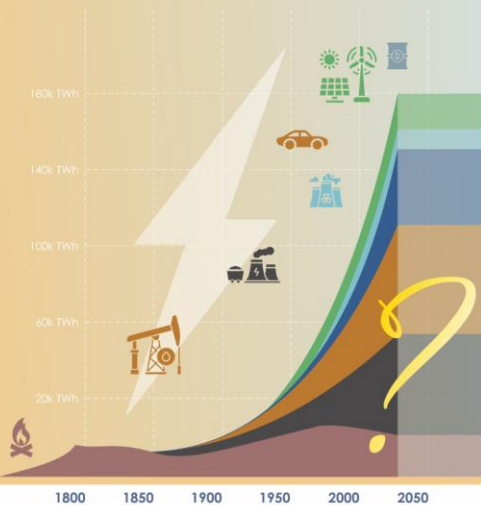




ENERGY  
ENERGETIKA  
2026



# Zamena adsorpcionih odvlaživača vazduha na prirodni gas sa CO<sub>2</sub> toplotnim pumpama u ledenim dvoranama: studija na više objekata

---

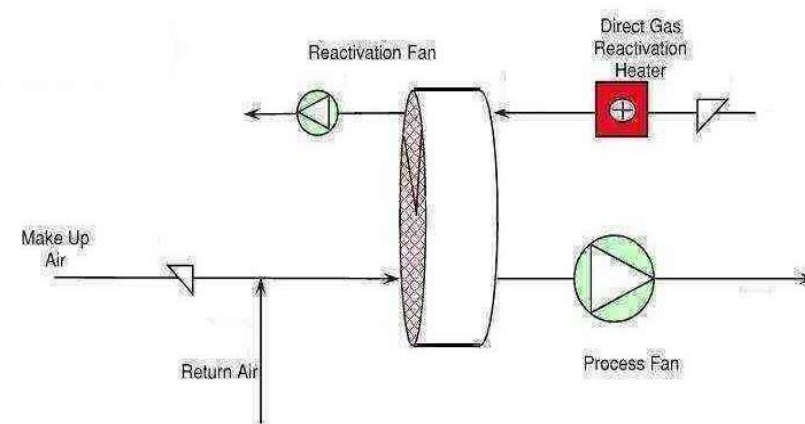
dr Dimitrije Manić, prof. dr Mirko Komatina, dr Dragi Antonijević



- e Klizačke dvorane: jedni od energetski najintenzivnijih javnih objekata
- e Tri energetski najintenzivnija procesa: proizvodnja leda (40–60%), ventilacija, odvlaživanje
- e Posledice visoke vlage:
  - e Magla u zoni leda → smanjena vidljivost i bezbednost
  - e Kondenzacija na plafonu → kapanje vode na led
  - e Pogoršanje kvaliteta leda (mekši led, veće trenje)
- e Kontrola vlage je ključna za:
  - e Kvalitet leda
  - e Bezbednost korisnika
  - e Očuvanje konstrukcije objekta
- e Odvlaživači: sistem sa velikim potencijalom uštede energije i dekarbonizacije
- e Specifični unutrašnji uslovi — precizna kontrola vlažnosti je neophodna
  - e Temperatura vazduha: 2–12°C | Relativna vlažnost: 40–50%
  - e Sprečava kondenzaciju na hladnim površinama i degradaciju leda
- e Glavni izvori vlage: isparavanje leda, korisnici, polivanje leda



- e Desikantni rotor adsorbuje vlagu iz toka procesnog vazduha
- e Adsorpcija  $\neq$  kondenzacija:
  - e Vлага se vezuje na površinu materijala (bez fazne promene u tečnost)
- e Dve odvojene vazdušne struje:
  - e Procesni vazduh (supply air)  $\rightarrow$  ulazi u dvoranu (isušen)
  - e Reaktivacioni vazduh (exhaust air)  $\rightarrow$  izbacuje vlagu napolje
- e Tok procesa:
  - e Rotor adsorbuje vlagu iz procesnog vazduha
  - e Rotor rotira u zonu reaktivacije; Vazduh za reaktivaciju zagrejava gasni sagorevač (120–150°C)
  - e Vazduh za reaktivaciju uklanja vlagu iz desikata  $\rightarrow$  obnavlja kapacitet adsorpcije
  - e Vlažan vazduh se izbacuje van objekta
  - e Visoka potrošnja prirodnog gasa
- e Ugrađene jedinice u Delti: Munters i Toromont Cimco
  - e Kapaciteti: 2x60 kW (Ladner), 140 kW (SDRC), 40+120 kW (NDRC), 120 kW (Tilbury)
  - e Desikantni rotor: porozni materijal (silika gel) sa velikom površinom adsorpcije

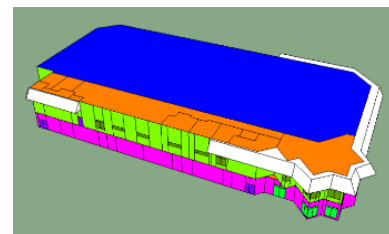
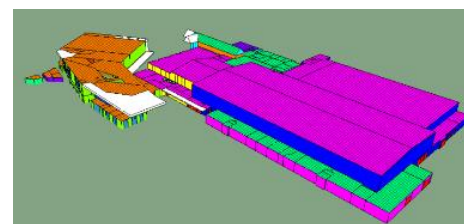
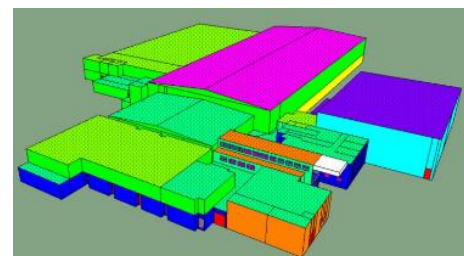
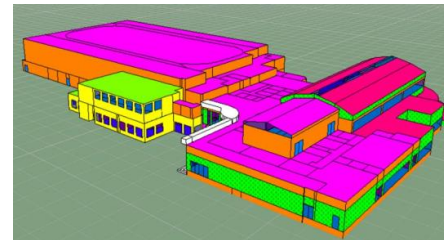


## e Objekti u analizi:

- e Ladner Leisure Centre: Ledena dvorana + zatvoreni bazen + prateći sadržaji
- e South Delta Recreation Centre (SDRC): Dve ledene ploče, zajednički mašinski sistem
- e North Delta Recreation Centre (NDRC): Ledena dvorana + fitnes + zajednički prostori + otvoreni bazen
- e Tilbury Ice Arena: Jedna ledena ploča, jednostavan sistem (referentni primer)

## e Metodologija modeliranja:

- e Razvijeni kalibrisani energetske modeli objekataReferentna potrošnja (baseline): zasnovana na stvarno izmerenim računima za energijukorišćeni AMY meteorološki podaci (stvarna godina)Ulazni podaci: projektna dokumentacija i terenski obilazakoperativni režimi iz BAS sistemaprocena unutrašnjih opterećenja i ventilacijeKalibracija modela: usklađivanje simulacije sa stvarnom potrošnjom energijeomogućava pouzdanu procenu uticaja retrofit mera



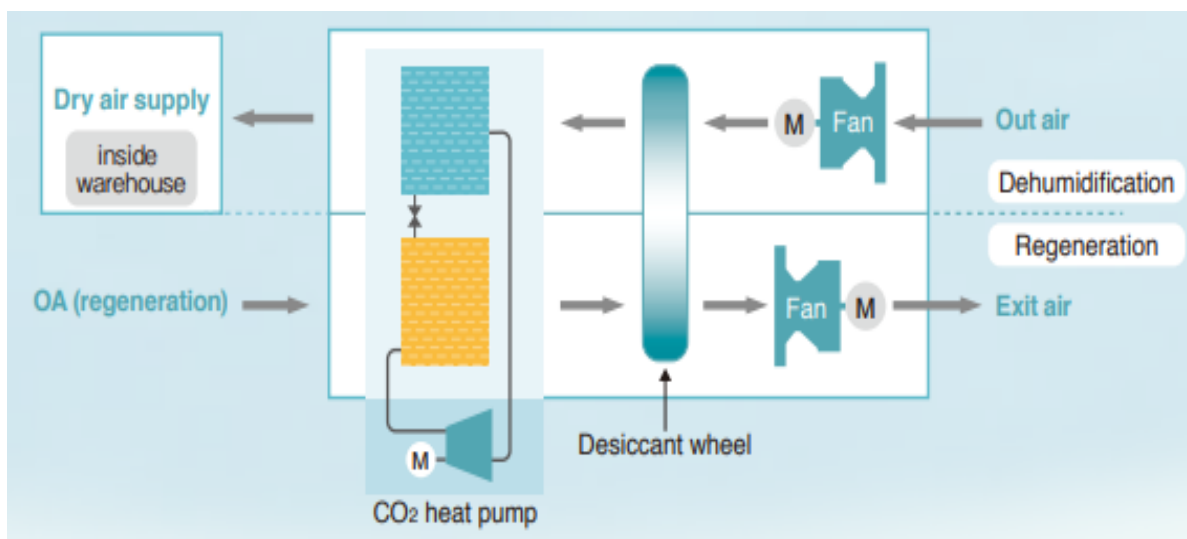
- e Metodologija modeliranja:
  - e Razvijeni kalibrisani energetske modeli objekata
  - e Referentna potrošnja (baseline): zasnovana na stvarno izmerenim računima za energijukorišćeni AMY meteorološki podaci (stvarna godina)
  - e Ulazni podaci:
    - e projektna dokumentacija i informacije sa terena
    - e operativni režimi iz BAS sistema
    - e procena unutrašnjih opterećenja i ventilacije
  - e Kalibracija modela:
    - e usklađivanje simulacije sa stvarnom potrošnjom energije omogućava pouzdanu procenu uticaja retrofit mera
- e Kalibracija modela: ASHRAE Guideine 14
  - e Kriterijumi:  $NMBE \leq 5\%$  |  $CV(RMSE) \leq 15\%$  (mesečno)
- e Modelovanje isparavanja leda:
  - e Stopa isparavanja =  $f(T\_leda, RH\_dvorane)$

Parametar	Vrednost	Izvor
Temperatura površine leda	-5 do -3 °C	Tipičan režim rada dvorane
Temperatura vazduha u dvorani	8-12 °C	Radni uslovi
Relativna vlažnost vazduha	40-50 %	Zadate vrednosti regulacije
Protok vazduha odvlaživača	1900-6800 m <sup>3</sup> /h	Tehnička dokumentacija
Vremenski podaci (kalibracija)	AMY	Lokalni meteorološki podaci
Vremenski podaci (referentni)	TMY	Lokalni meteorološki podaci

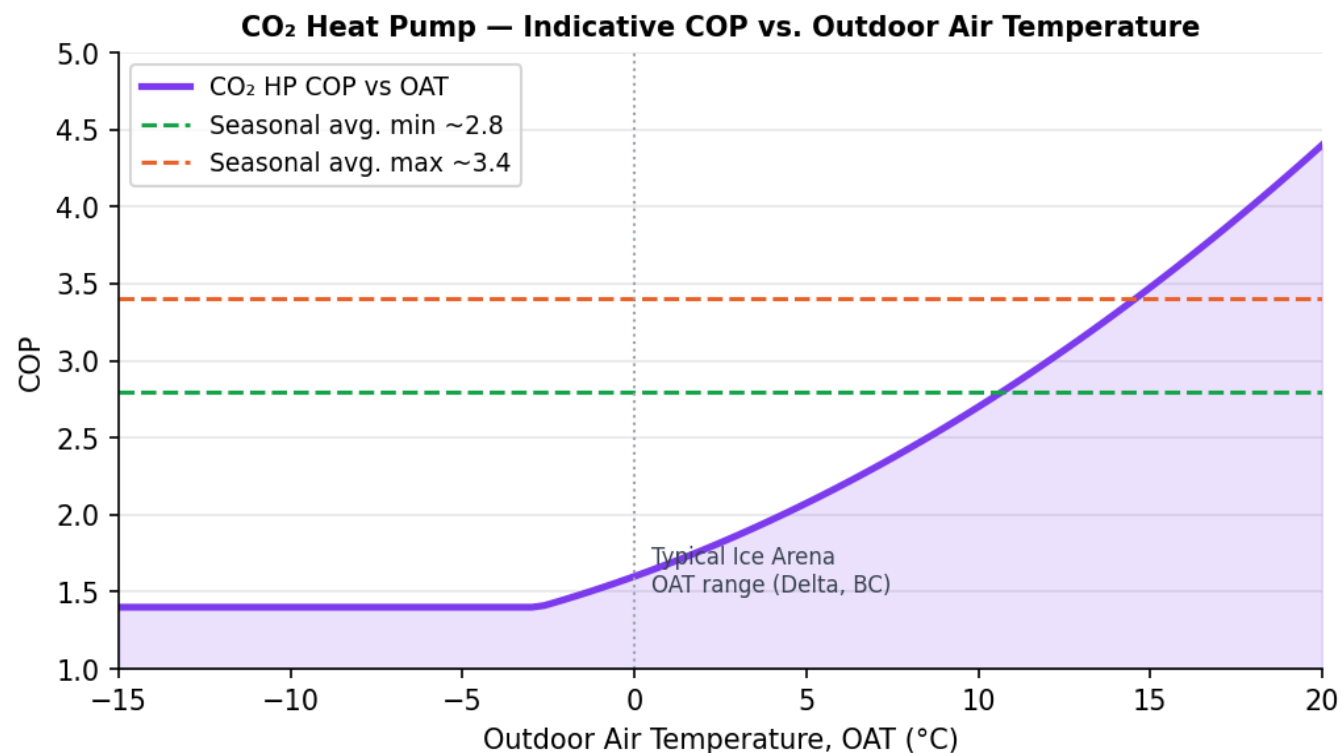
- e Četiri opštinska klizišta — Grad Delta, Britanska Kolumbija, Kanada
- e Ladner Leisure Centre
  - e Višenamenska dvorana: klizalište + bazen + kancelarije | 2x60 kW Munters
- e South Delta Recreation Centre (SDRC)
  - e Dve klizačke staze, zajednički mašinski prostor | 140 kW Toromont Cimco
- e North Delta Recreation Centre (NDRC)
  - e Klizalište + fitnes + zajednica + otvoreni bazen | 40+120 kW Munters
- e Tilbury Ice Arena
  - e Jedna staza, jednostavni sistemi | 120 kW Munters — najstarija jedinica



- e Isti desikantni rotor — CO<sub>2</sub> toplotna pumpa zamenjuje gasni sagorevač
- e CO<sub>2</sub> (R744) gas-kuler obezbeđuje toplotu za reaktivaciju — bez sagorevanja
- e Samo povratni vazduh; niža temperatura napajanja u poređenju s gasnim uređajima
- e Ključne prednosti CO<sub>2</sub> toplotne pumpe za klizačke dvorane
  - e Transkritični ciklus: efikasno zagrevanje pri promenljivim spoljnim temperaturama
  - e GWP = 1 — najniži faktor globalnog zagrevanja od svih rashladnih fluida
  - e Sezonski prosečni COP: 2,8–3,4 u svim četiri dvorane
- e Referentni primer iz prakse: CO<sub>2</sub> TP odvlaživač u dvorani Saitama, Japan (Mayekawa)

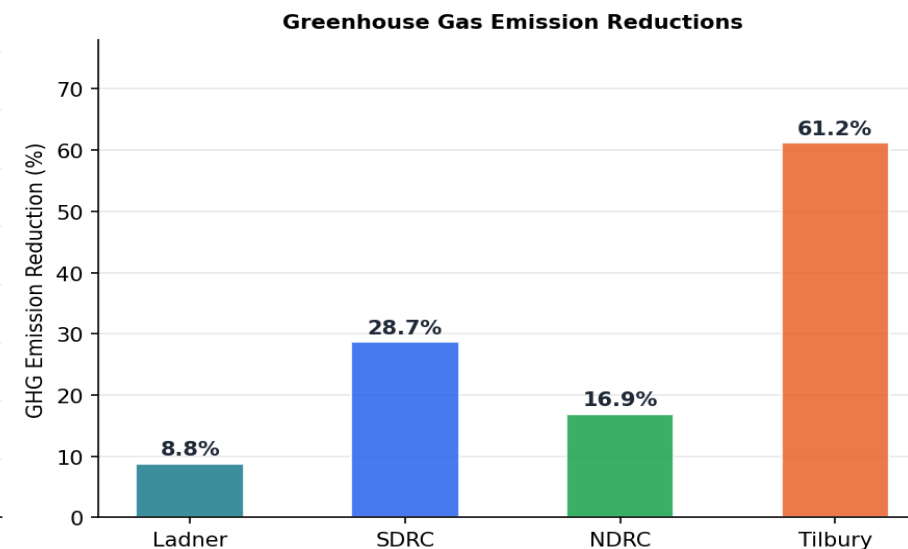
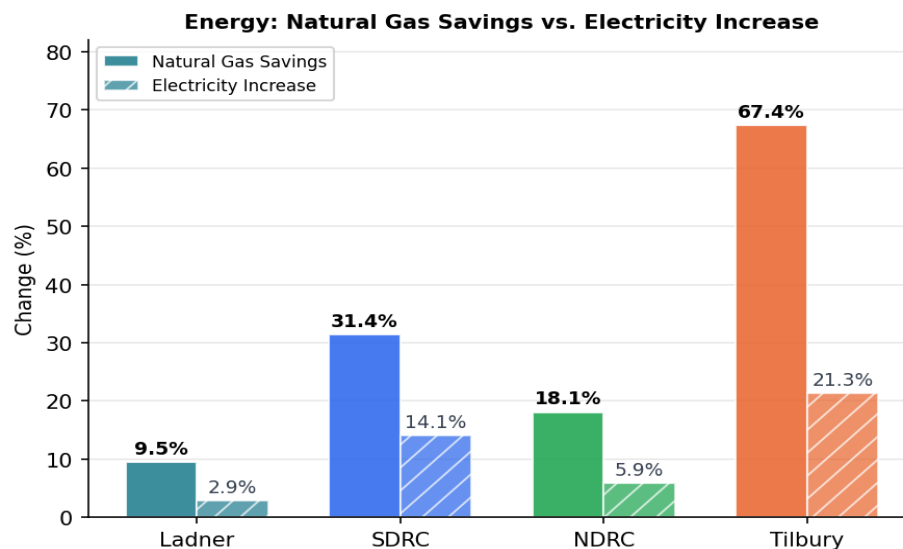


- e Retrofit u simulaciji: gasni sagorevač → CO<sub>2</sub> TP | COP = f(spoljna T, PLR)
- e CO<sub>2</sub> TP model:
  - e COP = f(spoljna temperatura, parcijalno opterećenje)
- e Validacija:
  - e Usklađenost sa stvarnim računima za energiju (ovo je dovoljno — ne ubacuj NMBE/CVRMSE na slajd)



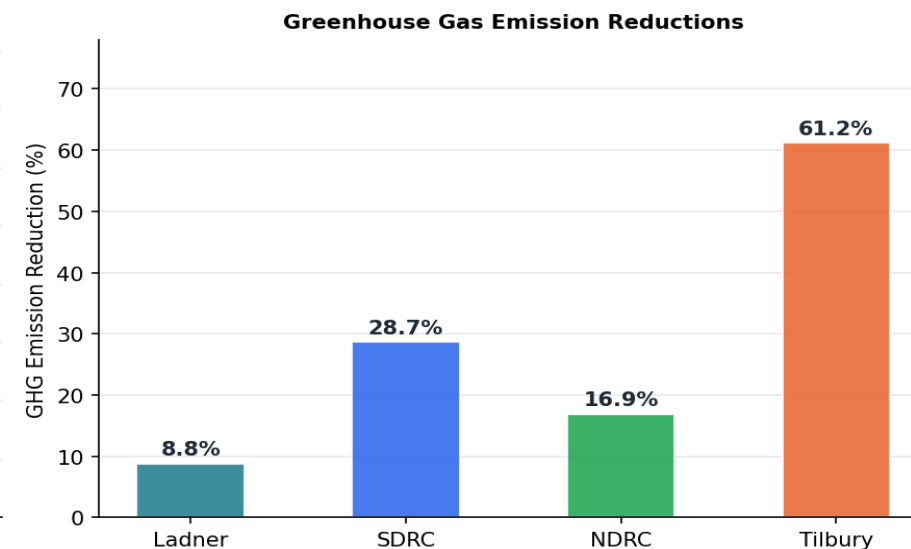
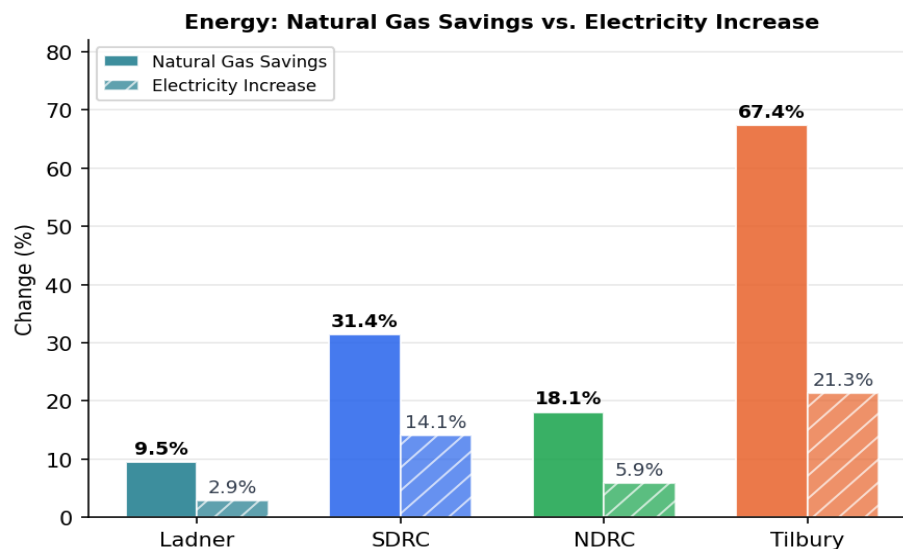
- e Značajne uštede prirodnog gasa u svim četiri objektima
- e Tilbury: -67% NG | +21% el. | Sezonski COP 3,36
- e SDRC: -31% NG | +14% el. | Sezonski COP 2,80
- e NDRC: -18% NG | +6% el. | Sezonski COP 3,12
- e Ladner: -9,5% NG | +3% el. | Sezonski COP 3,19
- e Tilbury — najveće uštede: jednostavna zgrada, odvlaživač dominira energetske bilansom
- e Ladner: bazen i kancelarije smanjuju udeo odvlaživača u ukupnoj potrošnji NG
- e Povećanje el. energije znatno manje od uštede gasa — i energetske i ugljenično

Simulation Results: CO<sub>2</sub> HP Dehumidifier Retrofit — Four Delta Arenas

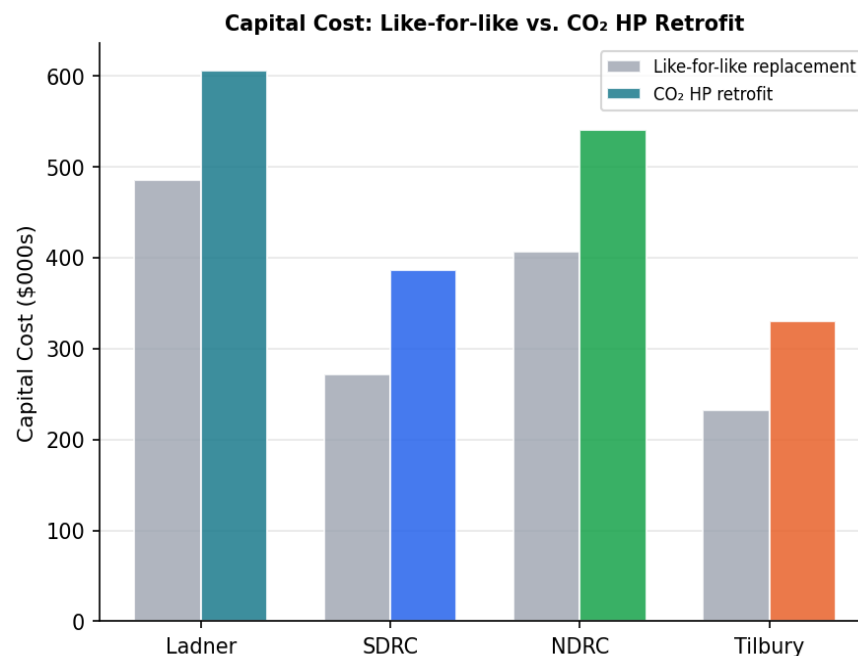
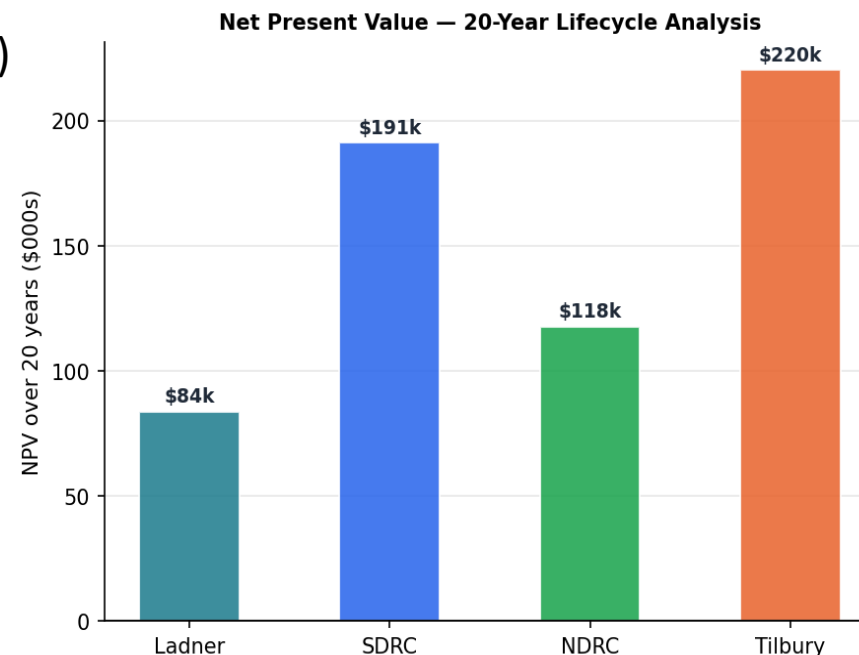


- e Smanjenje emisija GHG: 8,8% – 61,2% u svim objektima
- e Tilbury: -61% | SDRC: -29% | NDRC: -17% | Ladner: -9%
- e Niskokarbonom hidro-mreža Britanske Kolumbije pojačava benefit elektrifikacije
  - e Emisioni faktor el. energije BC: ~12 gCO<sub>2</sub>e/kWh (hidroenergija dominira)
  - e Prirodni gas: ~1,9 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> — direktna zamena donosi znatnu redukciju
- e Rezultati su konzervativni: bez optimizacije ventilacije ili rekuperacije toplote
- e Potencijal za dalja poboljšanja kroz integraciju sa rashladnim sistemom dvorane
- e Elektrifikacija odvlaživača: put ka dekarbonizaciji u skladu s ciljevima BC

Simulation Results: CO<sub>2</sub> HP Dehumidifier Retrofit — Four Delta Arenas



- Pozitivan neto sadašnji vrednost (NPV) za sva četiri objekta (horizont 20 god.)
- Ladner:  $\Delta\text{CapEx}$  +120.253 CAD | Ušteda/god. 4.389 CAD | NPV 83.763 CAD
- SDRC:  $\Delta\text{CapEx}$  +114.715 CAD | Ušteda/god. 5.894 CAD | NPV 191.439 CAD
- NDRC:  $\Delta\text{CapEx}$  +134.493 CAD | Ušteda/god. 4.040 CAD | NPV 117.737 CAD
- Tilbury:  $\Delta\text{CapEx}$  +98.892 CAD | Ušteda/god. 7.172 CAD | NPV 220.498 CAD
- Cena ugljika — ključni faktor ekonomske opravdanosti
  - Pretpostavka rastuće cene ugljenika prema BC politici
  - Bez ugljičnog poreza NPV bi bio negativan za neke objekte
- Tilbury pokazuje best-case: visoka ušteda gasa, najniži inkrementalni CapEx



- e CO<sub>2</sub> TP odvlaživanje: izvodljiv put elektrifikacije za klizačke dvorane
- e Uštede NG: 9% – 67% | Smanjenje GHG: 9% – 61% u zavisnosti od objekta
- e Povećanje el. energije znatno manje od uštede gasa
- e Konzervativne procene — dodatne uštede moguće kroz:
  - e Optimizaciju strategija upravljanja ventilacijom
  - e Integraciju rekuperacije toplote rashladnog sistema s odvlaživanjem
- e Ekonomska opravdanost potvrđena za sva četiri objekta u 20-godišnjem životnom ciklusu
- e Politike cene ugljika igraju ključnu ulogu u opravdavanju viših kapitalnih troškova
- e Dalji pravci: integracija rekuperacije toplote + optimizacija upravljanja
  - e Opcija A — Zasebna CO<sub>2</sub> toplotna pumpaOdvojeni sistem za odvlaživanjeIzvor toplote: spoljašnji ili povratni vazduhJednostavna implementacija, ali viši energetska zahtev
  - e Opcija B — Integrisani CO<sub>2</sub> sistem (rashlađivanje + rekuperacija)Jedinstven CO<sub>2</sub> ciklus za hlađenje leda i proizvodnju toploteToplota iz gas-coolera koristi se za regeneraciju rotoraMinimalni dodatni energetski input (nema zasebnog sistema)
  - e Opcija C — Kaskadni / višestepeni CO<sub>2</sub> sistemiVišestepena kompresija ili kombinacija ciklusaOmogućava veći temperaturni liftStabilniji rad pri zahtevnim uslovima

# HVALA NA PAŽNJI!

Thank you for your attention!

**Ovo istraživanje podržao je Fond za nauku Republike Srbije, grant br. 4344, *Forward-Looking Framework for Accelerating Households' Green Energy Transition—FFGreEN*, kao i Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, prema Ugovoru br. 451-03-34/2026-03/200105 (Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu) i Ugovoru br. 451-03-33/2026-03/200213 (Inovacioni centar Mašinskog fakulteta).**

Kontakt podaci autora  
dr Dimitrije Manić  
[dimitrije.manic@gmail.com](mailto:dimitrije.manic@gmail.com)



## ENERGY ENERGETIKA 2026

