

Pastato termofizinių savybių modeliavimas naudojant „Simulink“

Antanas Mikuckas

Kauno technologijos universiteto docentas,
daktaras
Kaunas University of Technology,
Assoc. Prof., PhD
Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas
Tel. (+370 37) 30 03 95
El. paštas: antanas.mikuckas@ktu.lt

Irena Mikuckienė

Kauno technologijos universiteto docentė,
daktarė
Kaunas University of Technology,
Assoc. Prof., PhD
Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas
Tel. (+370 37) 30 03 95
El. paštas: irena.mikuckiene@ktu.lt

Egidijus Kazanavičius

Kauno technologijos universiteto profesorius,
daktaras
Kaunas University of Technology, Prof., PhD
Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas
Tel. (+370 37) 30 03 86
El. paštas: ekaza@ifko.ktu.lt

Jonas Čeponis

Kauno technologijos universiteto lektorius,
daktaras
Kaunas University of Technology, Lecturer, PhD
Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas
El. paštas: cepojona@ifko.ktu.lt

Šildant pastatus ne tik užtikrinamas komfortas, bet ir energetiškai teršiama aplinka, o gaminant kurą teršiama atmosfera. Šildymui mažiau sunaudojant energijos sutaupoma lėšų ir mažinama tarša. Pasiūlytas pastato šiluminio balanso modelis leidžia įvertinti įvairių veiksnių (atitvarų šiluminę varžą, oro infiltracijos greitį, katilo galingumas, šildymo sistemos valdymo algoritmai ir t. t.) įtaką pastato šildymui sunaudojamos energijos kiekiui. Pateikiami modeliavimo rezultatai.

Šildant būstą labai svarbu taupyti energiją, nes taip mažinamos ne tik lėšos, bet ir energetinis aplinkos teršimas, atmosferos teršimas dėl kuro deginimo gaminant šiluminę energiją (Štreimikienė, Konstantinavičiūtė, 2003).

Viena iš pirmųjų Europos Bendrijoje realų žingsnį taupant energiją žengė Vokietija, nuo 2002 metų pradžios įvedusi normatyvą „Apie energiją tausojančią šilumosaugą ir energiją tausojančią šildymo įrangą pastatuose“ (*Energie einsparverordnung* – EnEV). Vokietijos taupymo politika leido energijos suvartojimą 2001 metais sumažinti 40%, palyginti su 1993 metais.

Buvo sujungtas į vieną sistemą šilumosaugos, šildymo, vėdinimo, šilumos tiekimo, šilumos generatorių ir karšto vandens ruošimo normavimas pereinant prie pastato pirminės energijos (kuro) normavimo. Analogiškos sistemos diegiamos Anglijoje, Prancūzijoje, Italijoje, kai kuriose JAV valstijose (ASHRAE, 2001).

Ribojamas metinis pirminės energijos sunaudojimas Q_p skaičiuojamas pagal formulę:

$$Q_p = (Q_h + Q_w)e_p; \quad (1)$$

čia: Q_h – metinis energijos sunaudojimas pastatui šildyti kWh/m², Q_w – metinis energijos su-

naudojimas karštam vandeniui ruošti, nustatytas $12,5 \text{ kWh/m}^2$, e_p – pirminės energijos panaudojimo efektyvumo koeficientas, randamas pagal DIN V 4701-10 (pavyzdžiui, individualiame name su dujiniu katilu $e_p = 1,1$).

Realiai projektuojant pasirinkti optimalų variantą nėra paprasta, nes architektūriniai ir inžineriniai sprendimai energetiškai efektyviame pastate ribojami sąlygomis, kurios fiksuojamos pirminėje projektavimo arba užduoties formavimo stadijoje ir negali būti vėliau pakeistos. Projektavimas turi būti vykdomas atsižvelgiant į ribojančias sąlygas ir optimalaus sprendimo turi būti ieškoma tomis sąlygomis. Todėl įvedamas projektinio sprendimo energetinio efektyvumo koeficientas η , kuris parodo skirtumą tarp projektuojamo ir labiausiai efektyvaus šiluminiu požiūriu pastato:

$$\eta = \frac{W_{min}}{W} \quad (2)$$

Kiekvieną pastatą galima nagrinėti kaip termodinaminę sistemą, kuriai galioja pirmasis termodinamikos dėsnis:

$$E_s = E_p + E_g - E_a \quad (3)$$

čia: E_s – pastato sukaupta energija, E_g – pastato energija, kurią pastatas gauna iš saulės radiacijos, būste esančių žmonių išspinduliuojamos energijos, įvairių veikiančių buitinių prietaisų išskiriamos energijos, E_a – pastato atiduodama į aplinką energija, E_p – tiekiamą į pastatą energija. Taupant energijos išteklius reikia minimizuoti tiekiamą į pastatą energiją E_p , išlaikant pastovią sukaupią pastato energiją E_s . Kaip išplaukia iš (3)

formulės, vienintelis energijos taupymo būdas – mažinti pastato atiduodamą energiją, nes pastato gaunama energija dažniausiai yra atsitiktinis ir neprognozuojamas dydis. Pastato šiluminis balansas pavaizduotas 1 paveiksle.

Šiame paveiksle parodytas atvejis, kai pastatas prijungtas prie centralizuotos šiluminės energijos tiekimo sistemos. Individualiuose namuose energijos šaltinis ir tiekimo sistema yra pastato viduje.

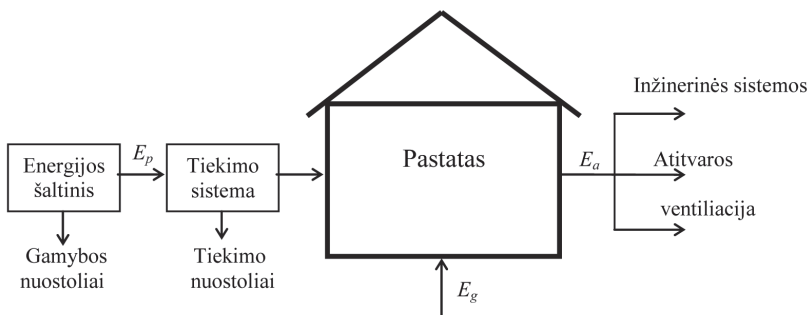
Pagrindiniai pastato nuostoliai – šiluma perduodama per atitvaras, nuostoliai inžinerinėse sistemose ir nuostoliai dėl ventiliacijos, taip pat nuostoliai gaminant ir tiekiant šiluminę energiją.

Pastato šiluminio balanso modelis

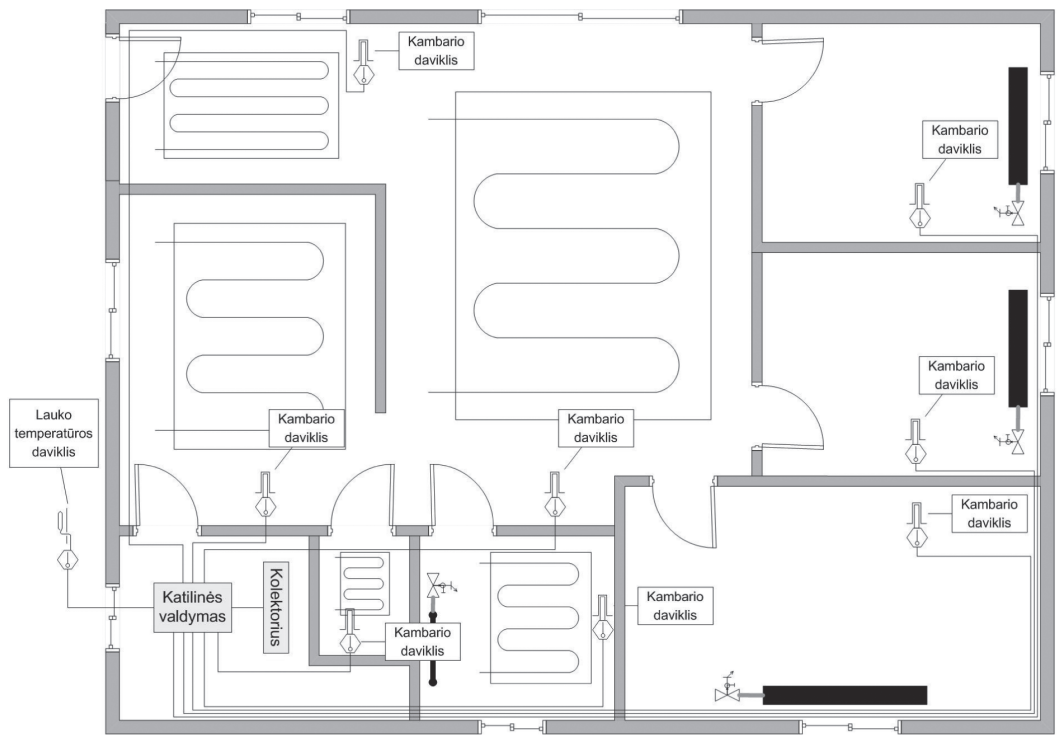
Paprastai, sprendžiant šildymo sistemos valdymo klausimus, parenkant valdymo algoritmus ir įvertinant jų efektyvumą, sudaromas būsto modelis. Šį modelį galima naudoti tyrinėjant ir kitus veiksnius, darančius įtaką energijos sunaudojimui. Tokie veiksniai yra atitvarų šiluminė varža, pastato sandarumas, šildymo katilo našumas, vyraujančių vėjų kryptis. Visiems šiems veiksniams tyrinėti buvo sudarytas namo šiluminio balanso modelis. Modeliavimo rezultatai pateikti namui, kurio planas parodytas 2 paveiksle.

Pastato šiluminį balansą galima modeliuoti naudojant makromodelį (Clarke, Cockroft, Conner, et al., 2001) arba detalesnį modelį (Pagojus, 2005). Makromodelyje visas pastatas nagrinėjamas kaip viena zona, kurioje temperatūra ta pati. Tokie modeliai tinka paprastiems

namams be langų (pavyzdžiui, sandėliams) arba pastatams, naudojantiems galingas mechaninės ventiliacijos sistemas. Sudėtingesniems pastatams reikia naudoti detalesnį modelį, kur pastatas paskirstytas į kelias zonas (Andersen,



1 pav. Pastato šiluminis balansas



2 pav. Modeliuojamo namo planas

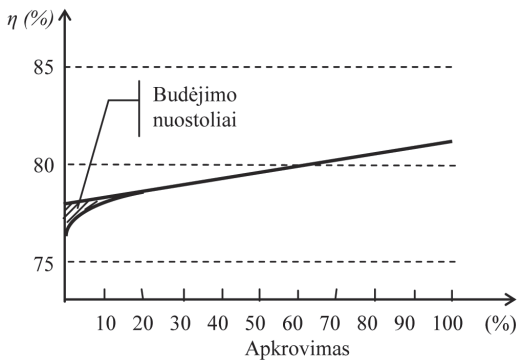
Poulsen, 1999). Šiluminis balansas sudaromas kiekvienai zonai atskirai. Įvertinami šiluminiai srautai tarp zonų. Mūsų atveju tikslinga skirstyti į zonas, nes į patalpas šiluma tiekama skirtingu būdu. Tai yra vandeniui šildomas namas, turintis savo šildymo katilą (t. y. neprijungtas prie šiluminės magistralės). Patalpoms šildyti naudojama mišri sistema: dalis patalpų (trys kambariai) šildomi radiatoriais, kitose patalpose įrengtas grindų šildymas. Modelis realizuotas „Matlab“ įrankiu „Simulink“. Modelyje numatyta galimybė keisti patalpų skaičių, jų dydį ir atitvarų šiluminės varžos. Naudojant šį modelį buvo tikrinamas tokių energijos taupymo metodų efektyvumas: šildymo katilo galinumo parinkimas, atitvarų šiluminės varžos didinimas, periodinis patalpų temperatūros mažinimas, kai pastate nėra gyventojų, nuostolių vamzdynuose mažinimas.

Šildymo katilo efektyvumas

Viena iš šildymo katilo charakteristikų yra šildymo katilo efektyvumas. Dinaminis efektyvumas indikuoja energijos išnaudojimo efektyvumą įvertindamas katilo darbo sąlygas. Dinaminis efektyvumas parodo degimo procesų variacijos budėjimo trukmės įtaką našumui.

Žinomi keturi šildymo katilų režimai: moduliuojant liepsną, įjungta – išjungta, didelė liepsna – maža liepsna, daugiapakopis režimas. Liepsnos moduliacija vykdoma keičiant tiekiamo kuro kiekį vienu ar keliais vožtuvais. Kitų režimų katiluose liepsnos dydis reguliuojamas visiškai uždarant ar atidarant vieną ar kelis vožtuvus.

Dauguma šildymo katilų sukonstruota taip, kad jų maksimalus šiluminis efektyvumas pasiekiamas esant didžiausiai liepsnai, t. y. didžiausiam apkrovimui. Dinaminio katilo našumo priklausomybė nuo apkrovimo parodyta 3 paveiksle.



3 pav. Dinaminis katilo našumas moduliuojant liepsną

Pasitelkiant modelį buvo skaičiuota katilo sunaudota energija esant pastoviai lauko temperatūrai 0 °C, -10 °C ir -20 °C. Skaičiavimai atlikti 6000 W, 12 000 W ir 180 00 W galingumo katilams. Palygintos keturios katilų konstrukcijos: įjungta – išjungta, dviejų pakopų, keturių pakopų ir su liepsnos moduliacija. Modeliavimo rezultatai pateikiami 1 lentelėje.

Šiluminių nuostolių per atitvaras modeliavimas

Modeliuojant atitvarų šiluminės varžos gerinimo įtaką šiluminiams nuostoliams namo, kurio planas pateiktas 2 paveiksle, apskaičiuota šildy-

1 lentelė. Katilų sunaudojama energija

T_o (%)	Energija į šildymo terpę	Katilo galia (W)	Naudota galia (%)	Sunaudota energija (W)			
				Įjungta/išjungta	Dviejų pakopų	Keturių pakopų	Liepsnos moduliacija
0	124,7	6000	43,3	159,7	159,5	159,5	159,3
-10	172,0		59,8	215,3	215,3	215,3	215,3
-20	227,4		77,9	280,0	280,0	280,0	280,0
0	124,6	12000	24,2	167,2	165,9	164,2	162,2
-10	172,4		36,7	223,6	222,5	222,5	222,5
-20	225,0		48,1	284,1	284,1	284,1	284,1
0	124,7	18000	20,6	170,1	166,7	164,7	164,6
-10	183,4		33,7	238,8	237,6	237,2	237,3
-20	224,2		44,6	286,7	286,3	286,3	285,3

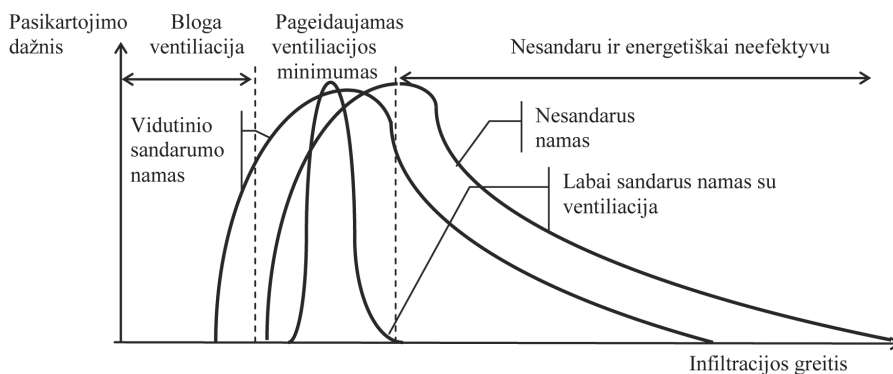
Sukurtame kompiuteriniame modelyje numatyta galimybė keisti šildymo katilo charakteristikas.

Kaip jau minėta, šildymo katilo galingumas parenkamas toks, kad būtų užtikrintas komfortas ekstremaliomis sąlygomis. Žemiausia temperatūra, Lietuvoje užfiksuota 1956 metais Utenoje, yra -42,9 °C, o vidutinė šalčiausio mėnesio (sausio) temperatūra yra -7,2 °C. Modeliuojamam namui parinkus 6000 W galingumo katilą reikalingas komfortas viduje užtikrinamas, kol temperatūra lauke nepasiekia -20 °C. Naudojant 12000 W katilą komfortas patalpose užtikrinamas, kai lauko temperatūra ne žemesnė kaip -28 °C.

mui sunaudota energija, kai atitvarų šiluminė varža bloga (atitinka senųjų statybų atitvarų šiluminės varžas), standartinė (atitinka dabartinius Lietuvos standartus) ir atitinka vadinamųjų „arktinių kailinių“ standartą. Konkrečios atitvarų šiluminių varžų reikšmės pateikiamos 2 lentelėje.

2 lentelė. Atitvarų šiluminių varžų reikšmės

Varžos	Sienos	Stogas	Grindys	Langai
Bloga	0,85	1,65	0,7	0,42
Standartas	3,85	5,56	3,85	0,53
Kailiniai	5	6,7	5	0,55



4 pav. Oro pasikeitimo greitis

Grynas oras pastate yra svarbi sveikatos užtikrinimo sąlyga: jo trūkumas sukelia nesveiko pastato sindromą, esant pertekliui – eikvojama energija (Dietz, Ottavio, Cappiello, 1995). Oro pasikeitimo greitis vertinamas oro pasikeitimo pastate kartais per valandą. Išskiriami du mechanizmai (Lydberg, Honarbakhsh, 1989): infiltracija – nevaldomas oro srautas per mažus plyšius ir angas pastatuose, ir ventiliacija – natūrali ventiliacija per atvirus langus ar duris ir mechaninė ventiliacija naudojant ventiliatorius. Oro pasikeitimo greičio variacijos parodytos 4 paveiksle.

Buvo skaičiuojama per dvi paras sunaudota šiluma, kai lauko temperatūra keitėsi $\pm 5^{\circ}\text{C}$ nustatytos temperatūros atžvilgiu. Skaičiuota, kai oras patalpoje pasikeičia per 4 valandas (atitinka standartą) ir kai oras patalpoje pasikeičia per 10 valandų (reikia priverstinės ventiliacijos). Gauti rezultatai pateikiami 3 lentelėje.

Matome, kad pagerinus šiluminę atitvarų varžą iki standartinės galima sutaupyti iki 40% energijos. Tolesnis atitvarų šiluminės varžos didinimas iki „arktinių kailinių“ standarto, kaip matyti iš 3 lentelės, yra veiksmingas tik tuomet, kai sykiu užtikrinamas ir patalpų sandarumas. Tokiu atveju sanitarinėms normoms užtikrinti patalpose reikia įrengti mechaninę ventiliaciją bei įeinančio į patalpas ir išeinančio iš patalpų oro šiluminių mainų įrenginį, taupantį energiją orui kondicionuoti.

Šilumos nuostoliai vamzdynuose

Vandenių šildomuose pastatuose šilumą patalpoms perduoda radiatoriai arba grindyse pakloti vamzdžiai. Išnagrinėjus modeliavimo rezultatus nustatyta, kad šilumos nuostolius vamzdyne galima minimizuoti taip reguliuojant tiekiamo į radiatorius arba grindų šildymo vamzdžiuose vandens temperatūrą, kad srautas per radiatorius būtų maksimalus (Mikuckas, Mikuckienė ir kt., 2005; Kazanavičius, Mikuckas, ir kt., 2006). Modeliavimo rezultatai, gauti naudojant pirmiau minėtą valdymo algoritmą, pateikiami 3 lentelėje.

3 lentelė. Sunaudojamos energijos priklausomybė nuo atitvarų šiluminės varžos

Šiluminė varža	Oro pasikeitimas	Sunaudota energija	Patiekta energija
Bloga	4 h	286,5	292
Standartinė		152	160
„Arktiniai kailiniai“		144	158,4
Bloga	10 h	284,2	290,7
Standartinė		149	152
„Arktiniai kailiniai“		126,3	133

Išvados

Pastatų šilumos nuostoliai Lietuvoje esti nemaži, nes dauguma pastatų yra pastatyta iki 1992 metų, laikantis tik minimalių šilumosaušgos reikalavimų, pagrįstų higienos normomis siekiant išvengti vandens garų kondensacijos ant vidinių sienų.

Šildymo katilo galingumas parenkamas toks, kad būtų užtikrintas komfortas ekstremaliomis sąlygomis. Paprastai parenkamas toks katilo galingumas turi užtikrinti komfortą 99% laiko, t. y. katilo galingumas sumažinamas komforto sąskaita. Didėjant namui šildyti naudojamo katilo galingumui, didėja ir šildymui sunaudojama energija. Padidinus katilo galingumą, komfortą patalpose galima užtikrinti ekstremalesnėmis lauko sąlygomis, tačiau didėja sunaudojama energija, kai lauke sąlygos normalios. Siekiant užtikrinti komfortą ekstremaliomis sąlygomis didinant ka-

tilo galią, geriausia naudoti katilą su liepsnos moduliacija, nes tokio tipo katilų našumas sumažėja mažiausiai esant nedidelėms apkrovoms.

Pagerinus atitvarų šiluminę varžą iki standartinės, galima sutaupyti iki 40% energijos. Tolesnis atitvarų šiluminės varžos didinimas iki „arktinių kailinių“ standarto yra veiksmingas tik tuomet, kai sykiu užtikrinamas ir patalpų sandarumas. Sanitarinėms normoms užtikrinti patalpose reikia įrengti mechaninę ventiliaciją ir įeinančio į patalpas bei išeinančio iš patalpų oro šiluminių mainų įrenginį, taupantį oro kondicionavimui naudojamą energiją.

Šilumos nuostolius vamzdyne galima minimizuoti reguliuojant tiekiamo į radiatorius vandens temperatūrą taip, kad srautas per radiatorius būtų maksimalus. Tokio algoritmo pritaikymas dėl mažesnių nuostolių vamzdyne leidžia sutaupyti iki 10% energijos.

LITERATŪRA

ANDERSEN, K. K.; POULSEN, H. (1999). Building Integrated Heating Systems. Iš *Proc. of Building Simulation '99*, vol. 1, p. 105–112.

ASHRAE (2001). Handbook of Fundamentals. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*. Atlanta, GA.

CLARKE, J. A.; COCKROFT, J.; CONNER, S.; HAND, J. W.; KELLY, N. J.; MOORE, R.; O'BRIEN, T.; STRACHAN, P. (2001). Control in Building Energy Management Systems: the Role of Simulation. Iš *Proc. 7th International IBPSA Conf.*, Rio de Janeiro, Brazil, 2001, p. 99–108.

DIETZ, R. N.; OTTAVIO, T. W.; APPIELLO, C. C. (1995). Multizone Infiltration Measurements in Homes and Buildings Using Passive Perfluoro carbon Tracer Method. *ASHRAE Trans.*, vol. 91, pt. 2.

KAZANAČIUS, E.; MIKUCKAS, A.; MIKUCKIENĖ, I.; ČEPONIS, J. (2006). The heat balance

model of residential house. *Informacinės technologijos ir valdymas*. Kaunas, t. 35, nr. 4, p. 391–396.

LYDBERG, M.; HONARBAKHSH, A. (1989). Determination of Air Leakiness of Building Envelopes Using Pressurization at Low Pressures. *Swedish Council for Building Research. Document D19: 1989*. Gävle, Sweden.

MIKUCKAS, A.; MIKUCKIENĖ, I.; KAZANAČIUS, E.; ČEPONIS, J. (2005). Kompiuterizuoto namo šildymo valdymo sistema. *Informacijos mokslai*, t. 34, p. 166–171.

PAGOJUS, J. (2005). Pastato kintamo šiluminio režimo modeliavimas *Energetika*, nr. 1, p. 67–72.

ŠTREIMIKIENĖ, D.; KONSTANTINAVIČIŪTĖ, I. (2003). JT Bendrosios klimato kaitos konvencijos išipareigojimų įgyvendinimo galimybės, atsižvelgiant į šiltnamio dujų emisijos mažinimo priemones. *Energetika*, nr. 1, p. 28–37.

MODELING THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF BUILDING USING “SIMULINK”

Antanas Mikuckas, Irena Mikuckienė, Egidijus Kazanavičius, Jonas Čeponis

S u m m a r y

Various models are used to study heat dynamics in buildings for evaluating heating energy consumption. This paper deals with model allowing to simulate thermal transients depending on the geometrical characteristics and thermo-physical properties of building components (exterior walls, internal partitions ceilings,

floors and windows), external temperature variations and properties of heating system. The results for residential house are shown. The heat consumption for a specified time period was calculated. The heating energy conservation methods are analyzed and compared.