انتاج الإسمنت
الطريقة الجافة

الطبعة الثانية

سنة 2018

تأليف واعداد

المهندس: علي عبد الحكيم محمود بلاوالي

رقم الايداع في دار الكتب والوثائق العراقية (2313) لسنة 2014

إهداءDedication

الى كل أعزائي الذين شاء الله أن اشاركهم حياتي الشخصية والى كل أصدقائي وزملائي وخاصة في مجال صناعة الإسمنت أهدي كتابي هذا عله يضيف لبنة من لبنات المعرفة العلمية والفنية لتطوير هذه الصناعة الرائدة.

مع شكري الخاص لوالدي لأعانته لي في التقويم اللغوي للكتاب.

(تحذير)هذا الكتاب لا يمكن اعادة طباعة كل او جزء منه باسترجاع المعلومات الكترونيا و بأي طريقة اخرى، كذلك لا يمكن ترجمته الى اي لغة اخرى. للقيام بذلك يجب الحصول على موافقة خطية من المؤلف حصرا.

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة Preface

لا شك أن صناعة الإسمنت هي عصب الصناعات التي لا يمكن الاستغناء عنها في كل مجلات التقدم الحضاري و العمراني و الصناعي للبشرية فالإسمنت أصبح المادة الأساسية للبناء في القرن العشرين ولأهمية الموضوع ارتأيت أن أساهم مساهمة متواضعة في كتابي هذا عن كيفية صناعة الاسمنت والمعدات المستخدمة وكيفية عملهامع توضيح اهم المعادلات المهمة التي يحتاجها المهندس في العمليات الإنتاجية ولتعميم الفائدة استخدمت اللغة العربية في الكتاب بشكل رئيسي مع استخدام المصطلحات الإنكليزية ومرادفاتها العربية لتلك المصطلحات. وكمدخل لموضوع الكتاب لابد الإشارة الى تاريخ موجز لصناعة السمنت.

مقدمة الطبعة الثانية Second Edition Preface

تحتاج الكتب العلمية الى تحديث مستمر لمواكبة التغيير والتطور وللنجاح الذي حققه الطبعة الاولى من الكتاب قمت بإعداد الطبعة الثانية بإضافة أكثر من 200 معلومة جديدة مع تعديل شامل على عرضالمخططات واستخدام صور واضحة ومفيدة في مختلف المواضيع مع تبديل المصطلحات العلمية باللغة العربية بأخرىأكثر دقة مما ساهم في تطوير المحتوى العلمي، كذلك تم تحسين اسلوب عرض المواضيع لتسهيل ايصال المعلومة الى القارئ.

يمكنكم الان تحميل العديد من المقالات عن الاسمنت بالاضافة الى الكتب التي قمت بتاليفه من الموقع www.bulawali.com و الاتصال من خلال الايميل :Bulawali@gmail.com

فهرس Index

الفصول Chapters	الصفحة page

الفصل الاول: صناعة السمنت Cement Industry	15
1: صناعة السمنت Cement industry	17
1:1 تاريخ صناعة السمنت Cement industry History	17
2:1مقدمة عن انتاج السمنت بالطريقة الجافة Preface About Cement Production with Dry Process	19
الفصل الثاني: المقلع Quarry	21
2: المقلع Quarry	23
2:1 المقلع والمعدات المستخدمة The Quarry And Equipment	23
2: 2 المسافة بين المقلع والمعمل The Distance Between The Quarry And Factory	23
2: 3 خزن المواد الاولية قبل السحق Storage Of Raw Materials Before Crushing	24
الفصل الثالث: الكسارة Crusher	25
3: الكسارة crusher	27
3: 1 نظرة عامة overview	27
2:3 انواع الكسارات Types of Crushers	29
3:3 نسبة التصغير reduction ratio	30
معلومات عن بعض أنواع الكسارات Crushers	31
الفصل الرابع: نواقل المواد الصلبة Solid Material conveyors	33
4:نواقل المواد الصلبة Solid Material Conveyors	35
1:4 نقل المواد الصلبة الناعمة بالهواء Pneumatic Conveying for fine solid material	36
مضخة [Fuller Kenyon (FK)]	36
الانظمة المرحلية ليان ودينس Lean and Dense Phase Systems	36
ج- النقل بالشريحة الهوائية Air Slide	38
2:4 نقل المواد بالمصعد الدلو Bucket Elevator	39
مصعد الدلو ذات السلسلةِ Chain Bucket Elevator	39
مصعد الدلو ذات الحزام Belt Bucket Elevator	39
4: 3 الاحزمة الناقلة Belt Conveyor	41
4:4الناقل اللولبي Screw Conveyor	42
5:4 ناقل السحب السلسلة Drag Chain conveyor	42
6:4 ناقل الدلو العميق Deep Bucket Conveyor	43
7:4 الناقل الحوضي او المقلاة Pan Conveyor	43
8:4المغذيات المئزرة Apron Feeder	45
9:4المغذيات الوزنية Weight feeders	45
المتحسسات Sensors	46

49	الفصل الخامس: كيمياء صناعة السمنت Chemistry of cement Production
51	5: كيمياء صناعة السمنت Chemistry of cement Production
51	1:5المعلومات الكيمياوية للموادالاولية Chemical Information For Raw Material
55	المكونات الكيمياوية وتأثيراتها Chemical Components and their Effects
58	2:5معادن الكلنكر الرئيسية Clinker Minerals Main
59	3:5معاملات الكلنكر Clinker Modulus
62	4:5 معادلات بووك Bogue لحساب معادن الكلنكر الرئيسية Clinker Minerals Main
63	5:5 ميل اغلفة الكلنكر Coating Tendency
65	الفصل السادس: خزن المواد To store Material
67	6: خزن المواد To store Material
67	1:6 المقدمة Brief
68	2:6انواع الخزن داخل العملية الانتاجيةٍ storages types inside the production process
68	مخازن سرير المخلوط و مخازن المضافات Mixture bed and Additive storage
70	الصوامع Silos
72	خزانات الوقود Fuel Storages
73	الفصل السابع: المعدات المساعدة Auxiliary Equipment
75	7 : المعدات المساعدة Auxiliary Equipment
75	1:7 المراوح Fans
79	2:7 مجمع الغبار Dust Collection
79	السايكلون Cyclone
81	المرسبات الكهروستاتيكية Electrostatic Precipitators
83	المرشحات او المرسبات الكيسية Bag Filters
83	المرشحات الكيسية الرجاجة Shaker Bag Filters
84	المرشحات ذات الهواء العكسي Reverse Air Bag Filters
85	المرسبة او المرشحة الكيسية ذات التدفق الضارب Pulse Jet Bag Filter
87	3:7 الفرازة separator أو المصنفة classifier
89	الجيل الاول: فرازةالرمل Grit Separator
90	الجيل الثاني: الفرازة الميكانيكية Mechanical separator
91	الجيل الثالث: الفرازة ذي الكفاءة العالية High Efficiency (Separator (HES
93	الجيل الرابع: فرازة أكس بي اربعة XP 4
95	منحني ترومب Tromp Curve
96	7:4 برج التبريد أو التكيف Cooling Or Conditioning Tower

5:7 دوارة غلق Rotary Lock	97
الفصل لثامن: الطواحين في صناعة السمنت Mills in Cement Industry	99
8: الطواحين في صناعة السمنت Mills in Cement Industry	101
1:8طاحونة الكرات Ball Mill	102
السرعة الحرجة Critical Speed	107
وسائل الطحن Grinding Media	109
الطاقة المستهلكة في الطاحونة power consumption in the Mill	110
تطوير الطواحين Mill Development	112
نظرة عامة Over View	113
2:8 الطاحونة العامودية Vertical Mill	114
مبدا عمل الطاحونة العامودية ذات المدحلة Vertical Roller Mill	117
3:8 الاسطوانة الضاغطة Roller Press	120
4:8 طاحونة هورو Horo Mill	121
حمل الدوران Circulating Load	122
الفصل التاسع: تحضير وجبة المواد الاولية Raw Meal Preparation	123
9: تحضير وجبة المواد الاولية Raw Meal Preparation	125
الفصل العاشر: الفرن Kiln	131
10: الفرن Kiln	133
1:10 انواع الافران Kiln Types	134
2:10 تغذية الفرن Kiln Feeding	138
الانظمة الحجمية Volumetric System	138
الانظمة الجاذبية Gravimetric System	139
النظام الغير مباشر Indirect System	140
3:10 تفاعلات الكلنكر Clinker Reactions	141
المفقود من الاشعال Loss on Ignition	149
مدى الكلنكر Clinkering Range	149
ظاهرة رجل الثلج Snow Man	150
كرات الكلنكر Clinker Ball و حلقات اغلفة الكلنكر Clinker Ring Formation الغير مرغوبتين	150
4:10 المسخن الأولي Pre – Heter	152
5:10 المكلسنة أو المكلسنة الاولية Pre-Calciner Calcineror	161
زمن الاحتفاظ في المكلسنة Retention Time Calciner	163
درجة الكلسنة Degree of Calcination	163
أنواع المكلسنة Calciner Types	164
المكلسنة خارج الخط Off Line Calciner	164
المكلسنة في الخط In line Calciner	164

166	10 : 6 الفرن الدوار Rotary Kiln
170	ترحل الفرن الدوار Rotary Kiln Traveling
172	حرارة القشرة الخارجية للفرن الدوار Rotary Kiln Shell Temperature
175	قشرة الفرن Kiln Shell
176	بيضوية الفرن الدوار Rotary Kiln Ovality
177	الزحف Creep
177	مانع تسرب الفرن الدوار Rotary Kiln Seal
180	حلقة أنف الفرن الدوار Rotary Kiln Nose Ring
182	7:10 قلنسوة الفرن الدوار Rotary Kiln Hood
183	8:10 موقد الفرن الدوار Rotary Kiln Burner أو الموقد الرئيسي Main Burner
185	9:10 الوقود المستخدم في الفرن Fuel Used in Kiln
185	صافي القيمة الحرارية Net Calorific Value
186	حرارة الشعلة Flame Temperature
186	حرارة الاحتراق المطلوبة Required Burning Temperature
187	الية الاحتراق the Mechanism of Combustion
189	الهواء المطلوب نظريا لحرق الوقود Theoretical air required to burn fuel
189	شكل الشعلة او اللهب Flame Shape
190	الكلنكر البني Brown Clinker
191	استعادة الحرارة Heat Recovery
191	التوليد المشترك Co- Generation
192	10:10 منظومة الممر الجانبي By Pass System
196	خطوات اضافية لمعالجة المواد المتطايرة Material Volatile
197	11:10مبرد الكلنكر Clinker Cooler
198	انواع مبرد الكلنكر Clinker Cooler المستخدمة بصورة واسعة
198	المبرد الدوار Rotary Cooler
198	المبرد السياري Planetary Cooler وتسمى أيضا بالمبرد التابع Satellite Cooler
199	مبرد الحاجز الحديدي Grate Cooler أو الترددية Reciprocating
203	كسارة الكلنكر Clinker Crusher
204	نقل الكلنكر الى الخزن Clinker Transporting To the Store
205	كفاءة مبرد الكلنكر Clinker Cooler Efficiency

205	التحميل النوعي للحاجز الحديدي Specific Grate Loading او الانتاج النوعي لمبرد الكلنكر Specific Output of Clinker Cooler
206	12:10بعض الحسابات المهمة للفرن الدوار Rotary Kiln
206	التحميل الحجمي للفرن الدوار Volumetric loading of Rotary Kiln
206	المقطع العرضي الفعال للفرن الدوار Rotary Kiln Effective Cross Section Area
206	الحجم الفعال للفرن الدوار Rotary Kiln Effective Volume
207	زمن الاحتفاظ للمواد داخل الفرن الدوارRetention Time for Material inside Rotary Kiln
208	درجة الملء Degree of filling
209	مناطق الفرن Kiln Zones
210	نسبة طول الفرن الدوار الى قطره Rotary Kiln Length to diameter Ratio
212	13:10معلومات عن تشغيل الفرن Information About Kiln Operation
216	14:10بد تشغيل الفرن الدوار: الاحماء Kiln Start up Rotary: Warm Up
218	15:10فرن السرير المميع Fluidized Bed Kiln
220	الفصل الحادي عشر: السمنت Cement
222	11: السمنت Cement
223	السيطرة على حرارة السمنت Cement Temperature
224	معرفة كمية الجبس Gypsum المضافة
225	مقدار نعومة السمنت
226	استهلاك الطاقة Power Consumption
226	قابلية الطحن للكلنكر Clinker Grindability
226	المواد الاولية Raw Material
227	الظروف التشغيلية OperationalCondition
228	1:11 قوة السمنت Cement Strength
229	2:11المتبقي الغير قابل للذوبان (IR) Insoluble residue
229	3:11 المفقود من الاشتعال (LOI) Loss on ignition
230	4:11أنواع السمنت Cement Types
230	انواع الاسمنت
230	السمنت البورتلاندي العادي (OPC) ordinary Portland cement
230	السمنت سريع التصلب (RHC)Rapid Harding Cement

231	السمنت المقاوم للكبريتات (SRC)Sulphate Resistant Cement
231	السمنت قليل الحرارة (LHC) Low heat Cement
231	السمنت ذات الالومينا العالية (HAC) High Alumina Cement
231	سمنت ابار النفط (OWC) Oil Well Cement
232	السمنت الابيض (WPC) White Cement
232	السمنت البو زالاني (PPC) Pozzolana Cement
232	سمنت خبث الافران الانفجارية (BFSC) blast furnace slag Cement
232	حجر الكلسبورتلاندسمنت (LPC) Limestone Portland Cement او (PLC)
234	مساعدات الطحن Grinding Aid
237	الفصل الثاني عشر: التلوث البيئي في انتاج السمنت ومعالجتها Environmental PollutionIn Cement Production and Remediation
239	12 : التلوث البيئي في انتاج السمنت ومعالجتها Environmental Pollution in Cement Production and Remediation
238	ملوثات الهواء الكيمياوية المتحررة من صناعة السمنت Cement
238	أكاسيد النتروجين (NOx)
240	ثنائي أوكسيد الكبريت (SO2)
240	الديوكسينات (Dioxins) و الفيورانات (Furans)
241	المعادن الثقيلة الصلبةالسامة Toxic heavy metals
241	ثنائي أوكسيد الكاربون (CO2)
242	الفصل الثالث عشر: التعبئة Packing
245	13 التعبئة Packing
245	تعبئة بالأكياس Bag Packing
245	التعبئة الكتلية Bulk Loading
249	الفصل الرابع عشر: المواد الحرارية Refractories Material
251	14المواد الحرارية Refractories Material
253	أنواع الطابوق الحراري Thermal Bricks
253	مجموعة الالومينا– سيليكا (Alumina -Silica Group) أو طابوق الالومينا (Alumina Brick)
253	المجموعة الأساسية (Basic Group)
253	طابوق دولومايت (Dolomite bricks)

254	طابوق الاسبنيل المطوع (Spinel bonded brick)
254	أبعاد الطابوق الحراري Thermal Bricks Dimensions
255	تبديل الطابوق الحراري Thermal Bricks Replacement
256	سمك الطابوق Brick Thickness و قطر الفرن الدوار Rotary kiln Diameter
256	قلع الطابوق الحراري Thermal Bricks و المواد القابلة للصب Castable
257	رصف الطابوق Brick Paving
261	الفصل الخامس عشر: إضافة الماء الى السمنت العادي Hydration of Portland Cement
263	15 إضافة الماء الى السمنت البورتلاندي Hydration of Portland Cement
263	المرحلة الأولية Initial Stage
263	المرحلة الساكنة Dormant Stage
263	المرحلة المتسارعة Acceleration Stage
264	المرحلة المتباطئة Deceleration Stage
267	الفصل السادس عشر: معلومات متفرقة Outspread Information
269	16 معلومات متفرقة Outspread Information
269	1:16 كمية الحرارة المستهلكة لإنتاج الكلنكر Heat Quantity To Product the Clinker
270	2:16كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة Power Consumption
271	3:16تكلفة انتاج السمنت The Cost Of Cement Production
271	تشغيل معمل الاسمنت Operrting Cement Plant
276	متوسط الوقت بين التوقفات Mean Time Between Stops
277	المعايير المستهدفة في معامل الاسمنت الحديثة Modern Cement plant
277	16:4 النمو في استهلاك السمنت البورتلاندي في العالم
278	16:5 النمو في سعة انتاج الكلنكر لمعامل السمنت
278	16:6 التحليل الكيمياوي للمواد الاولية و وجبة المواد لإنتاج الكلنكر
279	16:7 الحدود العليا المسموح بها لتذبذب المتغيرات المحددة لتركيبة تغذية الفرن
279	16:8 مقدار تأثير التغير الكيمياوي على العمليات و النوعية
279	16:9 حرارة اللهب و حجم الغازات
280	16:10 نماذج عن مقدار الطاقة لبعض الفضلات التي تستخدم كوقود بديل
280	16:11 الحدود التشغيلية النموذجية لمراحل المسخن الاولي
281	16:12 الاحماء النموذجي للفرن وتحضيرها للتشغيل

16: 13 مواصفات (ASTM C150) للإسمنت البورتلاندي	282
16: 14 الحدود الكيمياوية لأنواع الاسمنت البورتلاندي (ASTM C150)	282
16: 15 الحدود الفزيائية لأنواع الاسمنت البورتلاندي (ASTM C150)	282
16: 16التوزيع النموذجي لمركبات الاسمنت (ASTM C150)	283
16: 17 وزن الكرات و المساحة السطحية (طاحونة الكرات)	283
16: 18 ملخص معلومات البيانات الحرجة لمختلف انظمة الافران	283
16: 19 متطلبات المواصفات القياسية العراقية رقم 5 لسنة 1984	284
16:20المواصفات الاوربية للاسمنت (EN197-1)	284
المصطلحات Terminology	287
مراجع References	311

الفصل الثامن

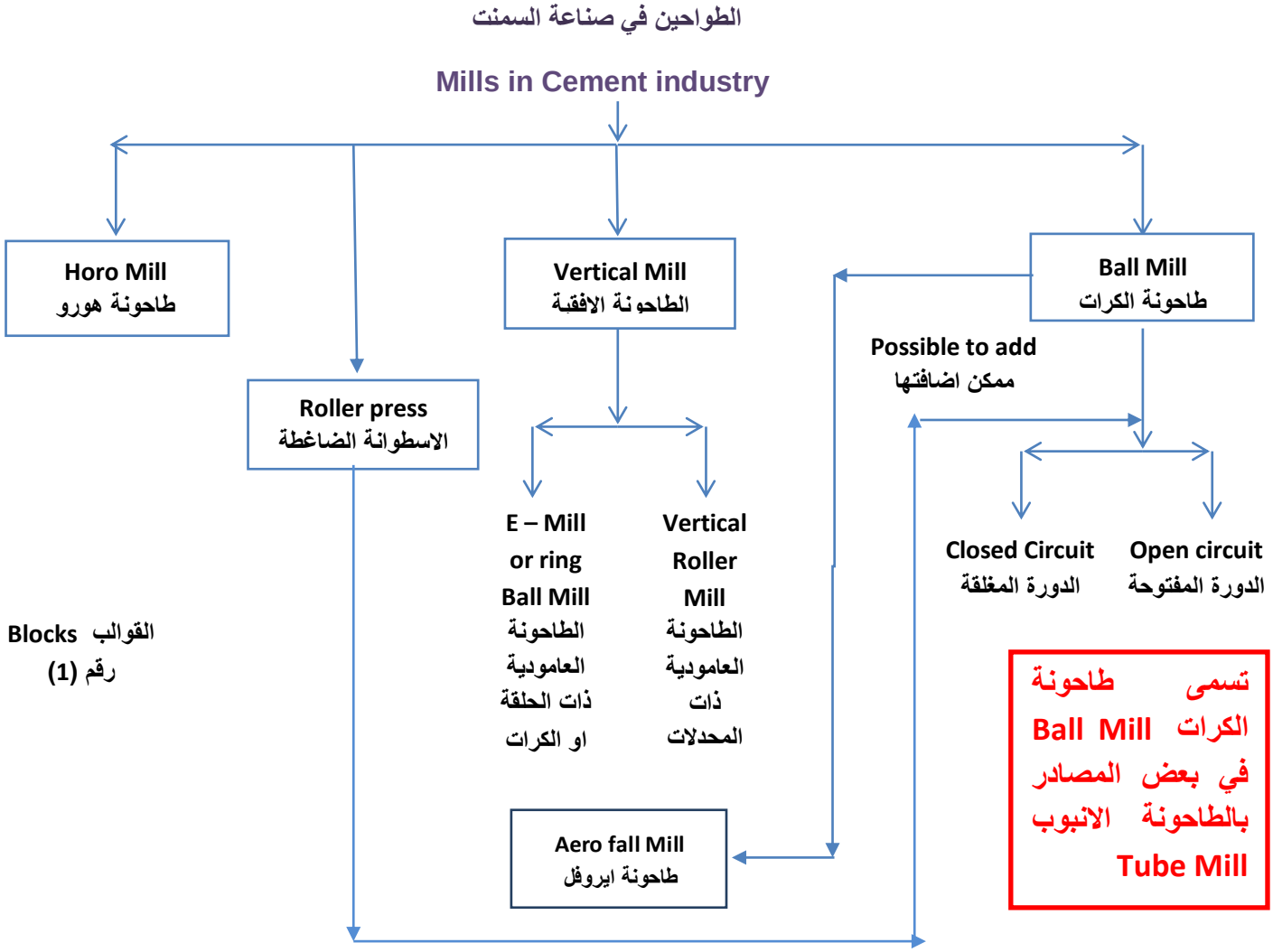
الطواحين في صناعة السمنت

Mills in Cement Industry

8: الطواحين في صناعة السمنت Mills in Cement Industry

هناك الحاجة الى عملية الطحن في مراحل صناعة السمنت سوآء لطحن وجبة المواد الاولية (Raw Meal) تحضيرا لتغذية الفرن (Kiln Feeding) بها او لطحن الفحم (Coal) [اذا كانت تستخدم كوقود في الفرن] او لطحن الكلنكر مع المضافات (Clinker with the additives) لإنتاج السمنت (Cement) حيث ان عملية الطحن تستهلك حوالي60 % من الطاقة الكهربائية (ElectricPower).

هناك العديد من انواع الطواحين (Cements) تستخدم في معامل السمنت منها الطواحين ذات الكرات (Balls Mills) والتي تكون بصورة افقية (Horizontal) ولها تفرعاتها, الطواحين العامودية (Vertical Mill) ولها انواعها, و الاسطوانة الضاغطة (Roller Press) والتي تستخدم كمساعد للطحن في تقليل ابعاد المواد الداخلة الى الطاحونة للمساعدة في الطحن او تستخدم كطاحونة منفصلة وفي الوقت الحديث تستخدم نوع من الطواحين تدعى طاحونة هورو (Horo Mill) والتي هي مزيج من الاسطوانة الضاغطة (Roller Press) والطاحونة ذات الكرات (Ball Mill). وكما موضح في القوالب (Blocks) رقم (1):-



1:8طاحونة الكرات Ball Mill

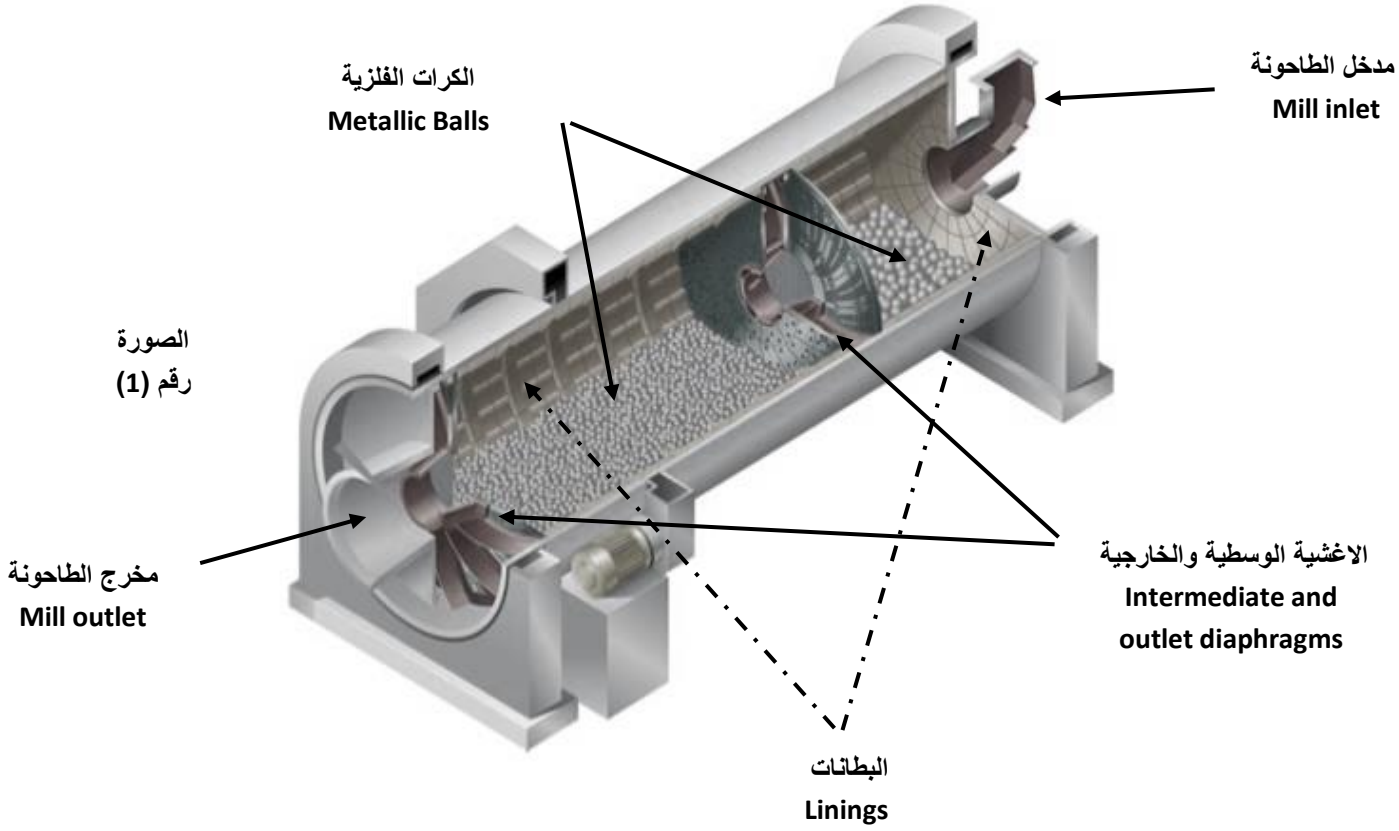
اشهر انواع الطواحين (Mills) المستخدمة في مجال صناعة السمنت (Cement) تستخدم طاحونة الكرات (Ball Mill) لطحن المواد في مختلف المراحل سوآءا المواد الاولية (Raw Material) او الكلنكر (Clinker).

تتكون بنية طاحونة الكرات الافقية (Structure of Horizontal Ball Mill) من القشرة (Shell) الخارجية التي تكون على شكل اسطوانة أفقية و تتراوح سمكها حوالي 1\100 او 1\75 من قطر الطاحونة (Mill Diameter) مع الاخذ بالاعتبار طول الطاحونة (Mill Length) و عدد فتحات براغي تثبت البطانات (Lining).

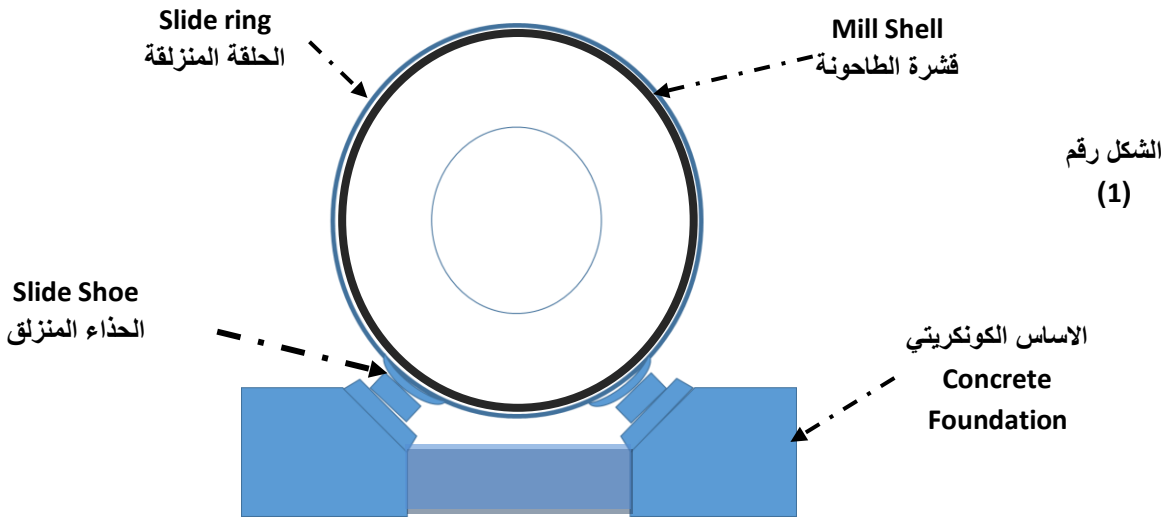
تحتوي على حلقتين توضع على جهتي الطاحونة وتسمى الحلقةالمنزلقة (Slide ring) والتي تنزلق على مساند الاحذية المنزلقة (Slide shoes Bearings) لتسهيل حركتها اثناء عمل الطاحونة (Mill) وتقليل الاحتكاك, حيث يتم تحريكها باستخدام محرك كهربائي.

تبطن الاسطوانة بالبطانات (Linings) من الداخل لحماية القشرة الخارجية للطاحونة ولتهييج الكرات الفلزية (Metallic Balls) برفع (Balls) اثناء دوراة قشرة الطاحون (Mill Shell) للقيام بعملية الطحن.

تحتوي الأسطوانة على غرف (Chambers) مفردة او مزدوجة او ثلاثية حسب الحاجة والتصميم وتفصل هذه الغرف الاغشية (diaphragms) لتنظيم عمل الطاحونة وعدم اختلاط الاحجام المختلفة للكرات الفلزية حيث تملئ الاحجام الكبيرة من الكرات الفلزية (Metallic Balls) في الغرفة (Chamber) التي تقع باتجاه مدخل المواد (Mill inlet) لغرض تكسير القطع الكبير للمواد الى اصغر والكرات الفلزية الاصغر في الغرفة (Chamber) للجهة التي تخرج منها المواد (Mill Outlet) والتي تتم بها طحن المواد المصغرة لتكون أنعم وكما موضح في الصورة رقم (1):-



في الشكل التالي رقم (1) مقطع عرضي للطاحونة توضح فيها الحلقة المنزلقة (Slide ring) و مساند الاحذية المنزلقة (Slide shoes Bearings):-

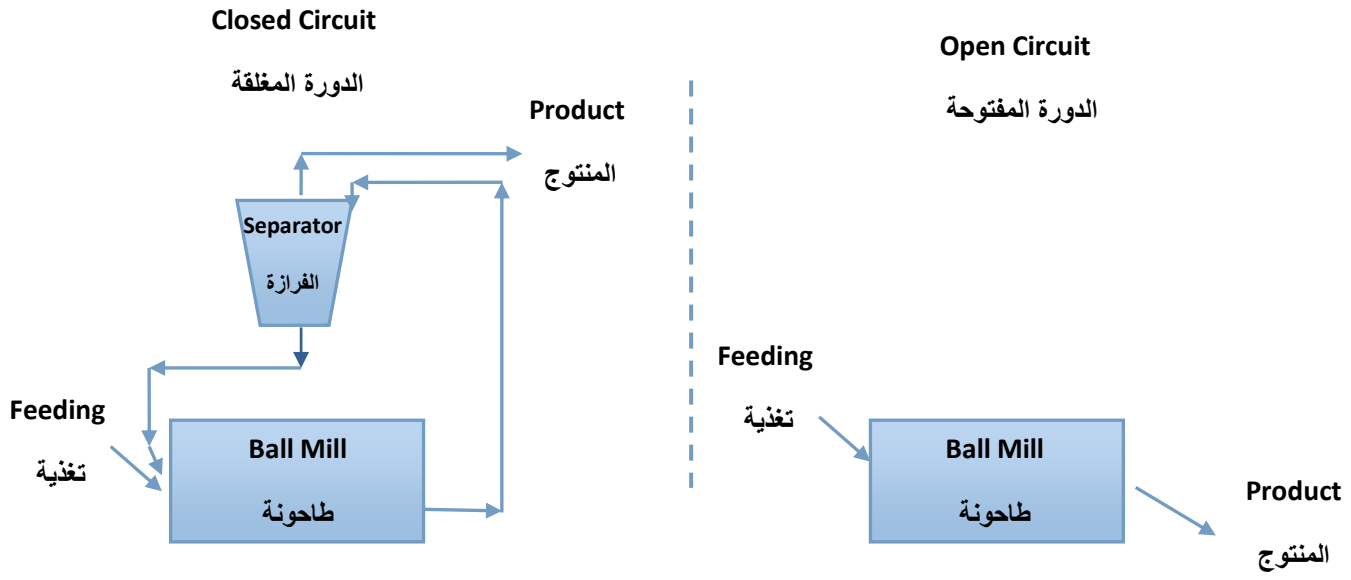


ان نسبة طول الطاحونة الى قطرها تختلف من طاحونة الى اخرى وحسب الاستخدام و لطحن الكلنكر (Clinker) مع مضافاتها (Additive) لإنتاج السمنت (Cement) تكون نسبة طول الطاحونة على قطرها بين 3.5 الى 4.5 للدورة المفتوحة (open circuit) و من 2.5 الى 3.5 للدورة المغلقة (closed circuit).

تتحرك المواد المطحونة داخل الطاحونة من المدخل (inlet) الى المخرج (Outlet) حيث بدخول المواد الى الطاحونة تبدا عملية طحنها الى ان تخرج على شكل مسحوق (Powder) و بسحب بالهواء سوآءا بواسطة مروحة التهوية (Ventilation Fan) ان وجدت او من المروحة الرئيسية للمنظومة (Main System Fan) تتحرك المواد داخل الطاحونة.

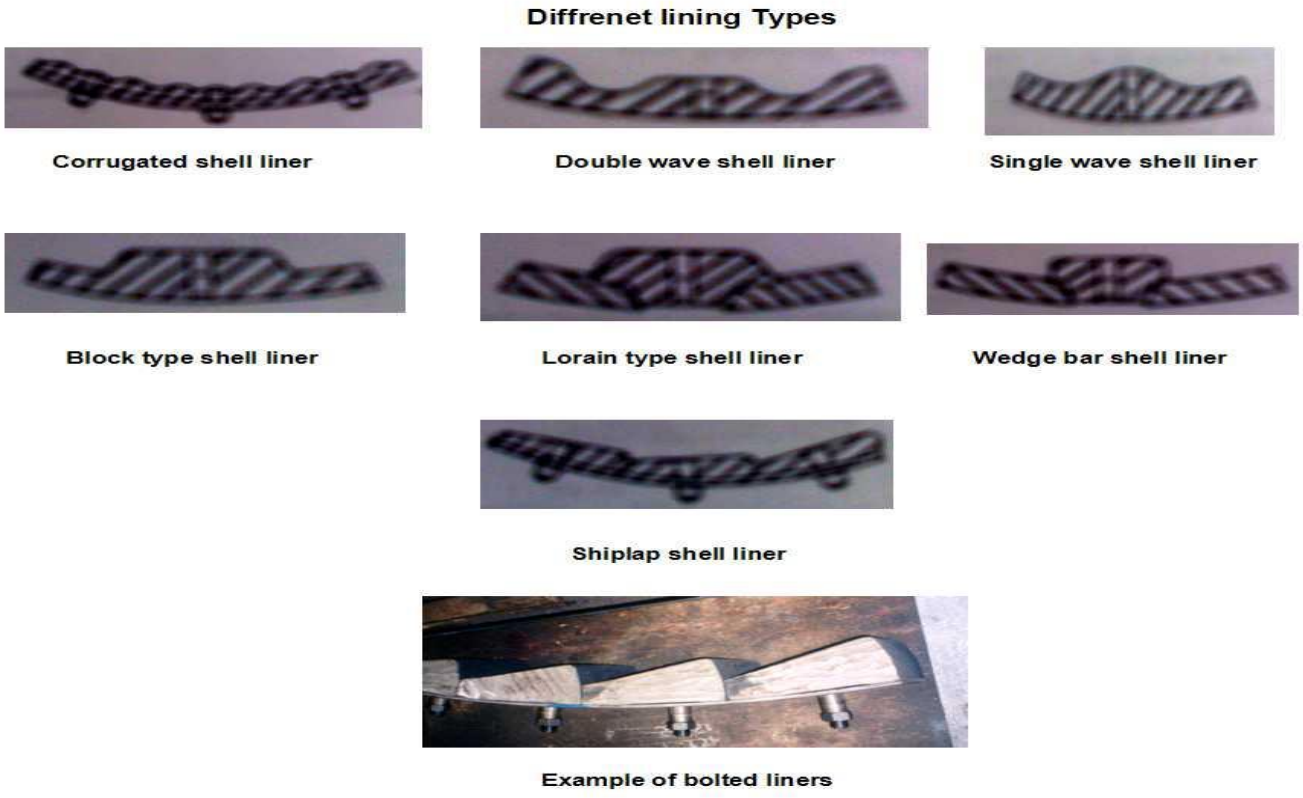
لاستقرار الطاحونة تتم تغذيتها باستمرار, و اي خلل في هذه العملية يؤدي الى حدوث اختناق (Suffocation) في الطاحونة كما هي الحال عند الزيادة المفرطة في نسبة الرطوبة في المواد الداخلة او حدوث انسدادات في الغشاء (diaphragm) و اسباب اخرى.

الدورة المفتوحة (open circuit) استخدمت قديما وكان يتم ادخال المواد من مدخل الطاحونة (Mill inlet) وتخرج من مخرج الطاحونة (Mill outlet) وان السيطرة على جودة الناتج النعومة (Fineness) كانت بتقليل التغذية وهذه الطواحين قليلة الانتاجية وتكون عددالغرف (Chambers) اكثر و اما في الدورة المغلقة (closed circuit) تم اضافة الفرازة أو المصنفة separator or (classifier) لفصل الخارج من الطاحونة الى ناعم (Fine) وخشن (Coarse) حيث ان الناعم يخرج كناتج والخشن يتم ارجاعها الى الطاحونة مع المواد الداخلة لطحنها مرة اخرة.



تستخدم بطانة مصنفة (Classifying Lining) لتنظيم توزيع الكرات فيها بحيث تقوم هذا النوع من البطانات (Linings) بدفع الكرات (Balls) الصغيرة باتجاه الغشاء الخارجي (Outlet diaphragm) والكرات الكبيرة باتجاه الغشاء الوسطي (Intermediate diaphragm) حيث بدخول المواد الى الغرفة الثانية (Second Chamber) من الغرفة الاولى (First Chamber) يتم الطحن بالتدريج وصولا الى مخرج المواد في الغشاء الخارجي (Outlet diaphragm) من الطاحونة.

صورة لانواع مختلفة من البطانات (Linings) المستخدمة داخل طواحين الاسمنت الافقية ذات الكرات الفلزية (Horizontal Ball Mill).



الغاية من الغشاء (Diaphragm) داخل الطاحونة تنظيم عملية الطحن بمنع مرور المواد الغير مكسرة بصورة جيدة في الغرفة الاولى (First Chamber) وانتقالها الى الغرفة الثانية (Second chamber) حيث تتكون من صف واحد او صفين من الحواجز و يجب ان تكون الفتحات (Slots) عليها باعداد و ابعاد معينة و تكون الجهة التي تدخل منها المواد اصغر من الجهة التي تخرج منها المواد حوالي 1.5 مرة الى مرتين لضمان عدم حدوث انسدادات (Blockages) داخل الطاحونة , تحتوي غشاء الطاحونة (Mill Diaphragm) في المنتصف على شبك التهوية (Vent-Grids) لضمان مرور الهواء لتهوية الطاحونة (Mill Ventilation Air) من خلالها.

تستخدم حاليا الاغشية الثنائية المسيطرة على الجريان (Double diaphragm with Flow Control) لتنظيم سرعة حركة المواد في الغرفة الاولى (First Chamber) بعدم الهبوط المفاجئ للمواد عند نهاية الغرفة الاولى (First Chamber) بالقرب من الغشاء (diaphragm) لتحسين نعومة المواد الخارجة من الطاحونة وزيادة بالإنتاج وتنظيم جريان المواد المراد طحنها داخل الطاحونة.

عند استخدام الطاحونة الافقية ذات الكرات (Horizontal Ball Mill) في طحن الكلنكر(Clinker) و (Gypsum) لانتاج الاسمنت (Cement) فأن اعلى سرعة للهواء داخل الطاحونة محددة بسرعة 1.5 (متر\ثانية) للدورة المغلقة (Closed System), اكثر من هذه السرعة تؤدي الى سحب ذرات خشنة غير مطحونة جيدا و تؤدي الى تقليل تغذية الطاحونة وهذه تمثل مشكلة بالاخص للطواحين ذات السعات الكبيرة عند انتاج الاسمنت (Cement).

السرعة الحرجة Critical Speed

هي السرعة التي تتساوى فيها القوة الطاردة المركزية (Centrifugal Force) مع قوة الجذب الارضي (Ground Force attraction). تكون سرعة الطاحونة ثابتة وتعتمد على السرعة الحرجة (Critical Speed) وتقاس بالمعادلة التالية:-

$$N=76.6/\sqrt{D}$$

D: قطر الطاحونة الداخلي الفعال

السرعة الحرجة غير مفيدة لعملية الطحن حيث تكون السرعة المطلوبة للطاحونة تكون اقل من السرعة الحرجة للطاحونة بنسبة 26 % الى 30 %.

وتقاس بالمعادلة التالية :-

$$N=42.5/\sqrt{D}$$

D: قطر الطاحونة الداخلي الفعال

في السرعة الحرجة (Critical Speed) تكون القوة الطاردة المركزية متعادلة مع قوة الجذب الارضي لكون السرعة عالية وعندها لا تسقط الكرات الفلزية بصورة صحيحة ولا تتم عملية الطحن. حيثيتم تدوير الطاحونة لتهييج الكرات (Ball) الفلزية بعد اصطدامها ببطانة الطاحونة للقيام بعملية الطحن.

ان اختيار البطانة الصحيحة يلعب دورا مهما وذلك لكون سرعة الطاحونة واحجام الكرات(Ball) الفلزية المقسمة بين غرف (Chambers) الطاحونة ثابتة ولذلك فان التأكل الحاصل في اجزاء الطاحونة الداخلية تلعب دورا في تحديد كفاءة الطحن ويجب ان تسجل مقدار التأكل بشكل دوري وكذلك قياس كمية الكرات (Balls) وتوزيعها وحسب المقادير المطلوبة.

تكون حركة الكرات (Ball) الغرفة الاولى (First Chamber) للطاحونة اكثرا هيجانا من الغرفة الثانية (Second Chamber) لان في الغرفة الاولى (First Chamber) يتم كسر المواد الخشنة الى احجام اصغر, وفي الغرفة الثانية (Second Chamber) تكون حركة الكرات (Ball) اقل هيجانا لتنعيم المواد القادمة من الغرفة الاولى (First Chamber).

عند استخدام الطاحونة الافقية ذات الكرات (Horizantal Ball Mill) في طحن الكلنكر (Clinker) مع الجبس (Gypsum) و تنعيمهما لانتاج الاسمنت (Cement) يجب الانتباه على:-

1- يجب ان يكتمل عملية الطحن في نهاية الطاحونة الافقية ذات الكرات (Horizontal Ball Mill) لتجنب الطحن الزائد الذي يؤدي الى استهلاك اكثر للطاقة و زيادة احتمال تكتل المواد الناعمة على الكرات (Ball) و تكون الاغلفة (Coating) عليها التي تؤدي الى تقليل كفاءة الطحن.

2- يجب فحص عملية الطحن داخل الطاحونة بأنتظام على طول الطاحونة من مدخل المواد الى مخرج المواد في الطاحونة حيث يتم اخذ نماذج من المواد المطحونة المتبقية في الطاحونة بعد ازاحة جزء من الكرات (Balls) و يتم حساب المساحة السطحية و توزيع الجسيمات (Particle Size) حيث يتم تسجيلها و مقارنتها مع القراءات السابقة و بناءا على ذلك يتم اضافة او اخراج الكرات واعادة فرزها مرة اخرى.

(يتم ايقاف الطاحونة مباشرة اثناء التشغيل مع المراوح لمنع سحب الاسمنت الناعم بعد تشغيل الطاحونة لمدة 8 ساعات) قبل اجراء عملية فحص الطاحونة.

3- يتم استخدام معادن عالية الكروم في سبيكة الكرات الفلزية للطاحونة بحيث لا تتجاوز معدل الاستهلاك 50 (غرام\طن سمنت منتج).

4- الحرارة المتولدة في طاحونة الافقية ذات الكرات (Horizontal Ball Mill) تكفي لتجفيف رطوبة المواد الداخلة اليها حتى 4 % و تعتمد ايضا على حرارة الكلنكر (Clinker Temperature) حيث في حال كونها مرتفعة يمكن السماح بالرطوبة داخل الطاحونة حتى 6 %, و في بعض الحالات عندما تكون الرطوبة عالية و حرارة الكلنكر قليلة نحتاج الى ادخال هواء حار (Hot Air) داخل الطاحونة.

وسائل الطحن Grinding Media

تمثل الكرات الفلزية (MetallicBalls) ما يقارب25 % الى 35 % من الحجم المتاح داخل الطاحونة وتسمى هذه النسبة المئوية بوسائل الطحن (Grinding Media) والنسبة المعمول بها بشكل عام تتراوح بين 28 % الى 32 % حيث اذا انخفضت من 28 % تقل انتاجية الطاحونة واستهلاكها للطاقة الى حد ما , واذا زادت الكمية اكثر من 32 % الى حد ما تزداد انتاجية الطاحونة على حساب زيادة استهلاك الطاقة. يمكن حساب النسبة المئوية الحجمية للكرات الفلزية داخل الطاحونة بالمعادلة التالية:-

$$V_L\ \% = \left(\frac{100}{\pi r^2}\right) * \left[\left(\pi r^2 \left(\theta/_{360}\right)\right) - \left(h\sqrt{r^2 + h^2}\right)\right]$$

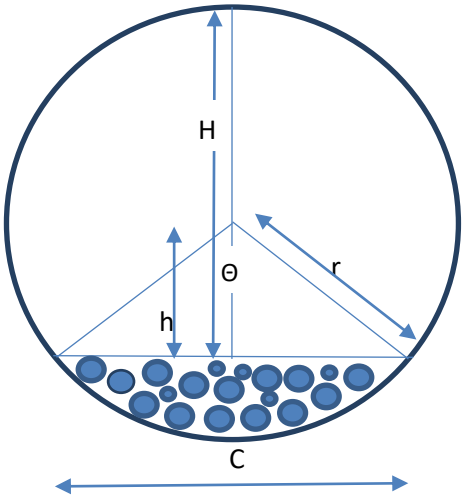
حيث ان

r = القطر الداخلي الفعال للطاحونة بالأمتار

H = الارتفاع الحر داخل الطاحونة بالأمتار

C = عرض السطح بالنسبة لشحنة الكرات = $2\sqrt{r^2 + h^2}$

θ = الزاوية المقابلة لشحنة الكرات مع مركز الطاحونة = h/r = cos1/2θ



الارتفاع الحر H و القطر الداخلي للطاحونة D بتوفرهما يمكن ايجاد النسبة الحجمية للكرات داخل الطاحونة .

الطاقة المستهلكة في الطاحونة power consumption in the Mill

يمكن حساب مقدار الطاقة المستهلكة في الطاحونة ذات الكرات (Ball Mill)تقريبيا (approximate power consumption) من المعادلة التالية:-

Kwt = 7.5 * G * Di (power consumption) الطاقة المستهلكة

G = (Grinding Media with ton) وسائل الطحن بالأطنان

Di = (effective mill with meter) القطر الداخلي الفعال بالأمتار

و الطاقة الصافية المطلوبة لتدوير الطاحونة الافقية ذات الكرات (Horizontal Ball Mill) تتم احتسابها من خلال المعادلة التالية:-

Net Kw = 0.2846 * D * A * W * N

D = effective diameter (inside the mill with lining) (meter)

A = 1.073 - (V / 100) [V = % Volume Loading]

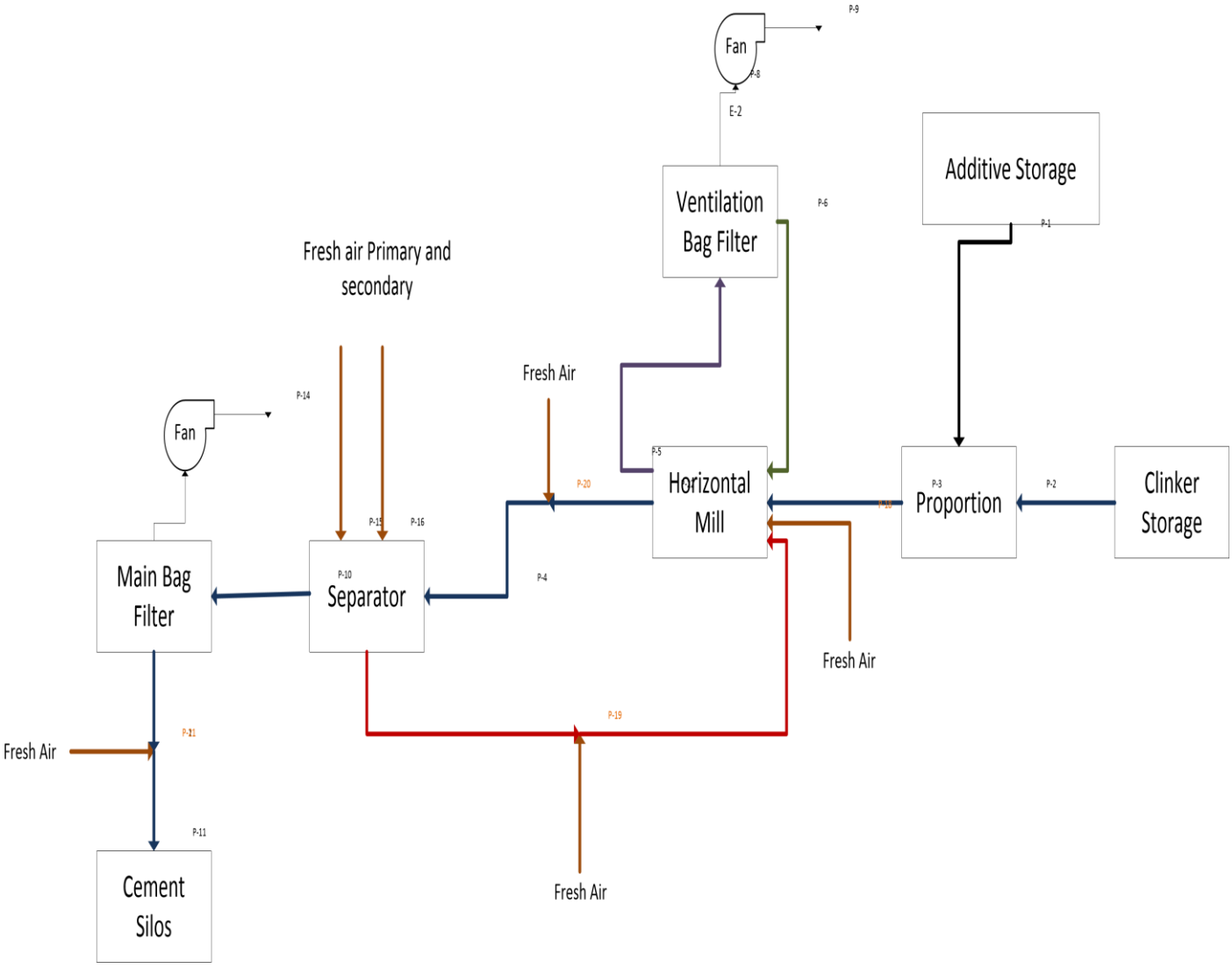
W = media weight (Ton)

N = Rotational Speed in rpm

عند أيقاف الطاحونة الافقية ذات الكرات (Horizontal Ball Mill) لفترات طويلة يتم تفريغ وسائل الطحن (Grinding Media) (الكرات) العائد لها لتجنب تشوه قشرة الطاحونة نتيجة لتأثير وزن الكرات الكبير عليها و هي بحالة التوقف.

Typical Block Diagram for Horizantal Ball Mill (Raw Mill)

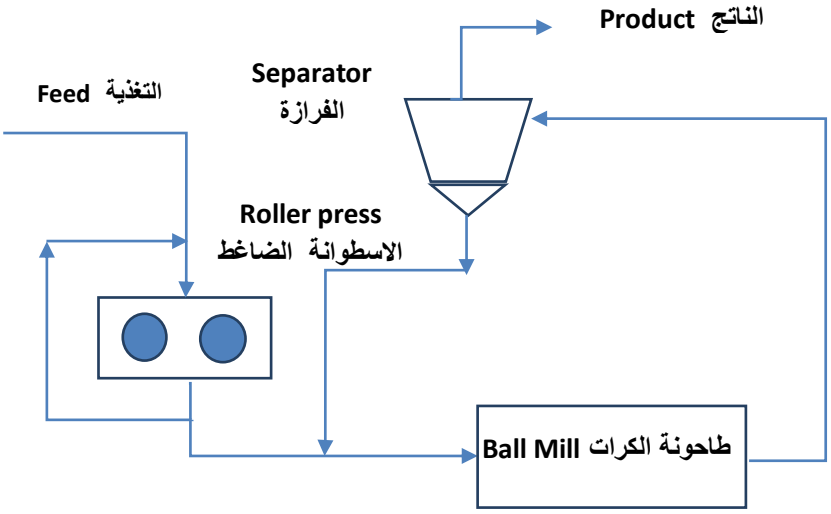
مخطط القوالب التقليدي لطاحونة الافقية ذات الكرات



بعض التصاميم القديمة من طاحونة الكرات الافقية (Ball MillHorizontal) يتم تفريغ المواد الى منتصف الطاحونة التي تنقسم الى قسمين وتسمى طاحونة الكرات ذات التفريغ الوسطي [(Central discharge ball mill (double rotator] حيث تدور كل قسم على حدى ويتم استخدام الفاصلة الساكنة (Static Separator) فيها, تتميز هذه الطاحونة بفصل المواد الناعمة المطحونة و تحويلها الى منتج نهائي بدل من ابقائها مع المواد الخشنة التي تحتاج الى طحن.

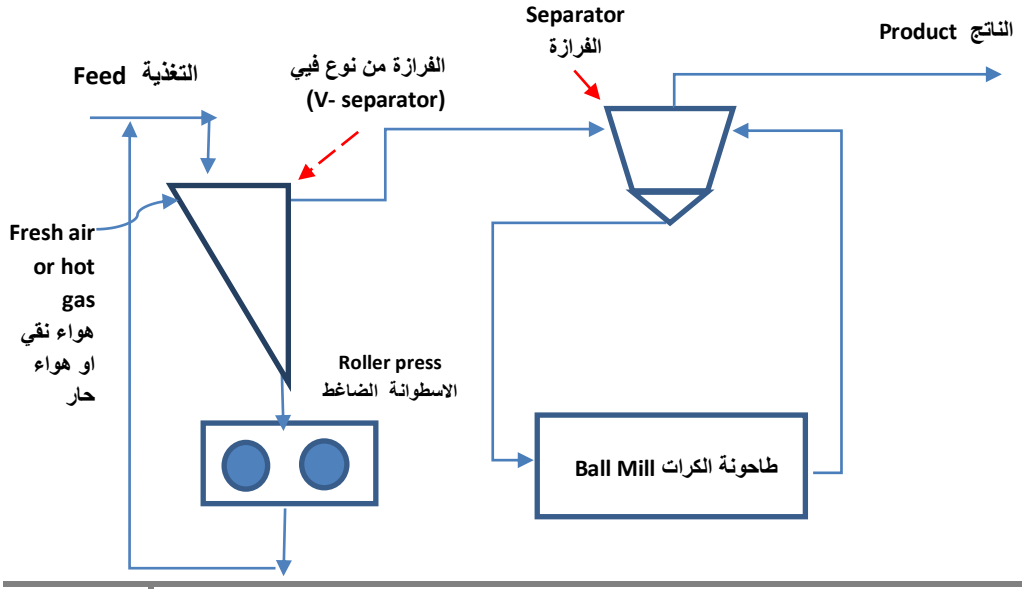
تطوير الطواحين Mill Development

لكون الطواحين ذات الكرات هي احدى اكثر المستهلكات للطاقة في معامل السمنت لذا تم تحوير مراحل العمليات للطاحونة لرفع كفاءتها واحدى هذه الطرق هي بإضافة الاسطوانة الضاغطة (Roller press) للطحن الأولي (Pre-Grinding), حيث يتم تغيير ترتيب احجام الكرات داخل الطاحونة بتبديل الكبير بالصغير و تغيير الغشاء (diaphragms) وتقليل عدد الغرف (Chamber) حيث يمكن رفع كفاءة الطاحونة من ناحية صرفها للطاقة في حدود 4 % الى 9%. وكما موضح في المخطط رقم (1):-



المخطط رقم (1)

في بعض التغيرات الاخرى وبإضافة الفرازة من نوع فيي (V-Separator) تتم رفع كفاءة الطحن الى 35 % بالمقارنة مع وضعها السابق وكما موضح في المخطط رقم (2):-



المخطط رقم (2)

نظرة عامة Over View

في المعامل القديمة كانت تستخدم طاحونة الكرات (Ball Mill) لتحضير وجبة المواد الاولية(Raw mill) لتغذية الفرن (Kiln Feeding) ولكن لاستهلاكها الكثير من الطاقة (Power) اكثر من الطواحين العامودية (Vertical Mill) ولكون الرطوبة العالية القادمة مع المواد قبل الطحن تم تبديلها بالطواحين العمودية (Vertical Mill) ولكن بقت الطاحونة تستخدم بشكل واسع في طحن الكلنكر (Clinker) مع مضافاتها (Additive) لإنتاج السمنت (Cement) ذي نعومة ممتازة.

تحاول الشركات المصنعة للطواحين العمودية (Vertical Mill) الدخول في مجال طحن الكلنكر (Clinker) مع مضافاتها (Additive) لإنتاج السمنت (Cement) وذلك بإيجاد حلول عملية لتوظيفها لهذا الغرض.

توجد نوع من الطواحين ذات الكرات تسمى بطاحونة ايروفل (Aero fall Mill) وتسمى ايضا بالأوتو جنزسس (Autogenous) والتي تكون ذات قطر كبير وطول قصير حيث ان نسبة القطر على الطول حوالي من 1:3 الى 1:5, وتتراوح حجم الكرات من 100 الى 130 مم,و تمثل الكرات (Ball) ما يقارب 6 % الى 12 % من الحجم المتاح داخل الطاحونة وتعمل بسرعة 75 % من السرعة الحرجة وقد تصل الى 84 % من السرعة الحرجة وتستخدم بشكل واسع في مجال صناعة المعادن وتأشيبها (Metallurgical) وهي قليلة الاستخدام في صناعة السمنت (Cement) , علما يمكن استخدامها في طحن المواد الأولية (Raw material) ولكنها قليلة الاستخدام لوجود طواحين احسن لهذا الغرض, مثل الطواحين العامودية (Vertical Mill).

2:8 الطاحونة العامودية Vertical Mill

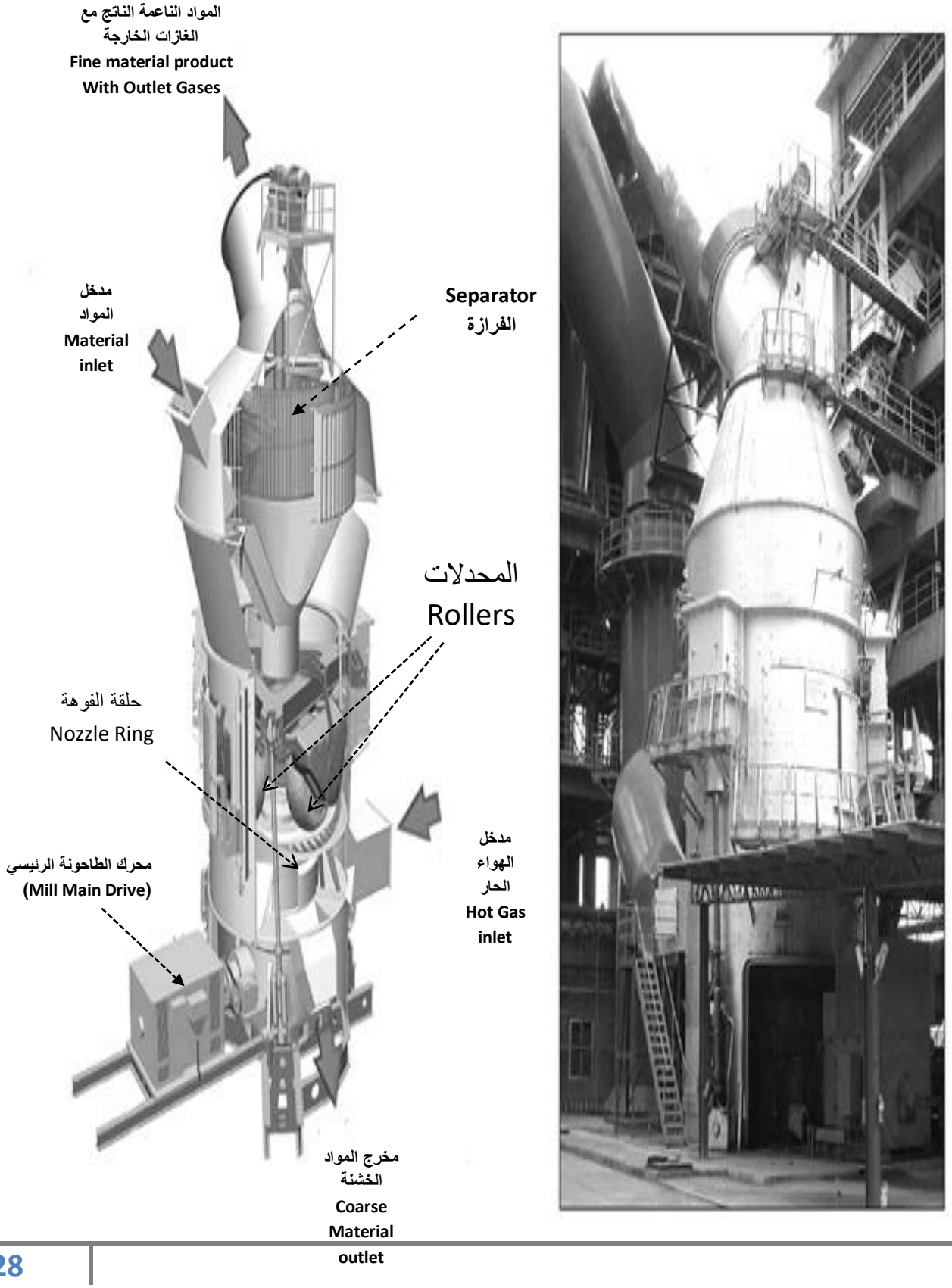
تستخدم الطواحين العامودية(Vertical Mill) بكثرة حاليا في معامل السمنت الحديثة و بالأخص في تحضير وجبة المواد الاولية (Raw Meal) و تنقسم الى نوعين الاولى(E – Mill or ring Ball Mill) الطاحونة العامودية ذات الحلقة او الكرات والتي صنعت عالميا لطحن الفحم (Coal) في محطات توليد الطاقة (Power Station) والثانية (Vertical Roller Mill) الطاحونة العامودية ذاتالمدحلةحيث ان النوع الثاني هي التي تهمنا اكثر في صناعة السمنت.

ان الطاحونة العمودية ذات المدحلة (Vertical Roller Mill) تستهلك طاقة اقل من طاحونة الكرات (Ball Mill) بمقدار40% الى 50 % وتتوفر بسعات كبيرة تصل الى 1200 طن في الساعة للطاحونة الواحدة و يمكن طحن المواد ذات الرطوبة العالية حتى 8 % و طحن مواد بأحجام اكبر من طاحونة الكرات (Ball Mill), حيث ان اكبر قطر للمواد الداخلة الى الطاحونة يمكن ان تصل الى 75 مم او 100 مم اي يمكن تغذيتها بحجارة ذات احجام اكبر وبالتالي فان كسارات الحجارة تكون اقل مما هي مطلوبة منها عندما تستخدم (Vertical Roller Mill) الطاحونة العامودية ذات المدحلة.

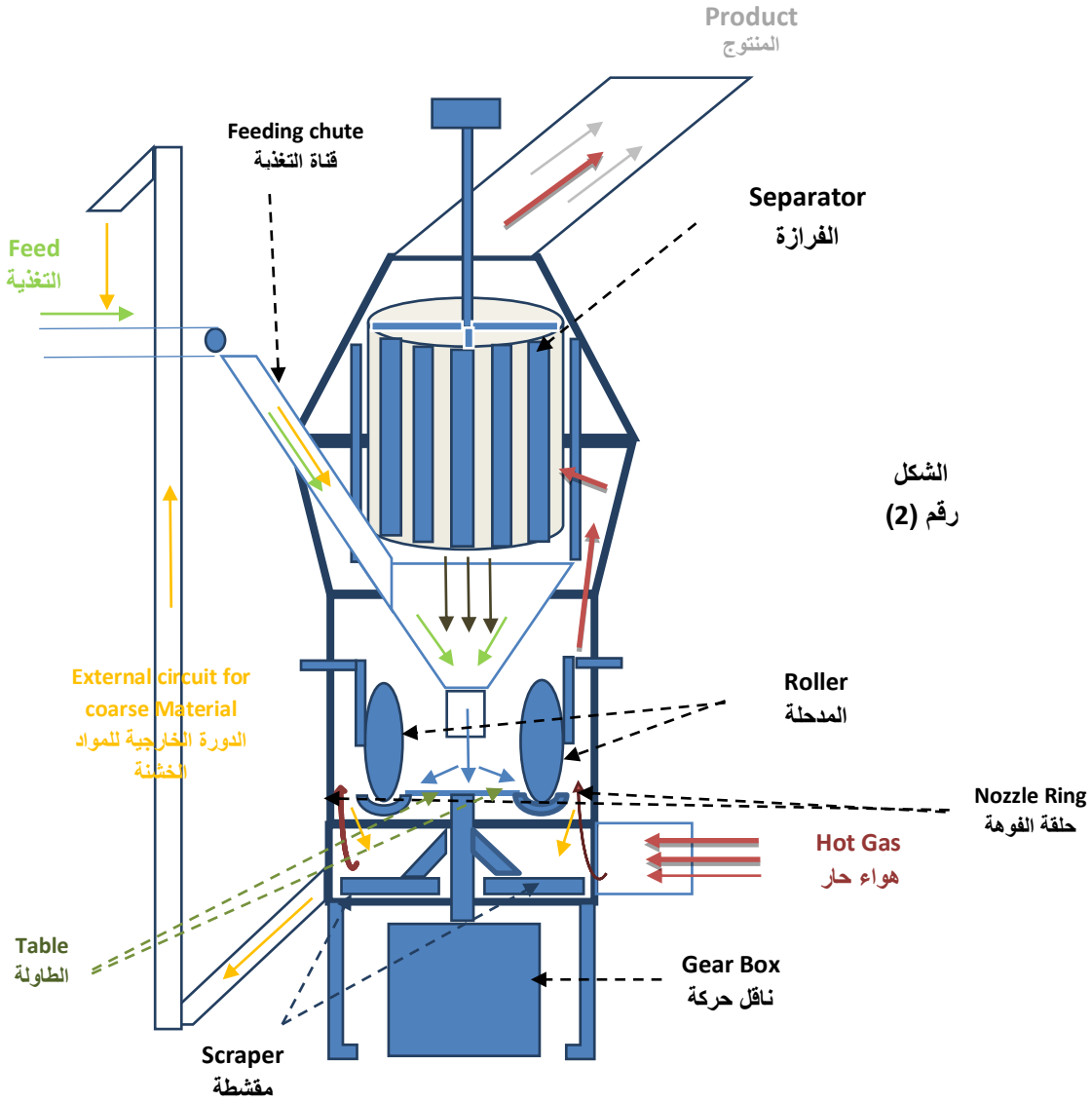
تسمى المدحلة (Roller) أيضا بالاطار (Tyre) في بعض المصادر.

في الصورة رقم (2) توضيح لبعض اجزاء الطاحونة العامودية ذات المدحلة (Vertical Roller Mill):-

الصورة رقم (2)



في الشكل رقم (2) مقطع عرضي لطاحونة عمودية (Vertical Mill):-



تسمى حلقة الفوهة (Nozzle Ring) أيضا بحلقة التهوية (Louver Ring) في بعض المصادر.

تحتوي الطواحين العامودية على محدلتين (Tow Roller) أو ثلاث أو اربع أو ست حسب التصميم, في بعض الأحيان يمكن الاستغناء عن رولة (مدحلة) أو رولاتي (محدلتين) متقابلتين في بعض الانواع لأجراء الصيانة أو في حالة كون التغذية قليلة وذلك فقط في بعض التصاميم. وتكون الفرازة (Separator) عالية الكفاءة مدمجة مع الطاحونة مما يختصر عدد الاجزاء وتأخذ حيزا اقل في الانشاء وتقلل من هبوط الضغط (Pressure Drop). يستخدم سحب الهواء من داخل الطاحونة لرفع المواد الناعمة وتمريرها للفرازة (Separator) ويستخدم محرك متغير السرع لتغير سرعة الفرازة (Separator) للسيطرة على نعومة الناتج.

سرعة الهواء العالية في حلقة الفوهة (Nozzle Ring)وزيادة حمل تدوير المواد عالي داخل الطاحونة يسبب هبوط للضغط (Pressure Drop) وبالتالي ارتفاع استهلاك الطاقة في مروحةالطاحونة (Mill Fan) و للتقليل من هذه السيئة تمت اضافة الدورة الخارجية للمواد الخشنة (External Circuit for coarse Material) لتقليل هبوط الضغط (Pressure Drop).

مبدا عمل الطاحونة العامودية ذات المدحلة Vertical Roller Mill

تتم تغذية الطاحونة من قناة التغذية (Feeding Chute) والتي تكون اما دوارة غلق (Rotary lock) في حال كون رطوبة المواد قليلة او ثلاثي الأبواب (Triple Gate) في حالة وجود رطوبة عالية وذلك لعزل منظومة الطاحونة من التأثيرات الخارجية كالحمل الهوائي الغير مرغوب (False Air).

تدخل المواد داخل الطاحونة وتقع على مركز الطاولة (Table) ونتيجةلدوران الطاولة (Table) تتحرك المواد بقوة الطرد المركزي (Centrifugal Force) باتجاه المحدلات (Rollers) وتنحصر بين المدحلة(Roller) والطاولة (Table) ونتيجة القوة الهيدروليكية (Hydraulic power) التي تسيطر على المحدلات (Rollers) تحدث عملية الطحن.

يتم رفع المواد المطحونة بقوة الهواء التي تولدها مروحة الطاحونة (Raw mill Fan) لتمريرها الى الفرازة (Separator) حيث يتم فصل المواد الناعمة المطلوبة كناتج وارجاع المواد الاكبر حجما الى مركز الطاولة (Table) لإعادة الطحن, واما المواد الخشنة (Coarse) والتي لا يمكن رفعها بقوة الهواء تنزلق من حلقة الفوهة (Nozzle Ring) وتدفعها المقشطة (Scraper) الى منظومة الدورةالخارجيةللموادالخشنة (External circuit for coarse Material) لتتم اعادة تغذيتها مع المواد الداخلة الى الطاحونة, يتم سحب المواد الناعمة الناتج من قبل مروحة الطاحونة (Raw mill Fan) لترسيبها وتستخدم لهذا الغرض السايكلون (Cyclone) والمرشحة (Filter) وبعدها تنقل الى الخزن في الصوامع (Silos).

تستخدم مروحة الطاحونة (Raw mill Fan) ايضا في السيطرة على كمية الغازات داخل الطاحونة وذلك بإرجاع جزء من الهواء او الغازات التي تسحبها من الطاحونة الى الطاحونة مرة اخرى وحسب متطلبات التشغيل.

الجدير بالذكر ان الحرارة المتولدة في الطاحونة العمودية ذات المحدلات (Vertical Roller Mill) اقل من طاحونة الكرات (Ball Mill) لاختلاف مبدا العمل حيث نحتاج الى مصدر حراري عند استخدام

الطاحونة العمودية ذات المحدلات (Vertical Roller Mill) لإنتاج السمنت (Cement) من طحن الكلنكر (Clinker) مع مضافاتها (Additive) وذلك حسب متطلبات جودة السمنت (Cement).

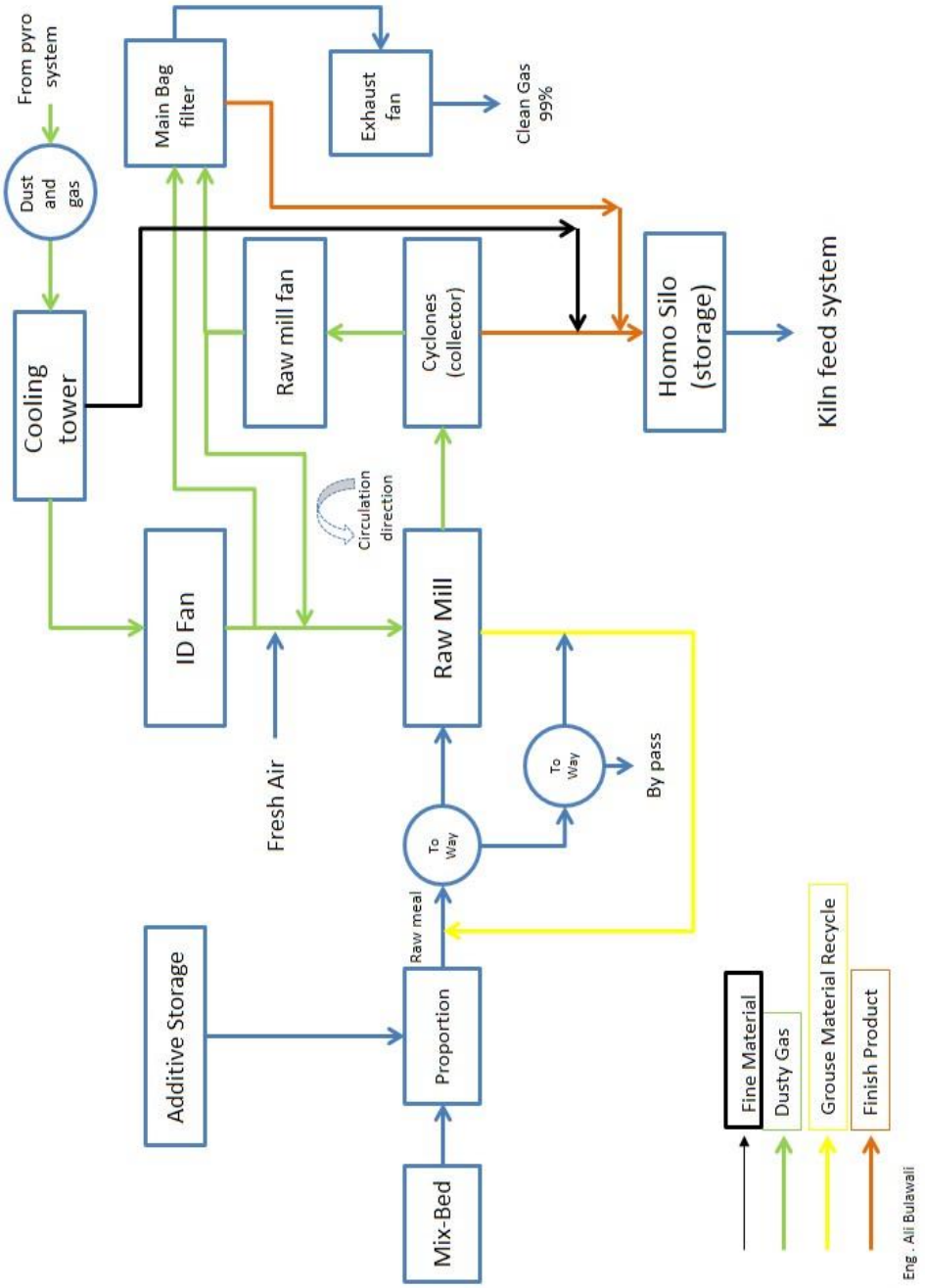
يكون الاهتزاز (Vibration) في الطاحونة العامودية ذات المحدلات (Vertical Roller Mill) اعلى من طاحونة الكرات (Ball Mill) لاختلاف مبدأالعمل, ويزداد الاهتزاز (Vibration) عندما تكون رطوبة المواد قليلة ولذلك يرش الماء على المواد داخل الطاحونة لتقليل الاهتزاز (Vibration) في حالة قلة رطوبة المواد الداخلة الى الطاحونة.

توجد تصاميم تستخدم حجمين و بقطرين مختلفين من المحدلات (Roller) واحدة صغيرة والثانية كبيرة لطحن المواد بمرحلتين كما هي الحال الى حد ما في طاحونة الكرات (Ball Mill) التي تحتوي على غرفتين (Tow Chamber) والتي تم توضيحها في فقرة طاحونة الكرات, تستخدم حاليا محركات متعددة لتدوير ناقل حركة (Gear Box) او المخفض (Reducer) للسيطرة على سرعة الطاولة (Table) للطاحونة للتحكم في مدة بقاء المواد عليها.

عند تقليل تغذية الطاحونة بالمواد (Raw Mill Feed) في الطاحونة العامودية ذات المحدلات (Vertical Roller Mill) يقل استهلاك الطاقة و الى حد ما حيث يقل الحمل على محرك الطاحونة الرئيسي (Mill Main Drive) وهذا الامر لا يمكن تطبيقها في طاحونة الكرات (Ball Mill) لاختلاف مبدا العمل حيث لا يمكن التحكم في الكرات (Ball) الفلزية داخل الطاحونة أو سرعة الطاحونة مع التغذية, على عكس الطاحونة العامودية ذات المحدلات (Vertical Roller Mill) التي يمكن التحكم بقوة الطحن عن طريق السيطرة على المحدلات هيدروليكيا (Hydraulically) وبالتالي تقليل الحمل على محرك الطاحونة الرئيسي (Mill Main Drive) والذي يعتبر من مستهلكات الطاقة في الطاحونة. وكذلك يقل الحمل على مروحة الطاحونة (Mill Fan) نتيجة التغذية القليلة والتي تعتبر اكبر مستهلك للطاقة.

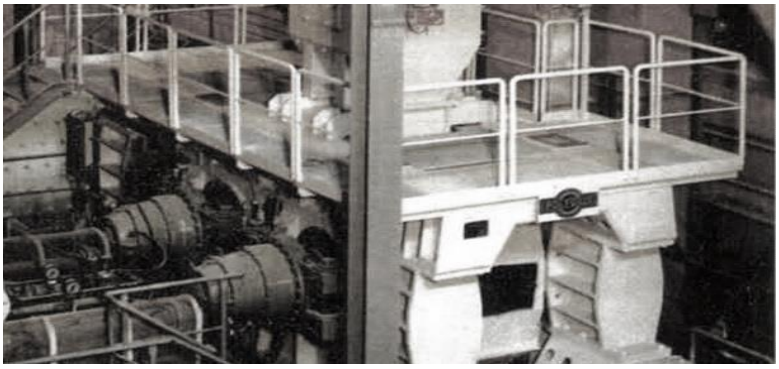
Typical Block Diagramfor Vertical Roller Mill (Raw Mill)

مخطط القوالب التقليدى لطاحونة عامودية ذات المحدلات



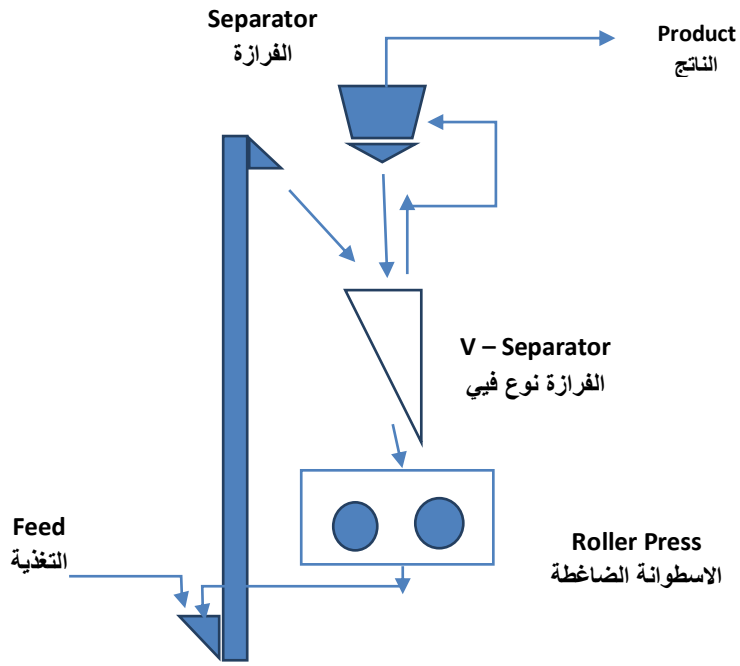
3:8 الاسطوانة الضاغطة Roller Press

هي عبارة عن اسطوانتين متجاورتين افقيا, احدها دوارة بمحرك والثانية خاملة وتكون احدى الاسطوانات ثابتة المحور والاخرى متحركة ومسيطرة عليها هيدروليكيا (hydraulically) المسافة بين الاسطوانتين هي التي تحدد جودة الناتج مع الاخذ بنظر الاهتمام سرعة التآكل للأجزاء الفعالة للطحن لكون احد عيوب هذه المعدة حاجتها للصيانة المستمرة والمتابعة للحفاظ على كفاءة الطحن و توجد العديد من التصاميم لها تختلف حسب طريقة السيطرة على الاسطوانتين, تستخدم اما كطواحين اولية (Pre Grinding) لطواحين ذات الكرات (Ball Mill) (كما تم توضيحها في قسم طاحونة الكرات (Ball Mill) او تستخدم لوحدها كطاحونة وتتميز باستهلاكها القليل للطاقة و تشبه الطواحين العامودية ذات المدحلة (Vertical Roller Mill) من هذه الناحية, الرطوبة العالية الموجودة مع المواد التي تتم طحنها في الاسطوانة الضاغطة (Roller Press) تلعب دورا سلبيا في كفاءة الطحن. في الصورة رقم (3) نموذج للأسطوانة الضاغطة (Roller Press):-



الصورة رقم (3)

في الشكل رقم (3) الاسطوانة الضاغطة (Roller Press) منفردة في منظومة للطحن

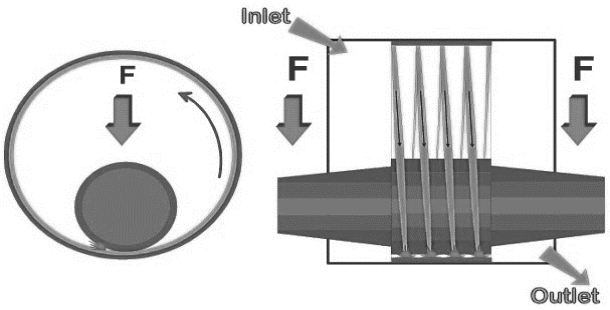


الشكل رقم (3)

4:8 طاحونة هورو Horo Mill

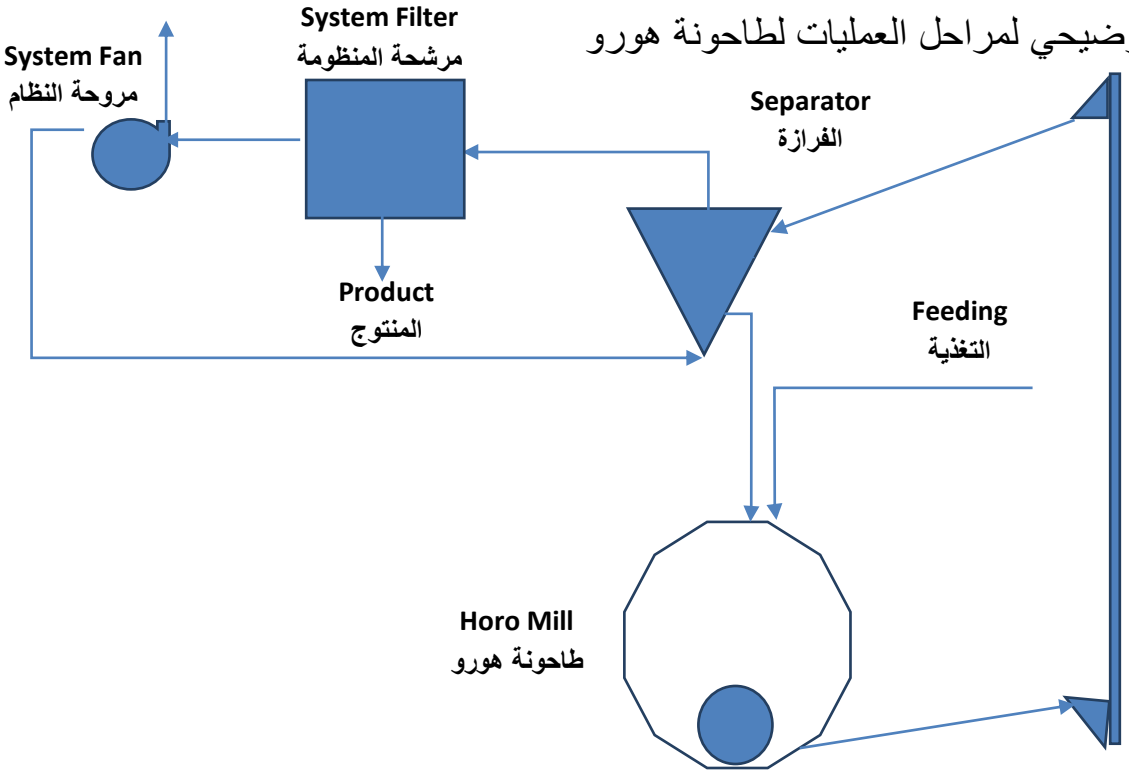
التسمية هي مختصر للطاحونة الافقية ذات الاسطوانة (Horizontal Roller Mill) وهي عبارة عن قشرة خارجية اسطوانية (Cylindrical Shell) كما موجود في طاحونة الكرات (Ball Mill) ورولة (Roller) واحدة كما موجود في الاسطوانة الضاغطة (Roller Press) يتم تدوير القشرة الخارجيةالاسطوانية (Cylindrical Shell) وتكون الرولة (Roller) خاملة. تم تطويرها حديثا في التسعينيات من القرن المنصرم, استهلاكها اقل للطاقة مقارنة مع طاحونة الكرات (Ball Mill) من 30% الى 50 % , ولها القابلية على تجفيف الرطوبة مع المواد حتى 20 %.

يعتمد مبدا الطحن على اتاحة الفرصة عدة مرات للضغط والطحن للمواد, وكذلك هي قليل الاهتزاز ولكن تشغيلها يتأثر كثيرا لقابلية الطحن (Grindability) للمواد التي سيتم طحنها. تحتاج الى مساحة اقل من طاحونة الكرات (Ball Mill) للتنصيب ويمكن تشغيلها بضغط معتدل اقل من الاسطوانة الضاغطة وهذا يضمن اطالة مدى عمر (Lifetime) للأجزاءالتي تتعرض للتأكل, في الصورة رقم (4) توضيح للطاحونة الافقية ذات الاسطوانة (Horizontal Roller Mill):-



الصورة
رقم (4)

في الاسفل مخطط توضيحي لمراحل العمليات لطاحونة هورو (Horo mill)

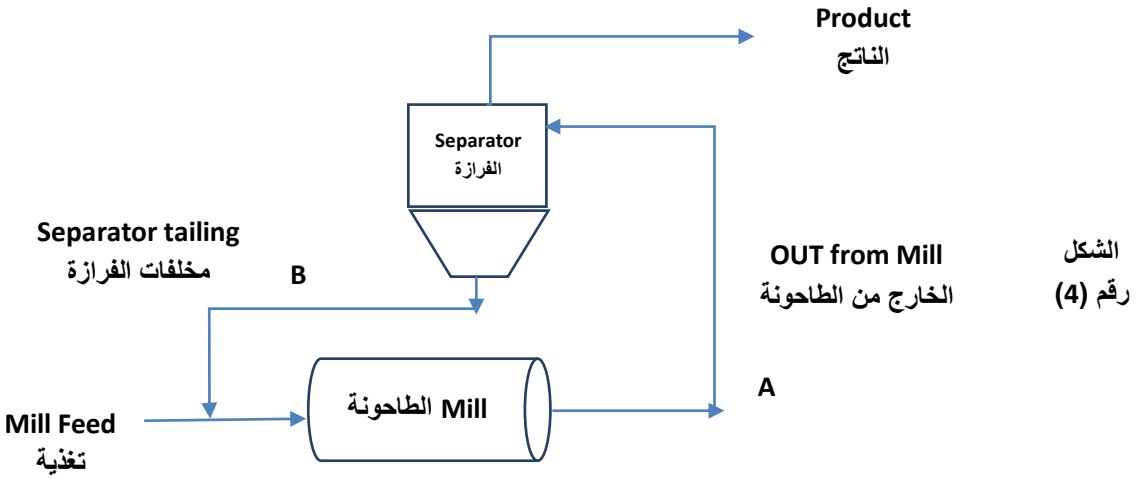


يمكن استخدام طاحونتي هورو مع فاصلة واحدة كبيرة للاختصار في عدد المعدات وتقليل المساحة واستهلاك الطاقة والتكلفة.

حمل الدوران Circulating Load

هي عبارة عن كمية المواد التي تبقى في المنظومة عند استقرار تشغيل الطاحونة وتكون في حدود 300 % الى 200% في الدورة المغلقة (Close Circuit) التي تحتوي على الفرازة (Separator) من الطرازات القديمة ومن 200% الى 150 % في طواحين السمنت (Cement Mills) ذات الفرازات(Separator) الحديثة. اذا كانت تغذية الطاحونة 100 طن في الساعةوحمل الدوران 150 % تكون حمل الدوران 150 طن في الساعة اي الراجع (Return) من الفرازة (Separator) (النقطة B). كما موضح في الشكل رقم (4).

يسمى راجع الفرازة (Separator Return) في بعض المراجع بمخلفات الفرازة (Separator Tailing) او بحصى الفرازة (Separator Grits).



الشكل رقم (4)

$$\text{حمل الدوران (Circulating Load)} = \frac{\text{مخلفات الفرازة } Separatortailing}{\text{الناتج } Product} * 100$$

يكون حمل الدوران في الطاحونة الافقية ذات الاسطوانة (Horizontal Roller Mill) (Horo Mill) حوالي 550 % , و الطاحونة ذات المحدلات (Roller Mill) حوالي 800 %.

في بعض المراجع يتم استخدام عامل الدوران (Circulating Factor) و يتم حسابها كالتالي:-

$$\text{عامل الدوران (Circulating Load)} = \frac{\text{الطاحونة من الخارج } \boldsymbol{out\ from\ Mill}}{\text{الناتج } \boldsymbol{Product}} * 100$$