 Model procesa hlajenja

Model temelji na reševanju poenostavljene enačbe prehajanja toplotnega toka v eni dimenziji, saj smo za dosego hitrosti izračuna in robustnosti v industrijskem okolju izbrali 1D pristop, ki zagotavlja zadovoljivo točnost. Hladilna linija je razdeljena na 6 enakih segmentov v vsaki od 6 hladilnih sekcij, kar skupaj pomeni 36 simulacijskih enot vzdolž celotne linije.

Model vključuje naslednje mehanizme prenosa toplote [3, 5, 6]:

- toplotno sevanje (radiacija),
- prisilno hlajenje z vodo,
- ohlajanje zaradi gibanja traku (modelirano z vplivom hitrosti).

2.1.1 Model toplotnega sevanja

Toplotni tok zaradi sevanja se izračuna na podlagi Stefan–Boltzmannove enačbe:

$$q_r = \varepsilon\sigma\left(T^4 - T_a^4\right), \tag{1}$$

kjer so: q_r gostota toplotnega toka zaradi sevanja, ε emisivnost, σ Stefan–Boltzmannova konstanta, T trenutna temperatura traku ter T_a temperatura okolice.

2.1.2 Model hlajenja z vodo

Toplotni tok zaradi hlajenja z vodnim pršenjem se oceni kot:

$$q_w = \alpha_w\left(T - T_w\right), \tag{2}$$

kjer so: q_w gostota toplotnega toka zaradi hlajenja z vodo, α_w koeficient prenosa toplote z vodo, T trenutna temperatura traku, T_w temperatura hladilne vode.

2.1.3 Korekcija zaradi hitrosti gibanja traku

Vpliv hitrosti traku na stopnjo hlajenja je v modelu upoštevan z naslednjo korekcijo:

$$v_{corr} = \left(\frac{\max(|v|, v_{\min})}{v_{nom}}\right)^{Z_v}, \tag{3}$$

kjer so: v trenutna hitrost traku, $v_{\min}$ minimalna dovoljena hitrost (za numerično stabilnost), v_{nom} nominalna hitrost procesa in Z_v adaptivni faktor, ki določa vpliv hitrosti na hlajenje.

2.1.4 Model spremembe temperature traku

Skupna sprememba temperature traku v posameznem segmentu temelji na energijski bilanci in je izražena kot:

$$\Delta T = a_s \cdot q \cdot \Delta t, \tag{4}$$

kjer je q skupna gostota toplotnega toka, Δt časovni korak in a_s faktor, ki zajema materialne lastnosti traku:

$$a_s = \frac{1{,}25}{\rho\, c\, h}, \tag{5}$$

pri čemer so: ρ gostota materiala, c specifična toplota in h debelina traku. Faktor $1{,}25$ upošteva asimetrijo v učinkovitosti hlajenja, saj je zaradi pogonskih valjčnic prispevek hlajenja s spodnje strani zmanjšan.

Skupna gostota toplotnega toka vključuje prispevke sevanja in hlajenja z vodo, uteženе z adaptivnimi faktorji Z_r in Z_w ter korigirane glede na hitrost traku:

$$q = (Z_r \cdot q_r + Z_w \cdot q_w \cdot W_{eff}) \cdot v_{corr}, \tag{6}$$

kjer je W_{eff} stopnja odprtosti ventila hladilne sekcije, v_{corr} pa korekcijski faktor zaradi hitrosti traku.

2.1.5 Modeliranje mrtvih časov ventilov

Logika modeliranja mrtvih časov je implementirana z diskretnimi koraki, pri čemer vsak ventil sledi lastni dinamiki mrtvega časa. Učinek hlajenja se v modelu aktivira šele, ko so vsi pogoji izpolnjeni — torej, ko je ventil odprt in je črpalka aktivna. Hitrost odpiranja in zapiranja ventila, ter posledično učinek hlajenja (W_{eff}), sta modelirana linearno:

- ob odprtju ventila se efektivna vrednost povečuje s hitrostjo $\Delta_\uparrow$ do maksimalne vrednosti,
- ob zaprtju ventila pa se vrednost zmanjšuje s hitrostjo $\Delta_\downarrow$ proti nič.

2.2 Sistem sledenja traku

Osnovna ideja sledenja položaja traku temelji na numerični integraciji hitrosti z linearno interpolacijo med posodobitvami, kar omogoča realnočasovno oceno lege posameznega elementa traku:

$$x(t+\Delta t) = x(t) + \left(v_{\text{prej}} + \frac{t - t_{\text{nov}}}{t_{\text{nov}} - t_{\text{prej}}} \cdot (v_{\text{nov}} - v_{\text{prej}})\right) \cdot \Delta t, \tag{7}$$

kjer je x lega elementa traku, v_{prej} prejšnja izmerjena hitrost, v_{nov} zadnja izmerjena hitrost, t_{prej} in t_{nov} čas prejšnje in zadnje posodobitve ter Δt korak integracije.

Zaradi počasnih posodobitev hitrosti uporaba linearne interpolacije zmanjša numerične napake, ki bi se pojavile pri osnovni Eulerjevi integraciji s konstantno hitrostjo.

Sistem sledenja v vsakem časovnem koraku oceni premik traku glede na trenutno hitrost linije. Ko akumulirani premik preseže dolžino enega segmenta, se vsi temperaturni podatki pomaknejo naprej po liniji — to pomeni, da se vrednosti za vse obstoječe segmente prestavijo proti izhodu hladilne linije. Na vhodno stran modela se vpiše izmerjena temperatura na vstopnem delu hladilne linije.

2.3 Adaptivni mehanizem

Model vključuje adaptivni mehanizem, ki omogoča sprotno prilagajanje parametrov na podlagi razlik med izhodno temperaturo modela (T_{mod}) in dejansko izmerjeno temperaturo na koncu hladilne linije (T_{meas}). Osnova adaptacije temelji na faktorju Z_m, ki se izračuna kot:

$$Z_m = \frac{T_{\text{mod}}}{T_{\text{meas}}}. \tag{8}$$

Na osnovi Z_m se sproti prilagajajo uteži za posamezne hladilne mehanizme: hlajenje zaradi sevanja (Z_r), vodno hlajenje (Z_w) in hitrostna korekcija (Z_v). Kratkoročna adaptacija za vsak mehanizem je določena z

ustreznimi koeficienti α_w, α_r, in α_v, ki omogočajo hitro odzivnost na nemodelirane spremembe v procesu znotraj enega traku, po drugi strani pa se dolgoročna adaptacija faktorjev izvede po zaključku procesiranja, kar ohranja stabilnost modela ob nenadnih spremembah pogojev v procesu [4]. Enačbe za adaptacijo so:

$$\begin{aligned} Z_w &\leftarrow (1-\alpha_w R_w)\cdot Z_w + \alpha_w R_w \cdot Z_w Z_m, \\ Z_r &\leftarrow (1-\alpha_r(1-R_w))\cdot Z_r + \alpha_r(1-R_w)\cdot Z_r Z_m, \\ Z_v &\leftarrow (1-\alpha_v)\cdot Z_v + \alpha_v \cdot (-\mathrm{sign}(Z_m)\cdot \max(|Z_m|,\varepsilon)), \\ Z_m &\leftarrow \alpha_{\text{short}} Z_m + (1-\alpha_{\text{short}}) Z_m. \end{aligned} \tag{9}$$

Delež hlajenja, ki ga povzroča vodno pršenje, je določen z razmerjem:

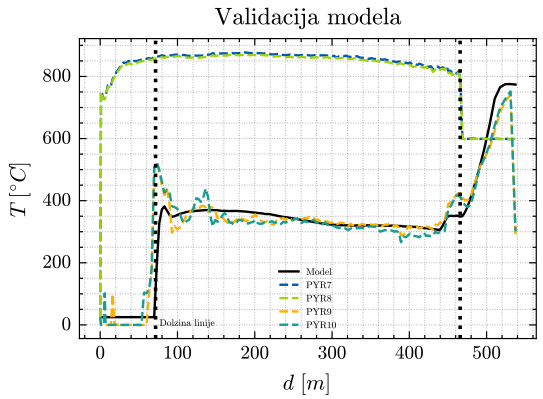
$$R_w = \frac{t_{\text{w}}}{t_{\text{t}}}, \tag{10}$$

kjer je t_{w} čas segmenta traku pod aktivno vodno prho, in t_{t} skupni čas segmenta traku na liniji.

2.4 Validacija modela

Model je bil validiran z uporabo zbranih podatkov iz proizvodnje. Primerjali smo izračunane temperaturne profile z dejanskimi meritvami na izstopu. Rezultati kažejo zadovoljivo ujemanje med napovedjo in meritvijo, kar potrjuje primernost modela za uporabo v sistemu vodenja.

Na sliki 2 je prikazan graf ene primerjave izhodov modela z dejanskimi meritvami na vhodni ter izhodni strani hladilne linije.



Slika 2: Validacija modela: ujemanje modela z meritvami na izhodu hladilne linije.

3 Razvoj sistema vodenja na osnovi modela

3.1 Princip sistema vodenja

Za vsak segment traku se v vsakem simulacijskem koraku najprej izračunajo predviden čas zadrževanja v posameznih hladilnih sekcijah, predvidena izhodna temperatura ter pogrešek med predvideno in ciljno temperaturo ϵ. Na podlagi teh podatkov se izračuna teoretično možen odvzem temperature zaradi hlajenja v posamezni sekciji (ΔT_{Cmax}), pri čemer se upoštevajo tudi mrtvi časi, povezani z odpiranjem in zapiranjem ventilov.

Za odločanje o odpiranju ventila posamezne sekcije se uporablja definirana histereza, ki temelji na uporabi območja zlatega reza glede na ΔT_{Cmax}, s čimer preprečimo prekomerno frekvenco odpiranja in zapiranja ventilov. Pri tem se uporabljata dva praga, T_{on} in T_{off}, ki določata, kdaj je potrebno odpreti oziroma zapreti ventil posamezne sekcije za posamezen segment traku:

$$T_{\text{on}} = \Delta T_{\text{Cmax}} \cdot 0.618 \quad \text{in} \quad T_{\text{off}} = -\Delta T_{\text{Cmax}} \cdot 0.618 \tag{11}$$

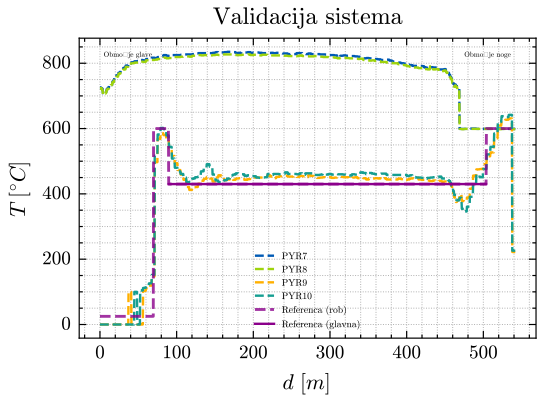
Na podlagi teh pragov vsak segment traku posamično presoja, ali je potrebno ventil določene hladilne sekcije odpreti ali zapreti, in svojo odločitev izrazi z glasovanjem (angl. *voting*):

if $\epsilon > T_{\text{on}}$ **then**
    glasujZa()
else if $\epsilon < T_{\text{off}}$ **then**
    glasujProti()
else
    glasujProti() // Fina regulacija v prihodnje
end if

Končna odločitev o stanju ventila v posamezni hladilni sekciji je rezultat večinskega glasovanja vseh segmentov.

3.2 Validacija sistema vodenja

Delovanje razvitega sistema vodenja je podrobneje preverjeno na osnovi podatkov enega reprezentativnega traku. Na sliki 3 so prikazani rezultati meritev temperatur s pirometri ter pripadajoča temperaturna referenca. Referenčni profil je zaradi tehnoloških zahtev oblikovan tako, da vključuje višje temperature na območjih glave in noge traku.



Slika 3: Validacija sistema: primerjava merjenih temperaturnih profilov z referenco na reprezentativnem traku.

Kljub manjšim odstopanjem v začetnem delu traku, se vodenje na osnovi modela izkazuje kot zanesljivo in stabilno, saj temperaturni profil ostaja znotraj sprejemljivih toleranc.

4 Arhitektura aplikacije in integracija

Integracija sistema v proizvodni proces je zahtevala implementacijo prilagojenega TCP/IP vmesnika, ki je omogočal komunikacijo z drugim nivojem procesne linije (L2), preko katere sistem v realnem času prejema in pošilja naslednje podatke:

- začetne informacije o traku (označene s **P**) – t. i. *Primary Data Information* (PDI),
- ciklične procesne podatke (označene s **C**) – *cyclic data*, kot so temperature, statusi ventilov in zaznave prisotnosti traku,

ter pošilja:

- odzivne komande (označene z **R**) – *response*, za vklop ali izklop posameznih ventilov.

V tabeli 1 je podan strukturiran pregled vseh razpoložljivih podatkov, ki jih uporablja matematični model.

Tabela 1: Podatki, dostopni preko TCP/IP protokola.

Polje	Opis	Enota	Vir
PYR7, PYR8	Temperatura na vhodu linije	°C	C
PYR9, PYR10	Temperatura na izhodu linije	°C	C
STSPEED	Hitrost ogrodja	cm/s	C
DCSPEED	Hitrost navijanja	cm/s	C
V1–V6	Statusi ventilov (vklop/izklop)	-	C
RTS7–RTS10	Prisotnost traku (rota sonde)	-	C
COILNU	ID traku	-	P
THICKNESS	Debelina traku	mm	P
WIDTH	Širina traku	mm	P
GRADE	Kvaliteta jekla	-	P
WEIGHT	Masa traku	kg	P
STATUS	Status nadzornega sistema	-	R
V1–V6	Ukazi za ventile (vklop/izklop)	-	R

Sistem je implementiran kot modularna aplikacija, ki deluje v realnem času. Model se izvaja ciklično z vnaprej določenim intervalom (vsakih 100 ms), medtem ko aplikacija prejema nove podatke vsakih 1 s. Osnovne komponente vključujejo modul za zajem podatkov, izvajanje modela, adaptivni algoritem in generacijo ukazov za L2. Aplikacija je bila integrirana s sistemom L2 preko obstoječe komunikacijske infrastrukture, kar omogoča enostavno vključitev v proizvodno okolje brez bistvenih posegov v obstoječi nadzorni sistem.

5 Validacija in rezultati

Poleg osnovnega namena vodenja se model izkazuje tudi kot učinkovit t.i. virtualni senzor (angl. *soft sensor*) za neodvisno oceno temperature. V enem izmed primerov uporabe je predikcija temperature na osnovi modela omogočila zaznavo sistematičnega odstopanja dveh pirometrov na izhodu hladilne linije, kar je sprožilo izvedbo korektivnih ukrepov za izboljšanje natančnosti meritev.

Ker se posamezne kvalitete jekel med seboj razlikujejo po lastnostih, smo posebno pozornost namenili primerjavi pogreškov po kvalitetah. V tabeli 2 so prikazane vrednosti srednje absolutne relativne napake (angl. *Mean Average Percentage Error – MAPE*) po posameznih kvalitetah materiala za obdobje, ki zajema reprezentativen vzorec. V tabeli 3 pa so prikazane statistike MAPE za vse kvalitete v izbranem obdobju.

Tabela 2: Srednja absolutna relativna napaka (MAPE) napovedi izhodne temperature po kvalitetah materiala.

Kvaliteta materiala	Št. primerov	MAPE [%]
KV1	9	2.15
KV2	5	4.27
KV3	5	4.78
KV4	2	5.06
KV5	66	5.19

Za izbrano kvaliteto materiala smo dodatno izvedli kvalitativno validacijo celotnega sistema vodenja, kjer se je logika sistema vodenja izkazala kot učinkovita pri doseganju ciljne temperature.

Tabela 3: Osnovna statistika MAPE za vse primere.

N	Srednja vrednost	Std. odklon	Min.	25%	50%	75%
255	7.40	4.44	1.55	4.43	6.04	9.14

V prihodnje načrtujemo razširjeno testiranje sistema vodenja na širšem naboru jekel, kar bo omogočilo nadaljnjo optimizacijo nastavitev sistema ter povečalo njegovo robustnost v realnem proizvodnem okolju.

6 Zaključek

V prispevku smo predstavili razvoj digitalnega dvojčka in adaptivnega sistema vodenja temperature za hladilno linijo Steckel. Razvit model omogoča natančno napovedovanje temperature, sistem vodenja pa zagotavlja bolj natančno doseganje ciljne temperature vzdolž celotnega traku. Validacija v realnem okolju je potrdila učinkovitost rešitve in njeno zanesljivost v industrijskem okolju.

Sistem še ni bil testiran na celotnem spektru materialov, zato je pred implementacijo v stalno industrijsko prakso potrebna dodatna validacija in morebitna prilagoditev modela z upoštevanjem razširjenih termofizikalnih lastnosti materialov in odzivnosti aktuatorjev.

Nadaljnje delo bo usmerjeno v implementacijo bolj fine regulacije druge stopnje, ki bo omogočila bolj natančno obvladovanje procesa. Možnosti bomo iskali predvsem pri načinu generiranja referenčnih hitrosti.

Zahvala

Iskrena zahvala gre vsem sodelavcem v naši ekipi, katerih strokovno delo in konstruktivne razprave so omogočili uspešno izvedbo projekta. Posebna zahvala gre tudi vodstvu podjetja SIJ Storitve d.o.o., ki je omogočilo izvedbo projekta in podprlo razvoj naprednih pristopov vodenja.

Literatura

[1] H. Liu, W. Du, H. Lu, Y. Fu, S. Yu in C. Liu, "Effect of Cooling Mode on the Microstructure of High-Strength Steel during Hot Rolling," *Metals*, vol. 12, str. 1219, julij 2022. Number: 7 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

[2] M. Tan, S. Li in T. Chai, "Hybrid Intelligent Control Strategy of the Laminar Cooling Process," v *Advances in Neural Networks - ISNN 2006* (J. Wang, Z. Yi, J. M. Zurada, B.-L. Lu in H. Yin, ur.), (Berlin, Heidelberg), str. 858–863, Springer, 2006.

[3] W.-w. Liu, H.-j. Li, Z.-d. Wang in G.-d. Wang, "Mathematical model for cooling process and its self-learning applied in hot rolling mill," *Journal of Shanghai University (English Edition)*, vol. 15, str. 548–552, dec. 2011.

[4] G. Dian-yao, X. Jian-zhong, P. Liang-gui, W. Guo-dong in L. Xiang-hua, "Self-Learning and Its Application to Laminar Cooling Model of Hot Rolled Strip," *Journal of Iron and Steel Research, International*, vol. 14, str. 11–14, julij 2007.

[5] D. Chen, Z.-l. Li, Y. Li in G. Yuan, "Research and Application of Model and Control Strategies for Hot Rolled Strip Cooling Process Based on Ultra-Fast Cooling System," *ISIJ International*, vol. 60, sept. 2019.

[6] R.-M. Guo, "Modeling and simulation of run-out table cooling control using feedforward-feedback and element tracking system," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, str. 304–311, mar. 1997.