

Sposób suszenia drewna w komorze suszarniczej

Przedmiotem wynalazku jest sposób suszenia drewna przebiegający w komorze suszarniczej mający zastosowanie w przemysłowym suszeniu drewna.

Ogólnie opisując proces suszenia drewna polega na odprowadzeniu zawartej w nim wody do uzyskania ściśle określonego jej poziomu, zależnego od późniejszego przeznaczenia drewna. W trakcie trwania każdego procesu suszenia usunięcie z drewna wody wolnej nie powoduje zmian jego kształtu i wymiarów. Woda wolna, która znajduje się w komórkach i przestrzeniach międzykomórkowych, nie ma wpływu na kształt komórek. Natomiast usunięcie wody związanej, zawartej w komórkach, których przestrzeń jest ograniczona błonami komórkowymi, powoduje ich kurczenie. Wraz z ubytkiem wody strefa parowania przemieszcza się w głąb drewna. Odpowiednie prowadzenie procesu suszenia pozwala na większą migrację wody z materiału, a tym samym uzyskanie drewna o większym stopniu suchości. Zauważono, że przy wyższych temperaturach czynnika suszącego zwiększa się intensywność suszenia drewna.

Podstawą procesu suszenia jest zjawisko równowagi higroskopijnej drewna, czyli każdej temperaturze i wilgotności względnej powietrza odpowiada (w obszarze wilgotności higroskopijnej) określona wilgotność równoważna drewna. Zależy ona od gatunku drewna i od parametrów otoczenia, tzn. maleje przy wzroście temperatury powietrza i spadku jego wilgotności. Im mniejsza wilgotność równoważna, tym łatwiej w danych warunkach przebiega proces suszenia drewna.

Znany jest sposób suszenia drewna w przegrzanej parze wodnej jako medium suszącym. W tym przypadku drewno umieszcza się w bardzo szczelnej suszarce w powietrzu nasyconym i podnosi się bardzo szybko temperaturę do 95-98°C, a następnie wolno do 100°C i wyżej. Zawarta w suszarce przegrzana para wodna chłonie odparowującą z drewna wodę z intensywnością zależną od stopnia przegrzania (temperatury). Suszenie takie trwa 2-4 razy krócej od suszenia klasycznego, mniejsze jest prawdopodobieństwo wystąpienia pęknięć.

Z amerykańskiego opisu patentowego US4246704 znany jest sposób i instalacja do suszenia litego drewna zwłaszcza w postaci desek lub prefabrykatów przegrzaną parą wodną w celu poprawy jego plastyfikacji. Ujawniony sposób polega na ciągłym, naprzemiennym ogrzewaniu drewna w temperaturze powyżej 100°C i chłodzeniu go w temperaturze poniżej 100°C w hermetycznie szczelnej komorze. Etap ogrzewania odbywa się w warunkach podwyższonego ciśnienia, bez dostępu powietrza, w temperaturze przekraczającej 110°C. Komora wyposażona jest w urządzenie do usuwania nadmiaru pary w celu obniżenia ciśnienia w jej wnętrzu. Etap chłodzenia prowadzony jest w warunkach podciśnienia.

Niedogodnościami znanych sposobów suszenia są wysokie koszty hermetycznych komór suszarniczych, ich szybka korozja, a także możliwość wystąpienia przebarwień drewna. Wahania w wartościach temperatury i wilgotności wewnątrz komory mogą nie zapewniać zachowania odpowiedniej drożności porów, co z kolei może skutkować występowaniem pęknięć materiału.

Sposób suszenia drewna w komorze suszarniczej polegający na umieszczeniu drewna korzystnie na przekładkach wewnątrz komory suszarniczej, następnie dostarczeniu do wnętrza komory pary wodnej, ogrzewaniu jej aż do całkowitego wyparcia powietrza atmosferycznego przez parę wodną z komory i dalej aż do uzyskania pary wodnej przegrzanej charakteryzuje się według wynalazku tym, że po osiągnięciu wewnątrz komory temperatury w przedziale 70-80°C utrzymuje się ją na niezmienionej wysokości przez okres od 2 do 3 godzin, podczas których drewno poddaje się procesowi odprężania. Następnie podnosi się temperaturę w komorze do wartości co najwyżej 120°C, korzystnie utrzymując ją w przedziale 105-110°C i prowadzi się etap suszenia właściwego, aż do osiągnięcia założonej wilgotności końcowej drewna. Po uzyskaniu odpowiedniej wilgotności końcowej, suszenie zostaje zakończone i rozpoczyna się etap kondycjonowania oraz chłodzenia. Drewno chłodzi się swobodnie, a cały proces prowadzony jest w warunkach ciśnienia atmosferycznego.

Korzystnie rozgrzewanie prowadzi się z szybkością 1 – 1,5°C na godzinę.

W powietrzu nasyconym wilgocią ($\varphi = 100\%$) wilgotność równoważna osiąga wartość maksymalną dla danej temperatury i nazywana jest wilgotnością punktu nasycenia włókien (zależnie od temperatury i gatunku drewna wynosi ona od 22 do 30 %). Im wyższa temperatura powietrza, a dokładniej mieszaniny suchego powietrza i pary wodnej, tym więcej wilgoci potrzeba do osiągnięcia stanu nasycenia. W temperaturze 100°C (przy ciśnieniu atmosferycznym) stan nasycenia może być osiągnięty tylko wtedy, gdy w mieszaninie nie ma już powietrza, a jest tylko para wodna (tzw. para nasycona sucha). Wilgotność równoważna drewna wynosi wtedy około 22 %. Z kolei przegrzanie pary wodnej do wyższych wartości temperatury (przy stałym ciśnieniu) powoduje dalszy spadek wilgotności równoważnej drewna.

Przeprowadzone badania wysokotemperaturowego suszenia drewna przy użyciu pary wodnej i mieszaniny parowo-gazowej (para wodna z powietrzem) wykazały istnienie znacznej poprawy jakości suszonego materiału. Przykładowo podczas i po procesie obróbki termicznej drewna zaobserwowano:

- niezmienioną lub zbliżoną wytrzymałość mechaniczną,
- zmniejszone zapotrzebowanie mocy do skrawania,
- większą gładkość drewna po obróbce,

- podwyższoną trwałość na oddziaływanie zewnętrznych warunków atmosferycznych,
- odporność na działanie grzybów i pleśni,
- mniejszą skłonność do pęknięć, zmian wymiarów i wypaczeń.

Badania różnych gatunków drewna umożliwiły opracowanie nowej technologii przy użyciu unikalnego w skali krajowej systemu do suszenia parowego i parowo-gazowego wykonanego i wyposażonego w oprogramowanie komputerowe dające możliwość odpowiedniego prowadzenia procesu. Wilgotność mieszaniny zapewniającej atmosferę suszenia kontrolowana jest przez elektroniczny system sterowania.

W czasie trwania pierwszego z etapów - okresu stałej szybkości suszenia - występuje równoczesna wymiana ciepła i masy w warstwie granicznej, a strumień ciepła dostarczony przez przepływające medium suszące jest wykorzystywany wyłącznie do zamiany stanu skupienia wody ze stanu ciekłego w gazowy. Podczas tego etapu prędkość suszenia jest stała i zależy wyłącznie od warunków zewnętrznych takich jak temperatura, wilgotność, prędkość i rodzaj przepływu medium suszącego. Temperatura powierzchni materiału suszonego w tym etapie jest równa temperaturze termometru wilgotnego. Dodatkowo, w związku z brakiem wymiany energii wewnątrz medium suszącego, całkowita temperatura jest w miarę stała.

Woda w stanie ciekłym jest stale dostarczana do powierzchni materiału. Jest ona transportowana z wnętrza dzięki występowaniu sił kapilarnych - ciecz przepływa z obszarów o większej zawartości wilgoci do obszarów o zawartości mniejszej. Oznacza to migrację wody z porów o większym promieniu do porów o średnicach mniejszych.

Okres stałej szybkości suszenia trwa dopóki powierzchnia jest zaopatrywana w ciecz, a jej czas trwania silnie zależy od warunków suszenia i właściwości medium. Gdy zawartość wilgoci maleje wartość sił kapilarnych zazwyczaj wzrasta. Równocześnie z występowaniem tych zjawisk spada migracja fazy ciekłej do materiału. Wpływa to na spadek przepływu cieczy proporcjonalnie do zmniejszenia zawartości wilgoci. Koniec pierwszego etapu określany jest jako moment, w którym zanika przepływ cieczy przez powierzchnię materiału. Czas niezbędny do osiągnięcia tego stanu zależy od warunków, w których przeprowadzane jest suszenie i od właściwości materiału. Istotna jest również temperatura podczas tego etapu suszenia - im jest wyższa tym łatwiejszy jest wewnętrzny transport cieczy.

W momencie, gdy zostanie osiągnięty stan końcowy dla etapu pierwszego, ciśnienie cieczy staje się mniejsze niż ciśnienie pary nasyconej. Zewnętrzny strumień pary jest redukowany i strumień ciepła dostarczony do medium jest chwilowo wyższy od potrzebnego do parowania cieczy. Nadmiar energii jest zużywany na nagrzanie powierzchni i wnętrza materiału. W ten sposób tworzy się niestabilny stan równowagi dynamicznej. Ciśnienie pary na powierzchni oraz jej

przepływ zależą od temperatury i zawartości wilgoci. Aby zapewnić równowagę energetyczną temperatura powierzchni musi rosnąć, gdy zawartość wilgoci na powierzchni maleje. To prowadzi do spadku szybkości suszenia i zmniejszenia ilości ciepła dostarczanego przez przepływające medium. Wewnątrz porowatego materiału tworzą się dwie strefy. W wewnętrznej dominuje migracja cieczy, a w zewnętrznej dyfuzja wody związanej i pary wodnej. Podczas tego etapu strumień ciepła musi być przenoszony do wnętrza materiału tak, aby możliwy był wzrost temperatury i odparowanie cieczy.

Wraz z postępem procesu suszenia wielkość strefy, w której migruje ciecz, maleje i w końcu zupełnie zanika. Gdy temperatura materiału osiągnie temperaturę medium a zawartość wilgoci uzyska wartość równowagową, proces uznaje się za zakończony.

W celu zmniejszenia czasu suszenia bez jednoczesnego spadku jakości suszonego materiału możliwe jest zapewnienie takich warunków procesu, przy których temperatura materiału będzie wyższa od temperatury wrzenia wody. Warunki te sprzyjają wystąpieniu wewnątrz materiału nadciśnienia. Dzięki temu różnica ciśnień sprzyja transportowi cieczy w stronę powierzchni wymiany ciepła. Ze względu na znaczną anizotropowość materiałów drewnianych podczas suszenia elementów, w których występuje nadciśnienie zachodzi dwukierunkowy przepływ ciepła i masy. Specyficzna budowa drewna warunkuje również kierunek wymiany. Ciepło i para migrują głównie w poprzek materiału, natomiast część pary i ciecz przepływa również wzdłuż materiału. Jego końce są nasycone wodą i czasem możliwa jest ucieczka z tych miejsc wody.

Wynalazek jest bliżej przedstawiony w przykładzie wykonania.

Stanowisko badawcze składa się z komory typu wsadowego, do prowadzenia konwencjonalnych i wysokotemperaturowych procesów suszarniczych. Wyposażone jest w system do akwizycji, kontroli i zmian oraz archiwizowania parametrów termiczno-fizycznych procesu. Pomiar wilgotności i temperatury drewna oraz temperatury i wilgotności względnej czynnika roboczego w komorze odbywa się przy wykorzystaniu szeregu czujników do pomiaru wilgotności i termopar. W komorze znajdują się dysze doprowadzające parę wodną. Para wodna, za pomocą wentylatora rewersyjnego, zostaje przetłoczona do przestrzeni, w której znajduje się materiał suszony. Produkowanie pary trwa przez cały czas przebiegu suszenia od chwili rozpoczęcia rozgrzewania do całkowitego zakończenia procesu. Etapy nagrzewania i suszenia zachodzą pod warunkiem utrzymania odpowiedniej temperatury w komorze.

Konwekcyjne suszenie drewna w wysokich temperaturach przeprowadza się z wykorzystaniem przegrzanej pary wodnej jako czynnika suszącego. Czynnikiem przejmującym

wilgoć od suszonego drewna jest para wodna (bez dodatku powietrza). Dlatego temperatura tej pary musi być wyższa od temperatury nasycenia (czyli musi to być tzw. para przegrzana). Przy ciśnieniu atmosferycznym temperatura nasycenia pary wodnej jest równa około 100°C (dokładnie 100°C przy $P = 101,3$ kPa). Aby mogło nastąpić odparowanie wilgoci z suszonego materiału jego temperatura również musi być równa co najmniej 100°C. W przeciwnym wypadku para wodna kontaktująca się z powierzchnią materiału ulegnie ochłodzeniu poniżej temperatury nasycenia i skondensuje powodując wzrost wilgotności materiału zamiast wysuszenia. W nagrzanym do 100°C drewnie wilgoć przemieszcza się głównie w postaci pary, ponieważ odparowanie wody następuje, w miarę nagrzewania materiału do temperatury wrzenia, w całej objętości suszonego materiału. Przyspiesza to dodatkowo proces suszenia. Jeśli pominąć niewielkie różnice między różnymi gatunkami drewna, to okazuje się, że wilgotność równoważna drewna - a więc i szybkość suszenia - przy ustalonym ciśnieniu zależą jedynie od temperatury pary, co upraszcza sterowanie procesem suszenia. Jednak regulacja temperatury musi być bardzo precyzyjna, ponieważ nawet niewielkie zmiany temperatury pary, szczególnie w przedziale 100 - 115°C, wpływają istotnie na wilgotność równoważną drewna, a więc również na szybkość i jakość suszenia.

Z uwagi na to, że ilość wilgoci usuwanej z suszonego materiału jest stosunkowo duża i przy szczelnej konstrukcji komory mógłby nastąpić wzrost ciśnienia w komorze, prowadzący do spadku intensywności procesu suszenia, strumień odparowywanej wilgoci odprowadza się poza komorę suszarki przez swobodnie zamykaną kłapę kominka.

Wprowadzenie do komory suszarki materiału przeznaczonego do suszenia powoduje, że gazem wypełniającym komorę jest powietrze. Dlatego we wstępnej fazie procesu suszenia do komory doprowadzana jest para wodna, natomiast mieszanina tej pary z powietrzem usuwana jest na zewnątrz. Część pary styka się z zimną powierzchnią materiału i ulega kondensacji. Ułatwia to i przyspiesza przebieg procesu nagrzewania drewna oraz zabezpiecza przed przesuszeniem jego warstwy powierzchniowej w czasie nagrzewania. Jednak powoduje to pewne wydłużenie czasu suszenia, ponieważ skroploną wilgoć trzeba później ponownie odparować.

W trakcie nagrzewania materiału doprowadza się do szybkiego zmieszania powietrza znajdującego się w komorze ze znaczną ilością pary wodnej. Spowoduje to najpierw nasycenie powietrza wilgocią, a w dalszej kolejności zwiększenie udziału pary w tej mieszaninie (aż do całkowitego wyparcia powietrza) przy temperaturze pary około 100°C. Wzrost zawartości wilgoci w gazie wypełniającym komorę przy wzroście temperatury gazu oznacza także wzrost wskazań termometru mokrego. Po pewnym czasie termometr ten wskazuje temperaturę nasycenia pary wodnej przy danym ciśnieniu. Oznacza to, że komora jest już wolna od powietrza. Po osiągnięciu temperatury wewnątrz komory na poziomie 70-80°C przerywa się jej podwyższanie, a jedynie

utrzymuje na poziomie nie wyższym niż 80°C, a drewno odpręża się przez co najmniej 2 godziny, maksymalnie do 3. W tym czasie również temperatura suszonego materiału (przynajmniej w strefie przypowierzchniowej) osiąga już poziom około 70-80°C. Po tym etapie rozpoczyna się podnoszenie temperatury wewnątrz komory powyżej 100°C i wówczas rozpoczyna się proces właściwego suszenia. Niezależnie od temperatury pary przegrzanej temperatura suszonego materiału pozostaje stała tak długo, jak przy powierzchni materiału znajduje się wolna woda. Jest to tzw. pierwszy okres suszenia. Szybkość suszenia określona jest tylko przez warunki wymiany ciepła między parą a suszonym drewnem - im wyższa temperatura pary, tym odparowanie intensywniejsze. Wysoka temperatura czynnika suszącego powoduje, że proces suszenia jest szybszy, niż przy tradycyjnym suszeniu gorącym powietrzem.

Temperaturę pary należy utrzymywać w pobliżu 100°C tak długo, aż nie nastąpi przegrzanie całego drewna. Ciepło przemieszczające się w głąb nagrzanego do około 100°C drewna powoduje parowanie wody zawartej w drewnie i przemieszczanie się powstającej pary wodnej w kierunku powierzchni drewna, gdzie jest ona przejmowana przez czynnik suszący. Wzrost temperatury pary suszącej powoduje jej przegrzanie, co przyspiesza dodatkowo proces suszenia i umożliwia suszenie poniżej punktu nasycenia włókien. Wysoka temperatura drewna i brak powietrza w jego porach sprzyjają dużej szybkości przemieszczania się wilgoci w drewnie w kierunku jego powierzchni. Dlatego również w drugim okresie suszenia prędkość tego procesu zależy głównie od oporów przewodzenia ciepła w głąb materiału, a nie od oporów przepływu pary w porach. W efekcie, powierzchnia suszonego drewna pozostaje wilgotna dłużej niż przy suszeniu tradycyjnym. Z tego powodu prędkość przepływu czynnika suszącego ma dużo większy wpływ na czas suszenia. Często optaca się stosować prędkość pary między tarcicą rzędu 4 - 5 m/s. W tym celu zaleca się stosowanie przekładek o grubości 25 - 30 % mniejszej niż w suszarniach tradycyjnych. Temperatura suszonego drewna nie wzrasta ponad 100°C tak długo, jak w jego wnętrzu znajduje się woda w stanie ciekłym. Dopiero po jej odparowaniu temperatura drewna wzrasta i pod koniec procesu suszenia jej wartość zbliża się do temperatury pary suszącej.

W parze przegrzanej można suszyć przede wszystkim drewno iglaste pod warunkiem, że działanie wysokiej temperatury nie spowoduje niekorzystnych zmian jego własności. Przy suszeniu drewna liściastego należy zachować szczególną ostrożność, zwłaszcza w zakresie wilgotności powyżej punktu nasycenia włókien. Niektóre gatunki drewna, np. dąb, w wysokiej temperaturze wykazują skłonności do niszczenia komórek (kolapsu) i pęknięć wewnętrznych, dlatego suszenie ich omawianą metodą należy prowadzić bardzo ostrożnie, zmniejszając prędkość przepływu pary między tarcicą. Nie powinno się przeprowadzać etapu rozgrzewania zbyt szybko, aby w ten sposób nie dopuścić do powstania kieszeni wodnych powodujących

pęknięcie materiału suszonego od wewnątrz. Najlepszy efekt otrzymuje się przy szybkości rozgrzewania ok. 1 - 1,5 °C na godzinę. Wówczas drewno nie ma tendencji do zmian kształtu, a wewnątrz nie występują naprężenia wywołane kolapsem.

Temperatura pary przegrzanej w trakcie trwania procesu suszenia musi być wyższa niż 100°C. W tej temperaturze woda z powierzchni drewna szybko odparowuje i zachodzi bardzo intensywny ruch wilgoci z wnętrza materiału, co zabezpiecza go przed zbyt gwałtownym przesuszeniem warstwy powierzchniowej. Różnica temperatury pary przed i za stosem jest tym większa, im mniejsza jest ilość pary przepływającej przez stos w jednostce czasu. Może ona wynosić 8 do 10 K przy stosie o szerokości 780 mm. W temperaturze pary przed stosem równej 130°C jej temperatura za stosem podnosi się stopniowo (w miarę postępu procesu suszenia) od 100°C do 120°C.

Właściwy proces suszenia rozpoczyna się w chwili, gdy temperatura powierzchni drewna przeznaczonego do suszenia osiągnie 100°C. Gdy drewno jest mokre i odparowuje woda wolna, temperatura ta jest stała, maksymalnie ok. 103°C. Warstwy wewnętrzne nagrzewają się wolniej, ale po pewnym czasie w całym przekroju suszonego elementu temperatura jest w przybliżeniu jednakowa. Między parą we wnętrzu drewna, w temperaturze powyżej 100°C, a parą wypełniającą komorę suszarki występuje różnica ciśnień. Różnica ta zależy od grubości drewna, jego gęstości i budowy anatomicznej. Ruch wilgoci w drewnie odbywa się, przy zwiększonej różnicy ciśnień cząstkowych, na skutek dyfuzji pary wodnej.

Proces suszenia można podzielić na kilka etapów. W pierwszym z drewna usuwana jest woda wolna. Transport wilgoci przebiega wyłącznie na drodze kapilarnej. Parowanie wody wolnej z powierzchni drewna uwarunkowane jest temperaturą i ciśnieniem istniejącymi na granicy wody i gazu. W związku z budową drewna woda paruje z różną prędkością z różnych przekrojów suszonego materiału. W etapie drugim suszenia drewna woda zazwyczaj występuje już w postaci pary wodnej i przemieszcza się siłami dyfuzji. Prędkość suszenia w tym etapie zaczyna maleć. W ostatnim etapie temperatura drewna zbliża się do temperatury otoczenia i występuje jedynie dyfuzyjny transport pary wodnej. Po zakończeniu procesu suszenia zawartość wilgoci waha się zazwyczaj między 12 - 15%.

Na wykresie przedstawiono przebieg zmiany wilgotności w czasie drewna bukowego o wymiarach poprzecznych 70x70mm suszonego w parze przegrzanej w temperaturze ok. 110°C.