

# OPTIMIZACIJA TOPOLOGIJE MIKROKANALNIH PRENOSNIKOV TOPLOTE

Alessandro Alaia, Edoardo Lombardi, Marco Cisternino, Giacomo Uffreduzzi, Claudio Domenico Arlandini, Tommaso Tirelli, Alberto Tacconelli, Paolo Ambrogiani

## Izvleček:

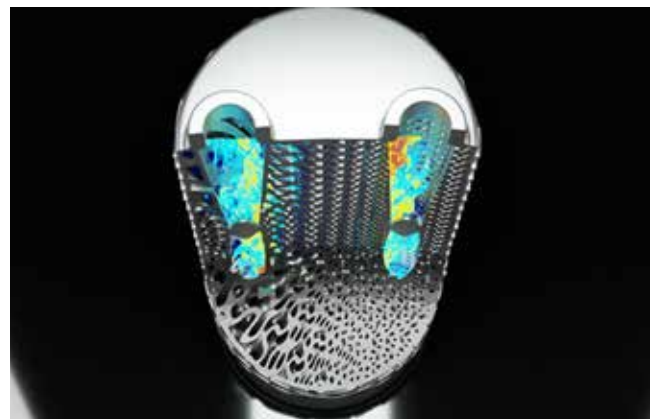
Zgodba o uspehu, predstavljena v tem članku, je bila razvita v sklopu razvojno-raziskovalnega projekta FF4EuroHPC (H2020). Partnerji Optimad, Aidro in CINECA so se združili, da bi nagovorili specifične poslovne izzive v proizvodnem sektorju in jih premagali s pomočjo visokozmogljivega računalništva. Mikrokanalni toplotni izmenjevalnik (MCHE) je prenosnik toplote, v katerem tekočina teče v stranskih zaporah širokih manj kot milimeter. Zahvaljujoč visokemu volumskemu toplotnemu toku, kompaktnosti in učinkoviti porazdelitvi pretoka ponujajo številne prednosti pred standardnimi izmenjevalniki. Tradicionalni pristop oblikovanja za MCHE zahteva več iteracij, preden se vzpostavi končna konfiguracija, kar vodi do znatnih stroškov raziskav in razvoja, dolgega časa do trženja in dragih eksperimentalnih kampanj. V praksi se zaradi proračunskih omejitev oceni le nekaj konfiguracij, kar povzroči neoptimalno zasnovo, kar negativno vpliva na konkurenčnost končnega izdelka. Inovativna rešitev je bila razvita kot platforma SaaS (Software as a Service), ki integrira niz računalniških orodij za optimizacijo topologije v ogrodju. TOLOMHE predstavlja prvi korak k storitvam v oblaku za optimizacijo topologije in generativno zasnovo, ki je na voljo malim in srednje velikim podjetjem, specializiranim za proizvodnjo tovrstnih toplotnih izmenjevalnikov.

## Ključne besede:

FF4EuroHPC, Mikrokanalni toplotni izmenjevalnik, optimizacija, CFD Simulacija, strojno učenje, inovacija

**F4EuroHPC nadaljuje svoje poslanstvo s spodbujanjem majhnih in srednje velikih podjetij, da s pomočjo najsodobnejših tehnologij sprostitjo svoj inovacijski potencial.**

FF4EuroHPC je raziskovalno-razvojni projekt Obzorja 2020, ki spodbuja konkurenčnost majhnih in srednje velikih evropskih podjetij (MSP) s financiranjem poslovno usmerjenih poskusov in motiviranjem uporabe naprednih tehnologij in storitev visoko zmogljivega računalništva (*angl. high performance computing, HPC*).



**Slika 1** : Primer mikrokanalnega prenosnika toplote (MCHX)

**Alessandro Alaia, Dr., Edoardo Lombardi, Dr., Marco Cisternino, Dr, Giacomo Uffreduzzi, Mag.,** vsi Optimad, Torino, Italija;

**Claudio Domenico Arlandini, Dr., CINECA** Bologna. Italija;

**Tommaso Tirelli, Mag., Alberto Tacconelli, Mag., Paolo Ambrogiani, Mag.,** vsi Aidro, Milan, Italija

**Prevod: Tina Črnigoj Marc,** Arctur, d. o. o., Nova Gorica

V okviru projekta FF4EuroHPC lahko majhna in srednje velika evropska podjetja razvijejo inovativne izdelke in storitve, izkoristijo zanimive poslovne priložnosti in postanejo konkurenčnejša z uporabo evropskih visokokakovostnih superračunalniških storitev. V okviru projekta sta bila ponujena dva javna poziva, namenjena inovativnim in agilnim majhnim in srednje velikim podjetjem, ki bi lahko

ponudila eksperiment najvišje kakovosti. Predloženi eksperimenti so obravnavali poslovne izzive evropskih podjetij z različnih področij uporabe. Eksperimenti, ki so izpolnili standarde javnega poziva, so bili izvedeni s pomočjo tehnologij HPC, in sicer v dveh sklopih. Eksperiment je študija primera, pomembnega za končnega uporabnika, to je podjetje, ki demonstrira uporabo HPC (v oblaku). Hkrati eksperiment demonstrira koristi, ki jih HPC prinaša v vrednostno verigo vse od končnega uporabnika pa do ponudnika infrastrukture HPC. Eksperiment mora obravnavati poslovne izzive podjetja, ki jih rešuje z uporabo HPC in sorodnih tehnologij, kot sta visoko zmogljiva podatkovna analitika (*angl. high performance data analytics, HPDA*) in umetna inteligenca (*angl. artificial intelligence, AI*). Ko je eksperiment uspešno zaključen, se predstavi v zgodbi o uspehu, ki z rezultati lahko motivira tudi druge gospodarske subjekte k uporabi tehnologij za namen inoviranja. Ena od zgodb o uspehu s področja energetike je predstavljena v tem članku.

### **Izziv: razviti napredno metodologijo oblikovanja za ustvarjanje inovativnih konfiguracij mikrokanalnih prenosnikov toplote**

Partnerji Optimad, Aidro in CINECA so združili moči, da bi rešili specifičen poslovni izziv v proizvodnji s pomočjo visokozmogljivega računalništva.

Mikrokanalni prenosnik toplote (Micro Channel Heat Exchanger, MCHX) je prenosnik toplote, pri katerem tekočina teče v kanalih, širokih manj kot milimeter. Zaradi visokih specifičnih lastnosti, učinkovite porazdelitve pretoka in nizke teže postajajo priljubljeni v več industrijskih panogah, vključno z vesoljsko industrijo, bioinženiringom, elektroniko in naftno ter plinsko industrijo.

Uspešnost mikrokanalnih prenosnikov toplote (MCHX) je močno odvisna od oblikovanja (oblike in topologije) mikrokanalov. Oblikovalski pristopi, ki temeljijo na eksperimentalnih metodah, zahtevajo veliko ponovitev, kar pripelje do visokih stroškov raziskav in razvoja ter dolgih časov do uvajanja izdelka na trg. V praksi zaradi omejenega proračuna in časovnih omejitev ocenjujemo le nekaj konfiguracij, kar vodi do suboptimalnih rešitev. Po drugi strani pa oblikovanje s simulacijami postavlja več izzivov, vključno z modeliranjem, integracijo programske opreme in robustnostjo. Zaradi večstopenjske narave problema zahtevajo simulacije konjugiranega prenosa toplote (CHT) mikrokanalnih prenosnikov toplote visokoločljive računalniške modele, ki dobro rešujejo dinamiko fluida na najmanjši prostorsko-časovni skali mikrokanalov. Posledično lahko stroški teh računskih postopkov močno omejijo raziskovalni prostor. Optimizacija je torej ključna za računalniško infrastrukturo. Lastne rešitve za visokozmogljivo računanje običajno niso ustrezno

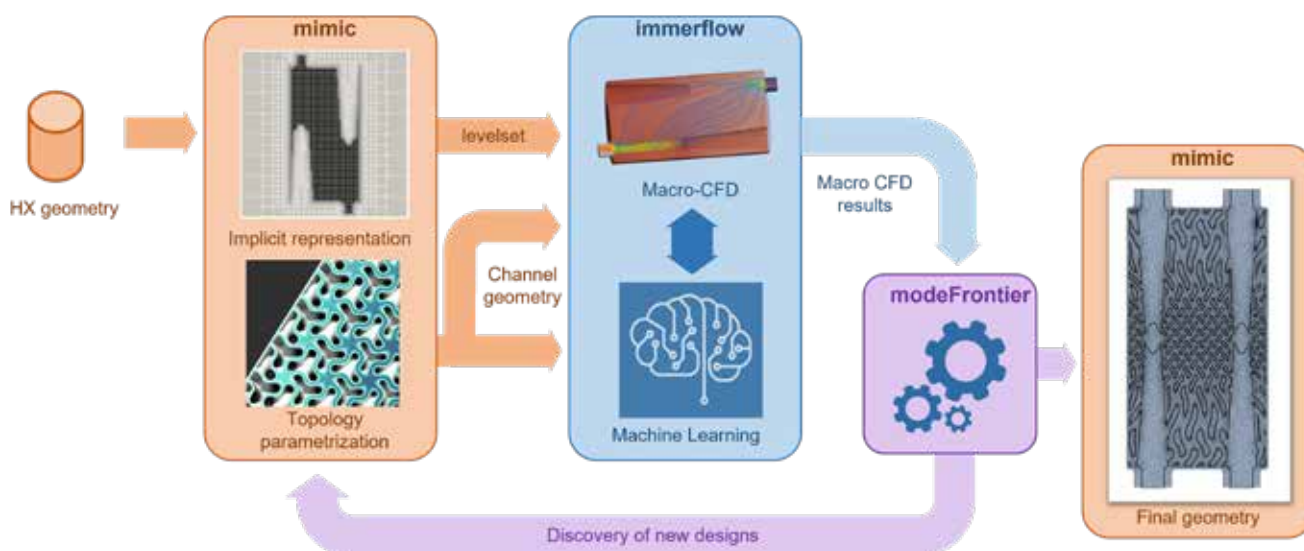
zmogljive za te naloge, zlasti za mala in srednje velika podjetja. Posledica tega je, da morajo ta zaradi omejenih računalniških virov sprejeti poenostavitev (npr. prostor izvedljivih oblik je omejen s hevrističnim pristopom, razvijajo se poenostavljeni modeli za posamezne primere uporabe itd.), kar vodi v entropične delovne postopke ter še večje stroške raziskav in razvoja, kar na koncu vpliva na konkurenčnost na trgu. Zato postaja uporaba vzporednega računanja nujna, da se ohranijo razvojni časi, ki so združljivi s hitrostjo industrijske proizvodnje.

Topološka optimizacija (TO) je napredna oblikovalska metodologija za ustvarjanje inovativnih konfiguracij, ki jih je težko doseči z običajnimi oblikovalskimi tehnikami. Zapletene oblike, ki izhajajo iz topološke optimizacije, ni mogoče enostavno izdelati s tradicionalnimi tehnikami, kot so obdelava s številčnim krmiljenjem računalnika, brizganje plastike ali vakuumsko litje. Stopnja tehnološke pripravljenosti (TRL) tehnologije aditivne proizvodnje (AM), npr. laserskega sintranja, se je v zadnjem desetletju znatno povečala, kar je to tehnologijo postavilo na osrednje mesto novega poslovnega modela v proizvodni industriji. AM ima več prednosti, kot so hitrejši proizvodni cikel, prilagodljiv dizajn in odpiranje možnosti, ki so izključene za tradicionalne proizvodne tehnologije, saj omogoča izdelavo komponent s kompleksnimi geometrijami pri relativno omejenih stroških. Zelo obetavna aplikacija za oblikovanje mikrokanalnih prenosnikov toplote (MCHX) je torej kombinacija TO in AM. Kljub ogromnemu potencialu pa proizvajalci MCHX zaradi zgoraj navedenih težav ne morejo izkoristiti potenciala, ki ga ponuja kombinacija TO + AM.

### **Rešitev: TOLOMHE - programsko okolje za topološko optimizacijo**

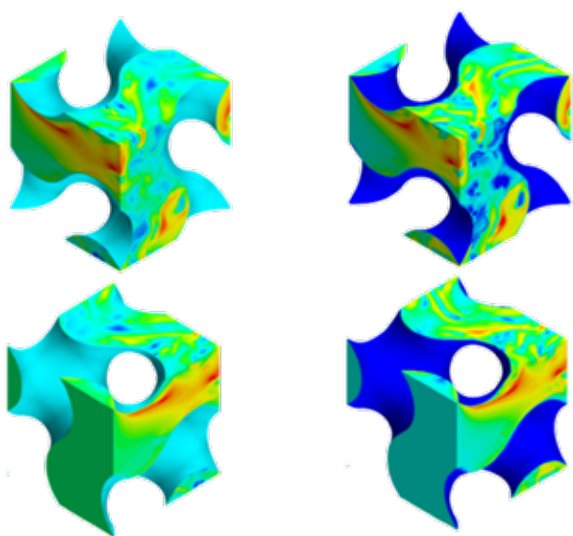
TOLOMHE je platforma, osredotočena na visokozmogljivo računalništvo (HPC), razvita za topološko optimizacijo mikrokanalnih prenosnikov toplote (MCHX). Z združitvijo napredne optimizacije, simulacije, strojnega učenja in izvajanja na HPC-infrastrukturi platforma TOLOMHE cilja na: 1. povečanje konkurenčnosti proizvajalcev MCHX z zagotavljanjem stroškovno učinkovitega orodja za oblikovanje MCHX in 2. potrjevanje inovativnega poslovnega modela za neodvisnega ponudnika programske opreme na osnovi paradigme »Optimizacija kot storitev«.

Gradniki platforme TOLOMHE vključujejo optimizator (*modeFRONTIER*), večstopenjski fizikalni algoritem za simulacijo konjugiranega prenosa toplote (*immerFLOW*) ter programsko opremo za manipulacijo geometrije (*mimic*). *modeFRONTIER* (*ESTECO*) je vodilno orodje v industriji za multidisciplinarno oblikovalsko optimizacijo. *immerFLOW* (Optimad) je produktiven algoritem za računalniško dinamiko fluidov (CFD), ki temelji na metodi potopljenih mej (*immersed boundary*), še pose-



Slika 2 : Shematski prikaz delovnega procesa optimizacije TOLOMHE

Optimizator odkrije nove zasnove na podlagi rezultatov simulacij CFD, izvedenih na makroskali. Simulacije na makroravni uporabljajo model strojnega učenja za sklepanje o tlačnem uporu in toplotni prestopnosti na podlagi lokalnega pretočnega polja in topologije kanala. Na koncu optimizacijske zanke se optimalna geometrija izračuna z združitvijo geometrije postavitve HX z optimalno topologijo kanala, ki jo odkrije optimizator.



Slika 3 : Primer simulacije na mikromerilu, izvedene na »prototipnih« mrežnih topologijah.

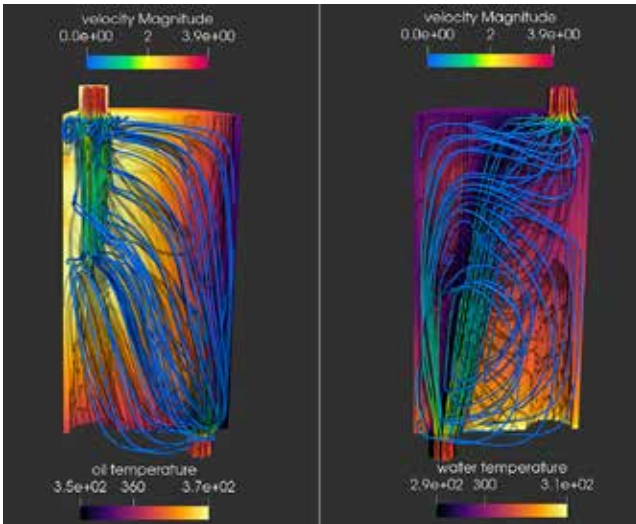
Simulacije se uporabljajo za urjenje brez povezave modela strojnega učenja za napovedovanje tlačnega upora in toplotne prestopnosti glede na lokalne pogoje toka in mrežno topologijo.

bej primeren za avtomatizirane delovne postopke s kompleksnimi geometrijami. *Mimic* (Optimad) pa je orodje za računalniško podprto manipulacijo geometrije, ki vključuje topološko parametrizacijo implicitnih geometrij. Večstopenjska narava fluidno-dinamičnega/termičnega sklopa v MCHX se obravnava s pomočjo modela strojnega učenja (ML). Ta pristop je karakteriziran s tremi integriranimi numeričnimi modeli.

**1. Model na mikroravni.** Model na mikroravni sestavlja globoka nevronska mreža, ki ocenjuje tlačni upor in toplotno prestopnost iz (lokalne) topologije kanala in pogojev pretoka. (Sintetični) nabor podatkov, uporabljen za iteriranje brez povezave, je bil ustvarjen na skupini visokozmogljivih računalnikov (Galileo100, infrastruktura CINECA s 528 računalniškimi vozlišči, vsako od njih z dvema procesorjema Intel CascadeLake 8260, vsak s 24 jedri). Vsaka točka podatkov ustreza simulaciji visoke ločljivosti, izvedeni na eni sami celici »prototipnih« topologij mreže.

**2. Model na makroravni** se uporablja za simulacijo pretoka na makroskopski ravni za dano postavitev prenosnika toplote. Učinek mikroskale je vključen v obliki tlačnega upora in toplotne prestopnosti. Te se izračunajo z enostavnimi evalvacijami feed-forward zank modela strojnega učenja. Posledično se računaska cena simulacije za celoten prenosnik toplote drastično zmanjša.

**3. Evolucijski okvir za optimizacijo** se uporablja za raziskovanje celotnega oblikovalskega prostora in izboljšanje začetnega oblikovanja. Genetski algoritmi zahtevajo veliko število vrednotenj modela med začetnim raziskovanjem oblikovalskega prostora (od nekaj sto do nekaj tisoč, odvisno od specifičnega problema). Da bi dosegli to raziskovanje v sprejemljivem času, se optimizacija izvaja na HPC-infrastrukturi, kar omogoča visoko prilagodljivost genetskih algoritmov. Poleg tega so genetski algoritmi primerni za večkriterijsko in večomejitveno optimizacijo. V okviru modeFRONTIER je bila izbrana hibridna strategija, ki združuje sekvenčno kvadratično programiranje (Sequential



**Slika 4 :** Primeri rezultatov simulacije konjugiranega prenosa toplote, izvedene na makroskopskem merilu MCHX. Tokovnice so obarvane s polji hitrosti in temperature za vročo (levo) in hladno tekočino (desno). Učinki na mikromerilo tako na pretok tekočine kot na prenos toplote so vključeni v smislu nelinearne, prostorsko spremenljive prepustnosti in toplotne prestopnosti. Ti koeficienti se izračunajo sproti z modelom strojnega učenja, s čimer se uresniči dvosmerna povezava med makro- in mikrolestvico.

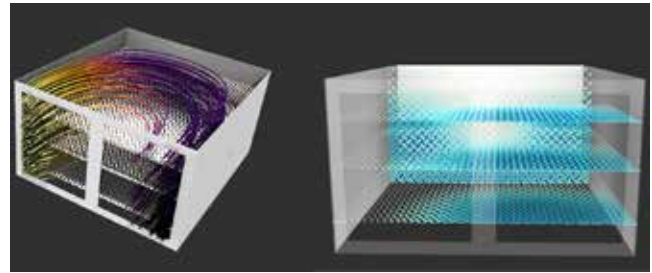
Quadratic Programming, SQP) in genetski algoritem za nedominirano razvrščanje (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II) kot optimizacijski algoritem. Med topološko optimizacijo je opis oblikovanja MCHX impliciten v obliki funkcije določanja nivoja, da se izognemo dragim (in k napakam nagnjenim) postopkom ponovnih zank. Na koncu optimizacije se uporabniku vrne eksplisitna predstavitev celotne geometrije prenosnika toplote v obliki površinske razčlenitve, kot jo zagotavlja orodje mimic.

### Poslovne koristi in vpliv TOLOMHE

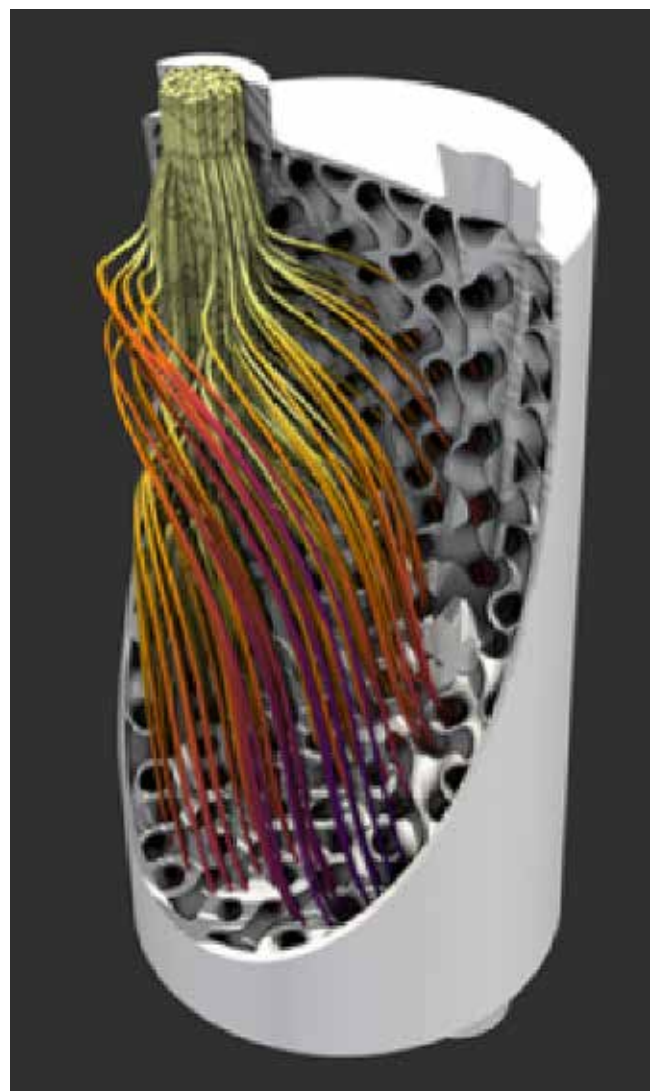
Prednostna ponudba TOLOMHE temelji na treh glavnih konceptih:

- ▶ Implementiran je bil na HPC-infrastrukturo, kar omogoča dostop do ustreznega računalniškega okolja.
- ▶ Za uporabo HPC ali optimizacije ni bilo potrebno predhodno znanje. To pomeni bistveno lažji začetek za uporabnike HPC, ki to počnejo prvič.
- ▶ Vsa potrebna orodja so integrirana v enotno platformo. Tako rešitev lahko odpravi vse težave, povezane z integracijo različnih orodij (CAE/CAD) in licenciranjem.

Zahvaljujoč uporabi TOLOMHE se pričakuje, da bo končni uporabnik pospešil prehod od poslovnega modela »izdelava po načrtu« k poslovnemu modelu »izdelava po specifikacijah« z zmanjšanjem stro-



**Slika 5 :** Različne rezine optimizirane geometrije za prenosnik toplote ACOC. Optimizirana toplotna moč (večja od 30 kW) je bila izračunana s temperaturo vstopnega zraka 50 °C, z masnim pretokom zraka 0,5 kg/s, vstopno temperaturo olja 130 °C in s prostornim pretokom 54 l/min. Največji dovoljeni padec tlaka je bil za olje nastavljen na 130 kPa.



**Slika 6 :** Posnetek notranjega kanala optimiziranega prenosnika toplote dvotekočinskega izmenjevalnika olje-voda. Tokovnice za vročo tekočino (olje) so obarvane s temperaturo. Cilj optimizacije je bil povečati izmenjavo toplote z modulacijo debeline trdnih sten znotraj projektiranega volumna. Na vstopih v tok so bili predpisani fiksni masni pretok in temperature. Uvedena je bila največja omejitev padca tlaka 20 kPa.

škov raziskav in razvoja ter krajšim časom do uvedbe novih izdelkov na trg.

Delo, izvedeno v okviru eksperimenta TOLOMHE, prinaša dodatne poslovne koristi končnemu uporabniku:

- ▶ Avtomatizacija oblikovalskega delovnega procesa ima potencial, da skrajša čas do ponudbe za 90 % in čas do trga za 50 % (z nekaj mesecev na en mesec).
- ▶ Potencialni prihranki lahko znašajo do 100.000 evrov na leto, saj se usposobljena delovna sila preusmeri v druge dejavnosti, ki prinašajo dodano vrednost končnemu uporabniku.



Projekt FF4EuroHPC je prejel sredstva Evropskega skupnega podjetja za visokozmogljivo računalništvo (EUROHPC JU) v okviru pogodbe o dodelitvi sredstev št. 951745. EUROHPC JU prejema podporo iz programa Evropske unije za raziskave in inovacije Obzorje 2020 ter iz Nemčije, Italije, Slovenije, Francije in Španije.

### Topology Optimization of Micro-Channel Heat Exchangers

#### Abstract:

The success story presented in this article was developed during the first tranche of the R&D H2020 FF4EuroHPC Project. Partners Optimad, Aidro and CINECA teamed up to address specific business challenge in the manufacturing sector and overcome it with the help of High Performance Computing. Micro Channel Heat Exchanger (MCHE) are heat exchangers in which the fluid flows in lateral confinements with dimensions of millimeters. Thanks to the high volumetric heat flux, compactness, and efficient flow distribution, they offer several advantages over standard exchangers. The traditional design approach for MCHE requires several iterations before the final configuration is established, leading to significant R&D costs, long time-to-market, and expensive experimental campaigns. In practice, due to budget constraints, only a few configurations are assessed, resulting in sub-optimal design which negatively impacts the competitiveness of the final product. An innovative solution was developed as a SaaS platform, which integrates a set of computational tools for topology optimization of MCHX in an HPC-centric framework. TOLOMHE represents the first step towards cloud services for topology optimization and generative design offered to SMEs specialized in manufacturing for MCHX.

#### Keywords:

FF4EuroHPC, Micro Channel Heat Exchanger, optimization, CFD simulation, machine learning, innovation

**LA&CO**  
Sinergija premikanja. Hidravlika. Pnevmatika. Linearna tehnika.

**Rexroth**  
Bosch Group  
Zadružnica

LA & CO d.o.o.  
Limbuška cesta 2  
2341 LIMBUŠ

[www.la-co.si](http://www.la-co.si)  
[info@la-co.si](mailto:info@la-co.si)  
02 / 42 92 660

**25**  
LET

Že 25 let vam ponujamo vrhunsko tehniko in prave strokovnjake, za vaše zahteve na področju hidravlike, pnevmatike in linearne tehnike.