

PRZEDMOWA

Termodynamika jest nauką zajmującą się przemianami różnych postaci energii. W podręczniku, który przekazujemy Państwu, ograniczyliśmy się do opisu przemian energii zachodzących w różnych maszynach i urządzeniach, stąd tytuł – *Termodynamika techniczna*.

Zawartość książki ułożono z uwzględnieniem potrzeb wynikających z kształcenia studentów wydziałów mechanicznych – przyszłych inżynierów i magistrów mechaników studiów stacjonarnych i niestacjonarnych. Ze względu na ograniczoną ilość godzin przeznaczonych na ten przedmiot, staraliśmy się ująć podstawową problematykę termodynamiki w sposób krótki i zwięzły, jednak ze szczególnym uwzględnieniem zrozumienia zjawisk fizycznych. Zakres tematyczny dostosowano do kształcenia w ramach przedmiotu podstawowego dla kierunku mechanika i budowa maszyn, a także na potrzeby specjalności: technika cieplna, technologie gazowe, maszyny i urządzenia przemysłu spożywczego, silniki spalinowe i inne specjalności. Proces studiowania termodynamiki uzupełniają dwa następne podręczniki (w przygotowaniu): jeden ze zbiorom zadań, drugi, zawierający ćwiczenia laboratoryjne z tego przedmiotu.

Poniżej zostaną krótko omówione zasadnicze treści zawarte w poszczególnych rozdziałach.

Po wprowadzeniu, w rozdziale pierwszym wyjaśniono pojęcia układu zamkniętego i układu otwartego oraz ich przykłady, a także pojęcia przemiany adiabatycznej oraz układu odosobnionego.

Rozdział drugi zajmuje się układami zamkniętymi. Na początku określono parametry termodynamiczne oraz zdefiniowano pojęcie równowagi termodynamicznej, objętości właściwej oraz gęstości czynnika. Poza masę wyrażoną w kilogramach wprowadza się masę w kilomolach. Na podstawie kinetyczno-molekularnej teorii gazów zinterpretowano główne parametry termodynamiczne, jakimi są ciśnienie i temperatura. Następnie ustalono zależność między podstawowymi parametrami termodynamicznymi – służy temu termiczne równanie stanu zwane równaniem Clapeyrona. Równanie to podano w różnych postaciach, wprowadzono pojęcie molowej objętości właściwej oraz przytoczono wzór na przeliczanie danej objętości na warunki normalne. Dalej podano pojęcia gazów doskonałych oraz półdoskonałych. Określono też warunki odwracalności przemian. W punkcie 2.5 omówiono oddziaływanie na układ doprowadzonym ciepłem i pracą. Wy tłumaczono zależności przy obliczaniu odwracalnej pracy bezwzględnej oraz sposób jej przedstawienia na

wykresie p, V . Na koniec dokonano bilansu energetycznego układu zamkniętego poprzez: 1) ogólne równanie bilansu, 2) w postaci oddziaływania pracą i ciepłem oraz 3) zmianą energii wewnętrznej układu. Jest to wyrazem I zasady termodynamiki. Określono interpretację energii wewnętrznej bazującej na kinetyczno-molekularnej teorii gazu. Wprowadzono pojęcie ciepła całkowitego doprowadzonego do czynnika termodynamicznego jako sumę ciepła z otoczenia i ciepła tarcia. Równanie energii układu zamkniętego podano w różnych postaciach.

Układy otwarte omówiono w rozdziale trzecim. Najpierw wyjaśniono pojęcie pracy technicznej oraz jej prezentację na wykresie p, V . Podano związek między pracą techniczną bezwzględną oraz pracą przetłaczania. Następnie wprowadzono pojęcie entalpii jako związek energii wewnętrznej i pracy przetłaczania, opisany równaniem Gibbsa. Jest to nowa funkcja stanu. Dla układu otwartego zastosowano pojęcie energii strumienia wyrażoną przez strumień masy oraz entalpię. Te pojęcia wykorzystano do bilansu energii układu otwartego, na który oddziałuje się pracą techniczną oraz ciepłem, a z otoczeniem wymienia się także strumienie masy. To doprowadziło do określenia energii układu otwartego. W tym równaniu występuje praca techniczna odniesiona do czasu, czyli moc, także ciepło odniesione do czasu, jako strumień ciepła (moc cieplna) oraz strumienie energii czynnika doprowadzone i wyprowadzone z układu. Podstawowe równanie energii układu otwartego najpierw zapisano dla całego strumienia masy, a dalej w odniesieniu do jednego kilograma czynnika. Dalszym krokiem jest dokonanie podziału doprowadzonej pracy na pracę odwracalną oraz pracę tarcia. Na koniec poszerzono równanie energii układu otwartego o energię kinetyczną oraz potencjalną położenia na wlocie i wylocie z układu. Wprowadzono też pojęcie entalpii całkowitej.

Kaloryczne równania stanu, czyli zależności na przyrosty energii wewnętrznej oraz entalpii podano w rozdziale czwartym. W tych równaniach trzeba posłużyć się ciepłami właściwymi. Tym zajmuje się rozdział następny. Znajdują się tam zależności na ustalenie ciepł właściwych przy stałym ciśnieniu i przy stałej objętości dla gazu doskonałego. Następnie wprowadzono pojęcie średniego ciepła właściwego oraz sposób jego obliczania posługując się tablicami cieplnymi lub programami komputerowymi. Podano tam także molowe ciepła właściwe dla stałej objętości oraz stałego ciśnienia.

Rozdział szósty zawiera przykłady bilansów energetycznych maszyn i urządzeń, jak turbiny, silniki spalinowe, kotły, siłownia parowa, kanał nieruchomy oraz wymiennik ciepła.

Czynniki termodynamiczne są często mieszaniny różnych gazów jednorodnych. Skład mieszaniny określono udziałami masowymi, objętościowymi oraz molowymi. Wprowadzono prawo Daltona, opisujące ciśnienie mieszaniny jako sumę ciśnień cząstkowych poszczególnych składników mieszaniny. Dla posługiwania się termicznym równaniem stanu oraz kalorycz-

nymi równaniami stanu trzeba wyznaczyć wielkości zastępcze mieszaniny, jak indywidualna stała gazowa, masa drobinowa, ciepło właściwe obliczone z własności fizycznych składników. Zależności takie zostały podane w rozdziale siódmym.

Ważnym działem termodynamiki są przemiany, które dzieli się na odwracalne: izochoryczne, izobaryczne, izotermiczne, izentropowe oraz politropowe, a dalej nieodwracalne, jak: adiabaty nieodwracalne, dławienie przepływu, dyfuzja oraz mieszanie. Tymi zagadnieniami zajmuje się rozdział ósmy. Każdą z tych przemian zdefiniowano oraz ustalono równania przemiany jako zależności między parametrami termodynamicznymi. Następnie przedstawiono wzory na pracę bezwzględną lub techniczną oraz sposoby obliczania ciepła wymienionego z otoczeniem. Wszystkie te zależności udało się ustalić dla przemian odwracalnych, posługując się równaniami z poprzednich rozdziałów. Dla przemian adiabatycznych nieodwracalnych takich prostych zależności nie ma. Przemian tych jest nieskończenie wiele, jak wiele jest różnych geometrii kanałów i konstrukcji maszyn. W tym przypadku można poszukiwać wykładnika politropy, dobrze opisującego przebieg przemian w danym przypadku lub wprowadzić pojęcie sprawności izentropowej lub wewnętrznej. Tutaj izentropa jest przemianą odniesienia, do której przyrównuje się przemianę rzeczywistą. Posługując się sprawnością interesuje nas praca odwracalna lub rzeczywista, co wynika ze znajomości parametrów w stanie 1 i 2. Obliczenia można przeprowadzić, jeśli trafnie przewidzi się wartości sprawności.

Dalsza część dotyczy obiegów termodynamicznych. Wygodniej będzie analizować przemiany i obiegi wprowadzając nową funkcję stanu termodynamicznego jaką jest entropia – o czym mowa w rozdziale dziewiątym. Pojęcie entropii wprowadzono na zasadzie analogii do pracy, gdzie siła jest powodem wykonania pracy, a przepływ ciepła odbywa się pod wpływem temperatury. Korzystając z równań energii dla układu zamkniętego i otwartego, wyprowadzono wzory dla obliczania przyrostu entropii.

Przemiany oraz obiegi termodynamiczne przedstawiono w rozdziale dziesiątym na wykresach T,s lub i,s , co pozwala na lepsze zrozumienie takich pojęć jak praca i ciepło. Entropia jest także przydatna do analizy obiegów termodynamicznych pod względem sprawności. Pomoże także w sformułowaniu II zasady termodynamiki.

W rozdziale jedenastym sformułowano pojęcie obiegu termodynamicznego – prawo- i lewobieżnego – w zastosowaniu do silników lub maszyn roboczych, urządzeń chłodniczych i pomp ciepła. Dla każdego z tych obiegów wyjaśniono pojęcie sprawności, określające ich dobroć energetyczną.

Podstawowym dla wszystkich obiegów termodynamicznych jest obieg Carnota w pełni odwracalny, łącznie z wymianą ciepła z otoczeniem – rozdział dwunasty. Obieg ten jest wzorcem dla innych obiegów i wyznacza główne kierunki podwyższania ich sprawności. To zagadnienie rozwija rozdział

trzynasty, gdzie omówiono obiegi rzeczywiste, a zatem nieodwracalne. Wskazano na powody nieodwracalności, co skutkuje obniżeniem pracy obiegu oraz jego sprawności. Określono też pojęcie pracy maksymalnej. Podsumowaniem rozdziałów od dziewiątego do trzynastego jest rozdział czternasty, gdzie podano różne sformułowania II zasady termodynamiki.

Następne rozdziały – piętnasty i szesnasty – dotyczą pary wodnej oraz siłowni parowej. To są zagadnienia szczególnie ważne dla energetyki. Na początku opisano trzy stany skupienia wody, a dalej izobaryczny proces parowania. Wprowadzono pojęcia: para nasycona, para mokra oraz stopień suchości pary. Parę mokrą, jako mieszaninę pary nasyconej suchej i kropel cieczy, nie da się opisać prostymi równaniami jak równanie Clapeyrona. Stąd potrzeba obliczenia objętości właściwej, energii wewnętrznej oraz entalpii specjalnymi wzorami, w których wykorzystuje się tablice cieplne dla wody w stanie wrzenia lub pary w stanie nasycenia. Również para przegrzana odbiega od zachowania się gazu doskonałego, stąd także do obliczeń używa się tablic cieplnych lub wykresów i,s oraz T,s . Dalej omówiono przemiany pary mokrej i przegrzanej wraz ze sposobami obliczania ciepła, pracy, przyrostu energii wewnętrznej oraz entalpii. Przebiegi przemian zaprezentowano na wykresach T,s oraz i,s .

Obiegi termodynamiczne siłowni parowych omówiono w rozdziale szesnastym. Najpierw analizuje się możliwości realizacji obiegu Carnota w siłowni parowej, gdzie woda jest w dwóch stanach skupienia – cieczy i pary. Obiegiem możliwym do realizacji jest obieg Clausiusa-Rankine’a. Główna rozbieżność tego obiegu od obiegu Carnota wynika z możliwości dostarczania ciepła i tworzenia pary w trakcie przemiany izobarycznej, a nie izotermicznej. Jest to zasadniczym powodem obniżania sprawności obiegu parowego, ale także określeniem dróg do podwyższania sprawności obiegu Clausiusa-Rankine’a. Dość dużo miejsca poświęcono omówieniu metod podwyższania sprawności siłowni parowej. Na koniec tego rozdziału definiuje się wszystkie sprawności siłowni parowej oraz elektrowni. Przytacza się skrótowe informacje o wartościach tych sprawności oraz o ich wartościach maksymalnych – możliwych do osiągnięcia.

Rozdział siedemnasty poświęcony jest powietrzu wilgotnemu, czyli mieszaninie powietrza suchego z wodą w postaci pary lub kropel wody. Na początku wprowadza się podstawowe pojęcia oraz wielkości określające zawartość wilgoci, a także sposoby ich obliczania. Podstawowe właściwości pary wodnej podano w tablicy oraz na wykresach. Przytoczono szereg przykładów zachowania się wilgoci w różnych temperaturach powietrza. Dość szeroko potraktowano zachowanie się wilgoci w procesach sprężania i chłodzenia. Przedstawiono również przykłady obliczeniowe oraz podano wykresy zachowania się wilgoci przy różnych ciśnieniach procesów sprężania i chłodzenia, a także osuszania powietrza. Dla powietrza atmosferycznego zaprezentowano

wykres i, X – dla zilustrowania przemian oraz ich obliczania. Omówiono podstawy pomiaru zawartości wilgoci w powietrzu oraz procesy suszenia materiałów.

Podstawowe zagadnienia procesu spalania zawiera rozdział osiemnasty, rozpoczynający się wprowadzeniem podstawowych pojęć. Następnie prezentuje równania stechiometryczne oraz minimalne zapotrzebowanie tlenu i powietrza dla spalania paliw gazowych i stałych. W tej części podręcznika wprowadzono pojęcie współczynnika nadmiaru powietrza. Następnie podano wzory na obliczanie ilości i składu spalin wilgotnych oraz suchych, a także pojęcia kontrakcji fizycznej i chemicznej. Dalej określono ciepło spalania i wartość opałową. W dalszych punktach omówiono straty w procesach spalania oraz sposoby ich obliczania. Następne podrozdziały poświęcono zagadnieniu temperatury zapłonu oraz temperatury spalin. Szczególnie skupiono się na kształtowaniu temperatury spalin w silnikach spalinowych.

Przy zagadnieniu wymiany ciepła – rozdział dziewiętnasty – ograniczono się do podstaw, ponieważ poszerzenie tej wiedzy następuje na oddzielnym wykładzie. Na wstępie omówiono główne sposoby wymiany ciepła, a dalej przytoczono prawa dotyczące przewodzenia, przejmowania, promieniowania oraz przenikania ciepła. Krótko omówiono rodzaje wymienników ciepła oraz kształtowanie się przebiegu temperatur w wymiennikach współprądowych i przeciwprądowych. Na koniec omówiono zasady obliczania wymienników ciepła.

Na elementarnym poziomie omówiono obiegi silników turbogazowych w rozdziale dwudziestym. Przedstawiono obieg porównawczy silników turbogazowych – obieg Braytona. Zwrócono uwagę na odmienność tego obiegu od obiegu Carnota w zakresie wymiany ciepła z otoczeniem, która jest izobaryczna, a nie izotermiczna. Podano zależności na obliczanie ciepła oraz na sprawność obiegu. Dokonano analizy sposobu podwyższania jego sprawności. Na koniec podano zależności na obliczanie sprawności obiegu rzeczywistego.

Tłokowe silniki spalinowe – rozdział dwudziesty pierwszy – są najpowszechniej stosowane spośród innych silników, dlatego przedstawiono podstawowe obiegi porównawcze silników z zapłonem iskrowym i samoczynnym. Określono wzory na sprawność tych obiegu. Dokonano analizy i porównania ich sprawności, również w nawiązaniu do obiegu Carnota. Dalej ukazano zależności na sprawności obiegu rzeczywistych.

Ostatni rozdział dotyczy urządzeń chłodniczych i pomp ciepła. We wprowadzeniu znajdują się zasady dotyczące działania tych obiegu oraz ich przeznaczenie. Dalej omówiono obiegi parowe mokre i suche oraz obiegi rzeczywiste. Krótko opisano też czynniki chłodnicze i stawiane im wymagania.

Wszystkim osobom, które przyczyniły się do napisania tej pracy, serdecznie dziękuję. Dziękuję Profesorowi Januszowi Wojtkowiakowi za wnikliwe

przestudiowanie tego podręcznika oraz przekazane uwagi, które pomogły ustalić jego ostateczny kształt. Szczególnie serdecznie dziękuję Pani inż. Marii Haberko za olbrzymią pracę nad przygotowaniem maszynopisu oraz Pani mgr Annie Zielińskiej za przygotowanie wersji wydawniczej.