

B01 — Rashladni sustav data-centra (staging)

FMU model i upute za PLC · chiller + waterside economizer · uklop chillera on/off

Verzija 2.0

Studentska vježba — Homa Virtual Plant (Model-in-the-Loop)

Homa inženjering

www.homa.hr · info@homa.hr

© 2026 Homa inženjering. Sva prava pridržana.

Sadržaj

1. Cilj vježbe.....	3
2. Opis procesa.....	3
3. FMU sučelje — signali.....	4
3.1. Ulazi u FMU.....	4
3.2. Izlazi iz FMU-a (mjerjenja koja PLC čita).....	5
4. Režimi rada i kombinacije ventila.....	6
5. Što PLC treba postići (ciljevi upravljanja).....	6
6. Detekcija grešaka — preporučene granice protoka i tlaka.....	7
7. Nadzor vremena hoda ventila.....	7
8. Parametri koje operater zadaje preko HMI-a.....	8
9. Na što još treba paziti (međublokade i zamke).....	8
10. Predložena struktura upravljanja (smjernica).....	8
11. Preporučene brzine (sample time).....	9
12. Testni scenariji i kriteriji prihvata.....	9
13. Povezivanje u Homa Virtual Plant.....	9
14. Napomene o modelu.....	10

1. Cilj vježbe

Dobivaš **FMU model** realnog rashladnog sustava data-centra (chiller + waterside economizer) s **pravom hidraulikom**. Zadatak je preko **Homa Virtual Planta** spojiti PLC na model i napisati **PLC program koji vodi cijeli proces**.

Ovo je **Model-in-the-Loop (MIL)** postava: model glumi postrojenje, a **svu regulaciju, sekvence, zaštite i detekciju grešaka radi tvoj PLC**. Model NE sadrži nikakve granice, alarme ni logiku prebacivanja — sve to projektiraš i ugrađuješ ti u programu, prema ovom funkcionalnom opisu.

Ova inačica (**B01 — staging**) upravlja chillerom preko signala `u_chiller_enable` (uklop chillera (on/off)). Postoji i srodni model: *B02 (kontinuirano upravljanje kapacitetom chillera, u_chiller 0..1)* — hidraulika i sve ostalo su identični, razlikuje se samo taj jedan signal.

Bitno: model daje samo sirove procesne vrijednosti (protok, tlak, temperatura...). Sve pragove (npr. minimalni protok, maksimalni tlak), zaštite i međublokade **definira programer u PLC-u**. Nepravilna kombinacija ventila ili rad bez protoka u modelu se očituje kao fizikalno ponašanje (nizak protok, visok tlak, porast temperature), a na PLC-u je da to prepozna.

2. Opis procesa

Sustav hladi IT opremu data-centra i temelji se na primjeru **Buildings.Examples.ChillerPlant** (LBNL). Sastoji se od dva vodena kruga povezana kroz chiller i izmjenjivač slobodnog hlađenja (WSE):

- **Krug rashladne vode (CHW):** CHW pumpa tjera vodu koja preuzima toplinu IT opreme (`u_it_load`), a zatim serijski prolazi kroz WSE stupanj i chiller stupanj te se vraća u spremnik.
- **Krug kondenzatorske vode (CW):** CW pumpa tjera vodu kroz rashladni toranj (hladi je prema vlažnom termometru), a ta hladna voda preuzima toplinu iz kondenzatora chillera i/ili WSE.
- **Chiller** — mehaničko hlađenje: evaporator oduzima toplinu CHW, kondenzator je predaje CW. Veći učin = veća potrošnja (`y_chiller_power`).
- **WSE (waterside economizer)** — „slobodno hlađenje“: kad je toranjska voda dovoljno hladna, CHW se hladi izravno preko izmjenjivača, bez chillera. Učinkovitost (`y_wse_eps`) ovisi o protoku.
- **Rashladni toranj** — odvodi toplinu u okolinu; učin raste s brzinom ventilatora (`u_tower_fan`) i pada s višim vlažnim termometrom (`u_wet_bulb`).

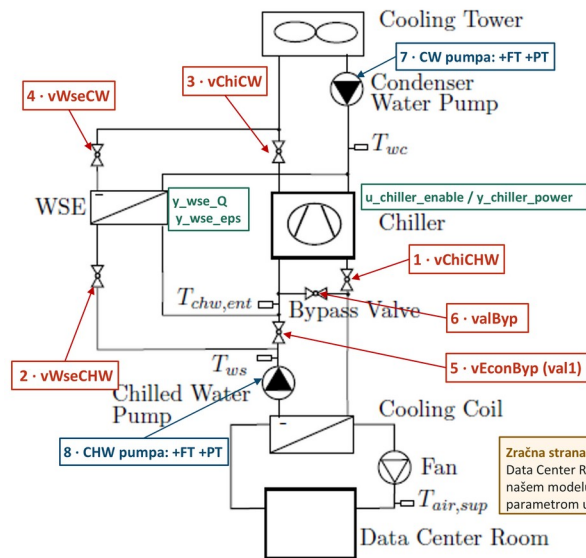
Serijski (integrirani) raspored CHW kruga:

Rashladna voda ide **serijski** kroz dva stupnja (kao u LBNL originalu):

- **WSE stupanj:** nakon IT tereta voda ide kroz `vWseCHW` → WSE izmjenjivač *ili* kroz `vEconByp` (`val1`) → obilazak WSE.
- **Chiller stupanj:** zatim kroz `vChiCHW` → chiller (evaporator) *ili* kroz `valByp` → obilazak chillera, pa natrag u spremnik.

Time WSE **predhladi**, a chiller **dohladi istu struju** — pa `y_chiller_power` stvarno padne kad WSE radi (pravi integrirani ekonomajzer). Kombinacijom ventila voda se vodi kroz chiller, WSE ili oboje — čime se biraju **tri režima rada** (poglavlje 4).

HomaVP B01 — originalna shema (LBNL Buildings ChillerPlant) s dodanim FMU oznakama



Dodane / mapirane FMU oznake

Izolacijski ventili (0/1) — krajnji prekidači y_val_*_open/_closed:

- 1 · vChiCHW — CHW kroz chiller (evaporator)
- 2 · vWseCHW — CHW kroz WSE
- 3 · vChiCW — CW kroz chiller (kondenzator)
- 4 · vWseCW — CW kroz WSE
- 5 · vEconByp (val1) — obilazak WSE stupnja

Modulirajući ventil:

- 6 · valByp — Bypass Valve (obilazak chillera), 0..1

Senzori po pumpi:

- 7 · CW pumpa: y_cw_flow, y_cw_press
- 8 · CHW pumpa: y_chw_flow, y_chw_press, y_chw_press_in

Temperature (u Kelvinima):

- T_ws = y_T_ws (polaz CHW) · T_chw_ent = y_T_chw_ent (ulaz u chiller)
- T_wc = y_T_wc (kondenzatorska, iz tornja)

Chiller / WSE / aktuatori:

- Chiller: u_chiller_enable, y_chiller_power · WSE: y_wse_Q, y_wse_eps
- Pumpe/toranj: u_pump_chw, u_pump_cw (RPM), u_tower_fan, u_wet_bulb

Slika 1. Procesna shema HomaVP B01 (na temelju LBNL ChillerPlant). Crveno = ventili (PLC upravlja preko u_val_*), plavo = senzori po pumpi, tirkizno = chiller/WSE.

Novi senzori (nisu na originalnoj shemi): po svakoj pumpi dodani su senzor protoka i tlaka (y_chw_flow, y_chw_press, y_cw_flow, y_cw_press), te **krajnji prekidači** svakog izolacijskog ventila (otvoren/zatvoren). Oni su ključni za nadzor i detekciju grešaka koju gradiš u PLC-u.

3. FMU sučelje — signali

Obrati pažnju na smjer signala:

Smjer signala: ono što je za FMU **ULAZ**, za tvoj PLC je **IZLAZ** (naredba); ono što je za FMU IZLAZ, PLC čita kao mjerenje.

Jedinice temperature: sve temperature (y_T_ws, y_T_chw_ent, y_T_wc) model daje u **Kelvinima [K]**. U PLC-u pretvori u °C: $^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273.15$. Npr. cilj polaza $7^{\circ}\text{C} = 280.15\text{ K}$. u_wet_bulb je iznimka — zadaje se u °C.

3.1. Ulazi u FMU

a) Aktuatori — njih upravlja tvoj PLC (PLC izlazi):

Varijabla (FMU)	Tip	Jedinica	Raspon	Opis
u_pump_chw	Real	RPM	0 – 1800	Naredba brzine CHW (rashladne) pumpe
u_pump_cw	Real	RPM	0 – 1800	Naredba brzine CW (kondenzatorske) pumpe
u_chiller_enable	Real	–	0 / 1	Uklon chillera (0 = isključen, 1 = uključen) — staging (on/off)
u_tower_fan	Real	–	0.0 – 1.0	Brzina ventilatora rashladnog tornja
u_val_chi_chw	Real	–	0 / 1	Izolacijski ventil: CHW kroz chiller

Varijabla (FMU)	Tip	Jedinica	Raspon	Opis
				(evaporator)
u_val_wse_chw	Real	–	0 / 1	Izolacijski ventil: CHW kroz WSE (izmjenjivač)
u_val_econ_byp	Real	–	0 / 1	Izolacijski ventil: obilazak WSE stupnja (val1)
u_val_chi_cw	Real	–	0 / 1	Izolacijski ventil: CW kroz chiller (kondenzator)
u_val_wse_cw	Real	–	0 / 1	Izolacijski ventil: CW kroz WSE
u_val_byp	Real	–	0.0 – 1.0	Modulirajući bypass oko chillera (CHW strana)

b) Smetnje / scenarij — okolina i radni uvjeti; postavljaju se na HMI-u, NE regulira ih PLC:

Varijabla (FMU)	Tip	Jedinica	Raspon	Opis
u_it_load	Real	W	0 – 50000	Toplinski teret IT opreme (grije rashladnu vodu)
u_wet_bulb	Real	°C	~0 – 25	Temperatura vlažnog termometra (ulaz u model tornja)

3.2. Izlazi iz FMU-a (mjerjenja koja PLC čita)

Varijabla (FMU)	Tip	Jedinica	Raspon	Opis
y_chw_flow	Real	kg/s	~0 – 0.6	Protok rashladne vode (iza CHW pumpe)
y_chw_press	Real	Pa	~1.0e5 – 2.2e5	Tlak na tlačnoj strani CHW pumpe
y_chw_press_in	Real	Pa	~1.0e5 – 1.2e5	Tlak na usisu CHW pumpe
y_pump_chw_speed	Real	RPM	0 – 1800	Stvarna brzina CHW pumpe
y_cw_flow	Real	kg/s	~0 – 0.6	Protok kondenzatorske vode (iza CW pumpe)
y_cw_press	Real	Pa	~1.0e5 – 2.2e5	Tlak na tlačnoj strani CW pumpe
y_T_ws	Real	K	~278 – 295	Polazna (miješana) CHW temperatura iz spremnika — glavna regulirana veličina
y_T_chw_ent	Real	K	~278 – 305	CHW temperatura na ulazu u chiller stupanj (nakon WSE predhlađenja)
y_T_wc	Real	K	~276 – 300	Temperatura kondenzatorske vode iza tornja (hladni dovod)
y_chiller_power	Real	W	0 – ~4000	Električna snaga kompresora chillera
y_wse_Q	Real	W	0 – ~20000	Toplinski učin WSE (prijenos CHW → CW)
y_wse_eps	Real	–	0 – 1	Efektivnost WSE (opada s protokom)

Ventili — pozicija i krajnji prekidači (svih 5 izolacijskih ventila ima konačan hod; prekidač je 1 kad je ventil potvrđeno u krajnjem položaju. valByp je modulirajući — ima samo poziciju):

Ventil	Pozicija 0..1	Otvoren 0/1	Zatvoren 0/1
chiller CHW (vChiCHW)	y_val_chi_chw_pos	y_val_chi_chw_open	y_val_chi_chw_closed
WSE CHW (vWseCHW)	y_val_wse_chw_pos	y_val_wse_chw_open	y_val_wse_chw_closed
obilazak WSE (vEconByp / val1)	y_val_econ_byp_pos	y_val_econ_byp_open	y_val_econ_byp_closed
chiller CW (vChiCW)	y_val_chi_cw_pos	y_val_chi_cw_open	y_val_chi_cw_closed
WSE CW (vWseCW)	y_val_wse_cw_pos	y_val_wse_cw_open	y_val_wse_cw_closed
bypass chillera (valByp)	y_val_byp_pos	— (modulirajući)	—

4. Režimi rada i kombinacije ventila

Proces ima **tri režima hlađenja**, a režim se bira **kombinacijom položaja ventila i upravljanjem chillera**. Ovo mora ispravno voditi tvoj PLC:

Režim	vChiCHW	vWseCHW	vEconByp	vChiCW	vWseCW	valByp	u_chiller_enable	Kada se koristi
Mehaničko (chiller)	OTVOREN	zatvoren	OTVOREN	OTVOREN	zatvoren	modulira / 0	1	Toplo; vlažni termometar previsok za slobodno hlađenje. WSE zaobiđen.
Slobodno (WSE)	zatvoren	OTVOREN	zatvoren	zatvoren	OTVOREN	OTVOREN	0	Hladno; T _{wc} dovoljno ispod cilja — chiller nije potreban, WSE hladi sam.
Integrirano	OTVOREN	OTVOREN	zatvoren	OTVOREN	OTVOREN	modulira	1	Prijelazno; WSE predhladi, chiller dohlađuje istu struju do cilja.

Pravilo protoka (serijski krug): u **WSE stupnju** uvijek mora biti otvoren barem jedan put — vWseCHW ILI vEconByp; u **chiller stupnju** barem jedan — vChiCHW ILI valByp. Ako se u nekom stupnju zatvore oba puta, CHW pumpa ostaje bez izlaza (deadhead).

Ključna pravila prijelaza:

- Chiller (evaporator) traži **i CHW i CW protok**: u mehaničkom/integriranom modu moraju biti otvoreni vChiCHW i vChiCW, a obje pumpe raditi. U modelu chiller bez protoka kroz obje grane **fizički ne hladi** — pa je to i prirodna međublokada.
- U slobodnom modu **isključi chiller** (u_chiller_enable=0) i zaobiđi ga (valByp otvoren, vChiCHW zatvoren); WSE ventili otvoreni, vEconByp zatvoren. WSE hladi samo ako je y_T_{wc} dovoljno ispod y_T_{chw_ent} (inače y_wse_Q≈0).
- Pri prijelazu režima **prvo otvori nove putove i potvrdi krajnjim prekidačima, pa tek onda zatvaraj stare** — da pumpa nikad ne ostane bez protoka. valByp i vEconByp koristi za osiguranje protoka tijekom prijelaza.

5. Što PLC treba postići (ciljevi upravljanja)

Tvoj PLC program treba:

- Držati polaznu temperaturu y_T_{ws} oko zadanog cilja (npr. 7–10 °C) uz što manju potrošnju.
- Voditi obje pumpe na potreban protok i **nadzirati protok i tlak po pumpi** (min protok, max tlak).

3. Birati režim (mehaničko / slobodno / integrirano) prema y_T_wc i u_wet_bulb ; koristiti slobodno/integrirano hlađenje kad god je moguće.
4. Ispravno sekvencirati ventile uz **nadzor vremena hoda i krajnjih prekidača** (poglavlje 7).
5. Detektirati greške (poglavlje 6) i sigurno reagirati (alarm, zaustavljanje pumpe, zatvaranje/otvaranje ventila).
6. Izbjegavati prečesto paljenje/gašenje chillera (anti-cycling, min vremena).

Ciljevi su zadani; **način regulacije osmišljavaš sam**.

6. Detekcija grešaka — preporučene granice protoka i tlaka

Model ne javlja greške — **granice i logiku detekcije gradiš u PLC-u**. Preporučeni postupak: u normalnom radu na radnoj brzini pumpe očitaj tipične y_*_flow i y_*_press , pa granice postavi relativno na te vrijednosti (npr. min protok = 30–40% nazivnog).

Primjer granica (kalibriraj na svom sustavu): nizak protok < 0.15 kg/s dok pumpa radi; visok tlak > $2.1 \cdot 10^5$ Pa (deadhead/začepljenje); nizak tlak < $1.1 \cdot 10^5$ Pa dok pumpa radi (puknuće/ispad); visok protok > 0.6 kg/s (curenje).

Kvar	Simptom na senzorima	Preporučena detekcija (logika)
Ventil se ne otvara (zaglavljeno)	Naredba otvaranja, ali $_open$ ostaje 0; protok te grane nizak, tlak visok	$_open \neq 1$ unutar vremena hoda + rezerva → alarm ventila
Ventil se ne zatvara	Naredba zatvaranja, ali $_closed$ ostaje 0; protok teče granom koja bi trebala biti zatvorena	$_closed \neq 1$ unutar vremena hoda + rezerva → alarm
Deadhead (nema izlaznog puta)	Pumpa radi, ali protok ~ 0 i tlak visok	$y_flow < min_flow$ I $y_press > max_press$ I brzina > 0
Puknuće / curenje cijevi	Tlak nizak, protok neuobičajeno visok, razina pada	$y_press < min_press$ I $y_flow > max_flow$
Začepljena cijev / prljav filter	Protok nizak uz visok tlak na pumpi (djelomični deadhead)	$y_flow < min_flow$ I $y_press > nazivni$, pri normalnoj brzini
Ispad / kvar pumpe	Naredba brzine > 0, ali stvarna brzina/protok/tlak niski	$u_pump > 0$ I $y_pump_speed \ll$ naredba I $y_flow < min_flow$

- **Kombiniraj uvjete** (protok I tlak I stanje ventila/pumpe) da razlikuješ slične kvarove — npr. deadhead (oba puta stupnja zatvorena) od začepljenja (djelomično).
- Koristi **razinu spremnika/bilancu** i trend (pad tlaka + porast protoka + pad razine) kao dodatnu potvrdu puknuća.

7. Nadzor vremena hoda ventila

Izolacijski ventili imaju **konačan hod** — ne otvaraju/zatvaraju se trenutno. PLC mora pratiti vrijeme i krajnje prekidače:

1. Na svaku naredbu otvaranja/zatvaranja **pokreni timer** za taj ventil.
2. Ventil mora doći u krajnji položaj unutar dozvoljenog vremena: $y_val_*_open = 1$ (za otvaranje) odn. $y_val_*_closed = 1$ (za zatvaranje), unutar **$T_max = \text{vrijeme hoda} + \text{rezerva}$** .

3. Ako prekidač ne dođe unutar T_{max} → **alarm „ventil ne reagira“** i sigurna reakcija (npr. zaustavi sekvencu, ne pali chiller, zaštiti pumpu).
4. U sekvencama **čekaj potvrdu prekidača prije sljedećeg koraka** — nikad ne pretpostavljaj da je ventil već u položaju.

Vrijeme hoda: u modelu je vrijeme hoda parametar (t_{valve_iso} , t_{valve_mod}). Za brže testiranje zadano je nisko (~5 s izolacijski, ~8 s modulirajući); **realno je 45–60 s (veliki ventili i do 90–150 s)**. T_{max} u PLC-u uskladi s vrijednošću koju koristiš u modelu.

8. Parametri koje operater zadaje preko HMI-a

Preporučeni parametri i zadane vrijednosti na HMI-u tvog PLC-a:

- **Postavna polazna temperatura CHW** (npr. 7–10 °C) i dozvoljeni pojas.
- **Prag za slobodno hlađenje:** granica y_{T_wc} / u_{wet_bulb} ispod koje se prelazi na WSE.
- **Granice zaštite:** min/max protok i tlak po krugu (CHW i CW).
- **Maksimalno vrijeme hoda ventila** (T_{max} otvaranje/zatvaranje) za dojavu kvara.
- **Min protok i min brzina pumpe** prije uklopa chillera; min vrijeme rada/mirovanja chillera (anti-cycling).
- **Radni uvjeti / scenarij:** IT teret (u_{it_load}) i vlažni termometar (u_{wet_bulb}).
- **Odabir režima** (auto/ručno) i pragovi za automatsko prebacivanje.

9. Na što još treba paziti (međublokade i zamke)

- **Chiller pali tek uz protok:** ne uključuj $u_{chiller_enable}$ dok y_{chw_flow} i y_{cw_flow} nisu iznad minimuma i dok chiller ventili nisu potvrđeno otvoreni.
- **Ne ostavljaj pumpu u deadheadu:** u svakom stupnju CHW kruga drži otvoren barem jedan put; prije zatvaranja svih izlaznih ventila spusti/ugasi pumpu.
- **Sekvenciranje prijelaza:** otvori i potvrdi nove putove prije zatvaranja starih.
- **WSE ima smisla samo uz hladan toranj:** ako y_{T_wc} nije ispod $y_{T_chw_ent}$, WSE ne hladi (ili čak grije) — tada koristi chiller.
- **Temperature su u Kelvinima** — pretvori u °C prije usporedbe sa setpointima.
- **Anti-cycling i staging:** izbjegavaj naizmjenično paljenje chillera oko praga; koristi histerezu i min vremena.

10. Predložena struktura upravljanja (smjernica)

Brza razina (svaki ciklus, ~1 s):

- Regulacija pumpi: prema potrebnom protoku / tlaku (PI), uz nadzor granica.
- Regulacija temperature: prema y_{T_ws} vodi $u_{chiller_enable}$ (uklop/isklop chillera uz histerezu) i/ili ventilator tornja u_{tower_fan} .

Sporija razina (staging / odabir režima, 10–60 s):

- Odabir režima prema y_{T_wc} i opterećenju; sekvence ventila s potvrdom prekidača; anti-cycling chillera.

Zaštitna razina (stalno):

- Detekcija grešaka (poglavlje 6), nadzor vremena hoda ventila (poglavlje 7), sigurne reakcije i alarmi.

11. Preporučene brzine (sample time)

Sloj	Preporučeni ciklus
Regulacijske petlje (pumpe, temperatura)	0.5 – 1 s
Nadzor ventila / sekvence	0.2 – 1 s
Odabir režima / staging	10 – 60 s
Komunikacijski korak FMU co-simulacije	~1 s

Model je konfiguriran za **StopTime 600 s** (Interval 1 s); to je samo konačno vrijeme simulacije — u zatvorenoj petlji tempo vodi Homa VP, a proces se vrti do ustaljenog stanja.

12. Testni scenariji i kriteriji prihvata

Scenarij	Kako izazvati	Očekivano ponašanje PLC-a	Kriterij prolaza
Mehaničko hlađenje	Pumpe na radnu brzinu, chiller ventili otvoreni, WSE zaobiđen (u_chiller_enable aktivan)	y_T_ws pada prema cilju, y_chiller_power>0, y_wse_Q≈0	Temperatura u pojasu, protok/tlak u granicama
Slobodno hlađenje	WSE ventili otvoreni, chiller zaobiđen (valByp otvoren, u_chiller_enable=0), nizak u_wet_bulb	y_wse_Q>0, y_T_ws pada bez rada chillera	y_chiller_power≈0, cilj postignut
Integrirani režim	WSE u liniji + chiller radi; prati y_chiller_power	WSE predhladi → y_chiller_power niži nego u čisto mehaničkom	Manja snaga chillera uz isti cilj
Prijelaz režima	Prebaci mehaničko → slobodno	Otvora nove putove i potvrđuje prekidačima prije zatvaranja starih	Pumpa uvijek ima protok; bez deadheada
Ventil ne odgovara	Zadrži naredbu ventila bez potvrde prekidača (simulacija)	Alarm nakon isteka vremena hoda	Detekcija i sigurna reakcija
Skok IT tereta	u_it_load 10 → 40 kW	Pojačati hlađenje (kapacitet, pumpe, toranj)	y_T_ws se vrati u pojas
Deadhead test	Zatvori sve izlazne CHW ventile jednog stupnja dok pumpa radi	Prepoznati nizak protok + visok tlak, reagirati	Alarm; pumpa zaštićena

Opći kriteriji: regulirane veličine u granicama, ispravan odabir režima, pravilno sekvenciranje ventila i pouzdana detekcija grešaka.

13. Povezivanje u Homa Virtual Plant

- Izvezi model kao DataCenterChillerStaging_600.fmu (FMU 2.0, Co-Simulation) i učitaj u Homa VP.
- Mapiraj FMU varijable: **aktuatore** (u_*) kao izlaze PLC-a, **mjerjenja** (y_*) kao ulaze.
- Smetnje (u_it_load, u_wet_bulb) postavi na HMI-u kao radne uvjete i testove.

4. Odaberi komunikacijski kanal i pokreni zatvorenu petlju (korak ~1 s).

14. Napomene o modelu

Važno: model koristi **reduciranu fiziku** (prava hidraulika, ali pojednostavljeni chiller/WSE/toranj). Parametri su ilustrativni; namjena je razvoj i test PLC logike, ne točna procesna analiza.

- **Razlika B01/B02:** ovo je **B01 (staging)** — chiller preko `u_chiller_enable`. Srodni model je *B02 (kontinuirano upravljanje kapacitetom chillera, `u_chiller` 0..1)*; hidraulika i sučelje su inače identični.
- Model **ne simulira kvarove** niti sadrži granice/alarme — nenormalna očitavanja (deadhead, pregrijavanje) nastaju iz fizike, a njihova interpretacija je na PLC-u.
- Temeljeno na **Buildings.Examples.ChillerPlant** (LBNL Modelica Buildings Library). Shema je originalna LBNL shema, prilagođena ovom modelu (dodani senzori po pumpi i krajnji prekidači ventila, oznake FMU signala).
- Temperature su u K; `y_wse_eps` i pozicije ventila su bezdimenzijske 0..1.